

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité : **Informatique**

Présentée par : **Paul GUYOT**

pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

Simulations multi-agents participatives

**Faire interagir agents et humains pour explorer,
modéliser et reproduire les comportements collectifs**

Soutenue le **mardi 27 juin 2006** devant le jury composé de :

Yves DEMAZEAU	Chargé de Recherche (HDR)	CNRS, IMAG	Rapporteur
Bruno LATOUR	Professeur	École des Mines de Paris, CSI	Rapporteur
Jean-François PERROT	Professeur Émérite	Université Paris 6, LIP6	Examineur
Juliette ROUCHIER	Chargée de Recherche	CNRS, GREQAM	Examinatrice
Jean-Paul SANSONNET	Directeur de Recherche	CNRS, LIMSI	Examineur
Alexis DROGOUL	Directeur de Recherche	IRD	Directeur de thèse
Jean-Pierre BRIOT	Directeur de Recherche	CNRS, LIP6	Invité
Shinichi HONIDEN	Professeur	Université de Tokyo, NII	Invité

*À ceux qui m'ont vu commencer ce travail.
À celui qui se demandait ce qu'est une thèse d'informatique.
J'ai terminé trop tard.*

Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	viii
Table des encadrés	x
Remerciements	xi
I Introduction	I
1.1 Pourquoi des simulations multi-agents participatives?	2
1.1.1 L'intelligence artificielle comme discipline du mimétisme	2
1.1.2 Participation et mise en situation	3
1.1.3 Analyse et compréhension	5
1.1.4 Communautés mixtes	5
1.2 Que sont les simulations multi-agents participatives?	6
1.2.1 Définition	6
1.2.2 Résolution collective de problèmes	7
1.3 Organisation de la thèse	8
1.4 Avertissements	10
2 Cadre des simulations multi-agents participatives : agents et systèmes hybrides	11
2.1 Agents et systèmes multi-agents	12
2.1.1 Définitions d'agent	12

TABLE DES MATIÈRES

2.1.2	Agents réactifs et agents cognitifs	12
2.1.3	Anthropomorphisme des agents	13
2.1.4	Systèmes multi-agents et simulations multi-agents	14
2.2	Problème posé par la notion d'agent	15
2.2.1	Phase d'observation	15
2.2.2	La simulation multi-agents participative comme système multi-agents idéal	17
2.3	Les systèmes hybrides	18
2.3.1	Agents et humains	18
2.3.2	Tolérance et collaboration dans les systèmes hybrides	19
2.4	Conclusion	20
3	Validation de modèles de résolution de problèmes	23
3.1	Modélisation par des simulations multi-agents	24
3.1.1	Trois modèles, trois rôles	25
3.1.2	Optimisation de la boucle de conception	26
3.2	L'approche MAS/RPG	28
3.2.1	Trois usages des jeux de rôles	29
3.2.2	La méthode MAS/RPG	31
3.3	SimCafé	35
3.3.1	La conception de simulations multi-agents participatives	35
3.3.2	Modèles des expériences SimCafé	38
3.3.3	Le modèle de conception	42
3.3.4	Le modèle de simulation	45
3.3.5	Les expériences	47
3.4	Conclusion : stratégies individuelles et comportements collectifs	54
4	Le joueur, l'agent et le chercheur : expliciter les stratégies individuelles	57
4.1	Le chercheur et les joueurs	58
4.1.1	Typologie des simulations participatives	58

4.1.2	Le réseau ComMod	61
4.1.3	Les trois rôles du chercheur	64
4.2	SimCommod, une simulation multi-agents participative inspirée de l'ap- proche ComMod	68
4.2.1	CherIng	68
4.2.2	De CherIng à SimCommod	71
4.3	L'agent assistant	75
4.3.1	Projet d'agent maïeutique	75
4.3.2	Expériences de Bangkok	76
4.3.3	L'agent assistant	77
4.3.4	Verbalisation et discussion	79
4.4	Conclusion	82

5 Apports de l'économie expérimentale pour l'étude des comportements

	collectifs	83
5.1	L'économie expérimentale	84
5.1.1	Le "modèle du domaine" et l'économie expérimentale	85
5.1.2	L'importance de l'institution	87
5.1.3	Test, échec des théories et conception participative	88
5.1.4	Les méthodes	90
5.1.5	Economie expérimentale et simulations multi-agents	92
5.2	SimBar	95
5.2.1	Le bar El Farol	96
5.2.2	Simulations informatiques	97
5.2.3	Expériences SimBar I et II	104
5.2.4	Expérience SimBar III	106
5.3	Pouvoir et ontologies	108
5.3.1	Négociation et pouvoir dans les systèmes multi-agents	109
5.3.2	Pouvoir et négociation dans les simulations participatives	111
5.3.3	Négociation dans les expériences SimCommod-Tokyo	112

5.3.4	Analyse	114
5.4	Conclusion : l'importance des interactions	115
6	Modélisation informatique des interactions	117
6.1	Automates à états finis	118
6.1.1	Modèles d'interaction	118
6.1.2	Utiliser les traces	120
6.1.3	Trois hypothèses de travail	121
6.1.4	Machines de Mealy et forme des interactions	121
6.2	Extraction automatique de motifs d'interaction	123
6.2.1	Le langage Q	124
6.2.2	Extraction automatique	128
6.3	Modèles d'agents pour les comportements collectifs	134
6.3.1	Machines de Mealy en parallèle	134
6.3.2	Extension de Q	136
6.4	Conclusion : trois propriétés de la modélisation informatique des interactions	137
7	Emergence et résolution collective de problèmes	139
7.1	Définition épistémique de l'émergence	140
7.1.1	Notion d'émergence en philosophie	140
7.1.2	L'émergence comme problème scientifique	140
7.1.3	Émergence et complexité dans les systèmes multi-agents	142
7.2	Observation et ingénierie	145
7.2.1	Deux faces de l'émergence	145
7.2.2	Conception participative des systèmes multi-agents	148
7.3	Conclusion	151
8	Conclusion	153
8.1	Construction de systèmes multi-agents	153

8.2	Apports des simulations multi-agents participatives pour d'autres disciplines	154
8.3	Émergence de comportements collectifs dans les communautés mixtes	157
	Bibliographie	159
	Liste des expériences	177
	Résumé	178
	Abstract	179
	要約	180
	Extracto	181

Table des figures

2.1	4 étapes du rassemblement des jetons par les agents “termites”	16
2.2	Automate représentant le fonctionnement d'un agent “termite”	16
3.1	Conception de simulations multi-agents (d'après Vanbergue [2003])	25
3.2	Taxonomie des simulations (d'après Fishwick [1994])	27
3.3	Méthode MAS/RPG (d'après Barreteau <i>et al.</i> [2001])	29
3.4	Automate cellulaire de SylvoPast (version Excel) [Etienne, 2003]	32
3.5	Interaction entre l'environnement simulé par Comas et le jeu de rôles (d'après Adamatti <i>et al.</i> [2005])	33
3.6	Module de visualisation pour Comas, permettant de créer n'importe quel point de vue	35
3.7	Processus de conception des simulations multi-agents participatives	36
3.8	Producteurs de café rencontrés à la Feria del Café	42
3.9	Coalition directe entre producteurs	43
3.10	Participation d'un producteur à une coopérative	44
3.11	Coalition avec multi-diffusion	44
3.12	Expériences SimCafé : Edgar Mendoza Flores assumant le rôle de l'acheteur	47
3.13	Offres conclues durant la troisième expérience	52
4.1	Typologie des simulations participatives	58
4.2	Environnement dans CherIng & SimCommod (état initial)	69
4.3	Les quatre niveaux de la ressource	69
4.4	Evolution de la ressource Ing en fonction de la présence d'exploitants	70

4.5	Sélection des 3 cases les plus foncées pour les exploiter	72
4.6	Négociation dans SimCommod-Bangkok	73
4.7	En blanc, les participants de SimCommod à Bangkok (groupe A)	76
4.8	L'agent assistant en train de faire une suggestion	78
5.1	Les institutions dans la théorie économique (d'après Smith [1989])	88
5.2	Bar El Farol, Santa Fe, Nouveau Mexique	96
5.3	Joueurs à SimBar I	104
5.4	Session de SimBar III	106
5.5	Participant de SimCommod-Tokyo (Septembre 2005)	109
6.1	Carte d'interaction (d'après [Ishida, 2002])	124
6.2	Conception d'agents Q (d'après [Ishida et Nakanishi, 2003])	125
6.3	Extrait d'un programme Q (d'après [Ishida, 2002])	126
6.4	Scénario Q (d'après [Ishida et Fukumoto, 2002])	127
6.5	Automate correspondant au scénario Q de la figure 6.4	127
6.6	Exemple de motif d'interaction pour SimCafé	129
6.7	Traces de discussion entre agents Q	129
6.8	Efficacité de la programmation génétique avec et sans les variables libres (première expérience, trace d'Abelardo)	132
6.9	Scène extraite automatiquement de la trace des actions d'Hector lors de la troisième expérience	133
6.10	Paillasson "irasshaimase" de <i>comбини</i>	134
6.11	Modélisation "Mealy" des interactions de l'employé du <i>comбини</i>	135
6.12	Plusieurs machines de Mealy pour modéliser les interactions de l'employé du <i>comбини</i>	136
7.1	Avatars de SimBar	147
7.2	Comparaison de l'efficacité des différentes stratégies (simulations Comas)	150

Table des encadrés

Première architecture réseau de Simulación	48
Java, un choix historiquement marqué	50
Simulación et XML	67
Cormas et Simulación	74
Anticipation, connaissance commune et théorie des jeux	81
Algorithmes évolutionnistes et programmation génétique	99
Jeu de la minorité	102
Seconde architecture réseau de Simulación	107
ε-Machines de Mealy	122

Remerciements

Je remercie Jean-Pierre Briot, Yves Demazeau, Shinichi Honiden, Bruno Latour, Jean-François Perrot, Juliette Rouchier et Jean-Paul Sansonnet pour l'honneur qu'ils me font en faisant partie de mon jury de thèse. Je les remercie aussi pour tout le reste.

Le travail qui suit doit beaucoup à mes collègues. Au Laboratoire d'Informatique de Paris VI, j'ai eu la chance de travailler en compagnie des doctorants Alexandru, Clément, David, Diane, Jean-Charles, Lilia, Michael, Minh, Salima et Yasmine et des permanents Amal, Mikal, Nicolas et Zahia. Je tiens aussi à remercier Éric, Matsuzaki-san et Tei-san auprès de qui j'ai travaillé au National Institute of Informatics. Je leur suis reconnaissant à la fois pour l'ambiance de travail, leurs conseils avisés et l'ensemble des discussions pendant les déjeuners, les pauses café, dans les couloirs et dans les bureaux. Tout ce qui fait la vie de laboratoire.

Mes recherches ont été grandement facilitées par le travail de Christophe Boudier, Ghislaine Mary, Miki Nakagawa, Monique Benoît, Sayo Omata et Shuko Yamada. Je tiens à les remercier pour leur professionnalisme, leur gentillesse et leur bonne humeur qui m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions.

Cette thèse n'existe que grâce aux co-organisateur et aux participants des différentes expériences de simulations participatives : Christian Lemaître et les étudiants du LANIA, les membres du Laboratoire d'Informatique de Paris VI, les membres du Honiden-Lab et du National Institute of Informatics, Christophe Le Page et les étudiants de l'Université de Chulalongkorn.

J'ai eu la chance de collaborer avec des chercheurs de différents horizons tels Pierre Bommel, Michel Étienne, Christophe Le Page et Raphaël Mathevet. Je tiens à les

REMERCIEMENTS

remercier de m'avoir montré d'autres façons de travailler.

Je dois également beaucoup à Patrick Taillandier et Benjamin Corbara. Indépendamment de l'importance de leur contribution aux résultats présentés ici, ce fut un plaisir de travailler avec eux et de les guider.

Tout au long de ma thèse, et dès le DEA, Alexis m'a beaucoup appris, consciemment et inconsciemment. Si je peux dire que la thèse est avant tout une formation par la recherche, c'est surtout et d'abord grâce à lui.

J'ai également beaucoup appris au contact de Shinichi Honiden, et je tiens à le remercier de m'avoir accueilli au sein de son équipe où j'ai pu poursuivre mon travail dans d'excellentes conditions.

La recherche ne se fait pas sans financement et mon travail a été rendu possible par une allocation de recherche du Ministère français de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, une bourse de la Japan Society for the Promotion of Science ainsi qu'une indemnité de moniteur de l'Université Pierre et Marie Curie. Je suis aussi redevable des organismes qui ont financé les missions et d'autres aspects matériels de ma recherche : le Laboratoire Franco-Mexicain d'Informatique et en particulier le CNRS et le Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), l'Union Européenne, EDF et le National Institute of Informatics.

Je remercie mon père et Marie pour leurs conseils et leurs commentaires qui m'ont permis d'éclaircir de nombreux points. Je remercie également Alexis, Daniel, Ghislain, Juliette et Matsuzaki-san pour leurs relectures et leurs corrections.

Merci aussi à Jean-Daniel et à Alexis pour avoir effectué à ma place les démarches administratives auprès de l'Université Pierre et Marie Curie.

Je souhaite terminer ces remerciements en mentionnant l'aide extrêmement précieuse de Mélanie tout au long de ma thèse, son soutien moral et ses nombreuses relectures.

Merci à toutes et à tous.

I Introduction

Comment explorer, modéliser et reproduire dans les systèmes multi-agents, les capacités d'innovation mises en œuvre par les groupes sociaux pour résoudre collectivement des problèmes ?

L'observation des fourmis a permis de construire des systèmes multi-agents pour résoudre des problèmes de manière distribuée, mais les applications sont en nombre limité. Les problèmes résolus par les groupes sociaux sont autrement plus complexes que ceux résolus par les colonies de fourmis ; les mécanismes sociaux de résolution sont également plus difficiles à modéliser et reproduire. L'observation et l'introspection ne permettent pas de suffisamment comprendre ces mécanismes pour les reproduire dans des systèmes multi-agents. Même lorsque les stratégies individuelles sont conscientes et explicitées, ces mécanismes ne sont parfois visibles qu'en situation.

Mon hypothèse est que la construction de systèmes multi-agents inspirés de comportements humains peut se faire à l'aide de simulations hybrides, mêlant agents autonomes et agents contrôlés par des humains. L'analyse du comportement des participants de ces simulations nous permet d'explorer les stratégies et les comportements de manière plus efficace que l'introspection et l'observation. La médiation informatique des simulations hybrides permet en effet de ne rien perdre des interactions entre les participants en les enregistrant en totalité. Les situations simulées encouragent les participants à adopter des comportements collectifs réalistes.

La communauté scientifique qui conçoit des systèmes multi-agents s'intéresse à la validation des modèles de comportements collectifs qu'elle utilise, à la modélisation des stratégies individuelles dans le cadre de comportements collectifs, aux théories

formelles qui décrivent ces stratégies (comme la théorie des jeux), à la traduction informatique des interactions et à l'émergence de solutions collectives.

L'apport des simulations multi-agents participatives couvre ces cinq aspects de la conception de systèmes multi-agents.

I.1 Pourquoi des simulations multi-agents participatives ?

Les simulations multi-agents participatives sont des expériences. Avant d'en expliquer les particularités, ce qui est l'objet des pages qui suivent, il faut décrire le contexte dans lequel elles s'inscrivent.

I.1.1 L'intelligence artificielle comme discipline du mimétisme

Ce qu'est l'intelligence artificielle reste un objet de débats. Par exemple, en 2003, Marvin Minsky a pu déclarer qu'elle "est en mort cérébrale depuis les années 1970" [Baard, 2003]. Un certain courant plus moderne de la discipline, dans lequel je me reconnais, considère que l'intelligence artificielle est fondée sur le mimétisme. Elle vise à créer des systèmes artificiels qui reproduisent des comportements intelligents ou qui ont des compétences rattachées à l'intelligence. Les systèmes artificiels intelligents peuvent par exemple résoudre des problèmes, apprendre et s'adapter.

Une des méthodes pour la conception de tels systèmes consiste à observer comment ces capacités sont présentes dans des organismes biologiques ou des systèmes naturels, et à essayer de les reproduire. Cette méthode n'a pas nécessairement comme objectif de simuler ou de reproduire les mécanismes naturels à l'identique. Au contraire, la plupart des techniques issues de l'intelligence artificielle qui sont utilisées dans l'industrie, ne sont pas directement liées au système naturel originel. Par exemple, le terme de "réseaux de neurones artificiels" indique une parenté entre les réseaux de *perceptrons* et les neurones biologiques [Rosenblatt, 1958]. Pourtant, les perceptrons n'ont aucun rapport direct avec les neurones naturels : les réseaux de neurones artificiels sont en fait des objets mathématiques capables de s'approcher de fonctions mathématiques non linéaires dont on connaît la valeur en plusieurs points [Leray et Gallinari, 1998],

cette capacité servant notamment pour la reconnaissance de formes. De la même manière, les méthodes évolutionnistes efficaces [Landau *et al.*, 2005] ont peu de rapport avec la réalité de la théorie darwinienne.

L'intelligence artificielle distribuée est une branche de l'intelligence artificielle qui s'intéresse particulièrement à la conception de systèmes distribués, c'est-à-dire composés de plusieurs entités similaires qui sont reliées. Les propriétés qu'elle cherche à mimer sont les propriétés du système dans son ensemble, et non pas les propriétés des entités individuelles. L'intelligence artificielle distribuée procède par observation ; la nature fournit des exemples de systèmes complexes qu'il est intéressant de mimer [Parunak, 1997]. Un exemple classique de ce domaine est la colonie de fourmis [Drogoul, 1993]. Les fourmis sont capables de trouver des sources de nourriture grâce à une stratégie exploratrice utilisant un marquage aux phéromones. Certaines espèces se forment en pont pour franchir des fossés dans la forêt amazonienne. L'observation des comportements des fourmis permet de construire des systèmes artificiels capables de résoudre des problèmes similaires. Ces systèmes informatiques sont des systèmes multi-agents, c'est-à-dire des ensembles d'entités possédant des propriétés proches de celles des fourmis, comme l'autonomie et la pro-activité.

Les systèmes bio-inspirés de ce type résolvent des problèmes simples [Werner, 1996]. Les techniques dérivées de l'observation des colonies de fourmis sont en nombre limité, et les recherches actuelles inspirées des fourmis visent à combiner ces techniques avec d'autres méthodes [Ando *et al.*, 2006]. En revanche, les groupes sociaux humains traitent de manière collective des problèmes qui sont autrement plus compliqués, et s'en inspirer nécessite de pouvoir les observer, les comprendre et les modéliser.

1.1.2 Participation et mise en situation

L'observation, l'introspection et les entretiens sont des méthodes relativement limitées pour comprendre les phénomènes sociaux, et surtout pour acquérir des connaissances suffisantes pour les reproduire. Une première limite concerne la nature de ces

méthodes. Il est évidemment impossible d'user de l'introspection ou des entretiens pour comprendre les comportements des fourmis. Une seconde limite concerne tout ce qui est tabou ou refoulé. On pense bien sûr à ce qui est révélé par la psychanalyse. Mais pour prendre un exemple plus proche des simulations multi-agents participatives et sur lequel j'ai directement travaillé, les producteurs de café de l'état de Veracruz, lorsqu'ils sont interrogés, refusent d'admettre qu'ils acceptent une offre d'achat à terme pour une quantité de café supérieure à leurs stocks (cf. chapitre 3).

Les sociologues usent de divers moyens pour contourner ces limites et acquérir des connaissances sur les groupes sociaux, en formation ou déjà institués, qu'ils étudient. Un exemple de ces moyens est l'observation participante. Il s'agit de s'immerger complètement au sein du système étudié afin d'en comprendre toute la finesse. William Foote Whyte est presque considéré comme l'un des leurs lorsqu'il va jouer au bowling avec les Italo-américains qu'il étudie [Whyte, 1943]. L'ethnométhodologie cherche à susciter l'étonnement, l'indignation, la honte et la culpabilité afin de révéler les mécanismes des activités quotidiennes et routinières [Garfinkel, 1967, pp. 37–38]. Une autre méthode, l'intervention sociologique, consiste à organiser une auto-analyse des acteurs des mouvements sociaux en les amenant à rencontrer divers interlocuteurs qui les font réagir [Dubet, 2001]. Par exemple, François Dubet et son équipe ont fait rencontrer un maire ou un policier à des groupes de jeunes de banlieue [Dubet, 1987].

L'approche que je propose pour construire des systèmes artificiels inspirés des comportements sociaux, le recours aux simulations multi-agents participatives, est aussi fondée sur la participation et la mise en situation. Il s'agit de faire participer des joueurs humains à des simulations inspirées du réel. Parce qu'il mêle agents entièrement contrôlés par des joueurs humains et agents logiciels autonomes, le système mis en place pour la simulation est à mi-chemin entre le système informatique tel qu'on cherche à le construire, et le groupe humain qui exhibe les compétences ou le comportement que l'on cherche à comprendre ou à mimer. Cette approche a deux avantages intrinsèques. D'une part, tous les détails du contrôle exercé par les humains sont enregistrés et peuvent être analysés afin de révéler leurs stratégies et leurs comportements. D'autre part, la médiation de l'outil informatique force les acteurs à avoir un compor-

tement délibéré et donc plus conscient, ce qui favorise la discussion lors des séances de verbalisation qui suivent les expériences de simulation.

1.1.3 Analyse et compréhension

La participation est une méthode qui cumule les objectifs. La recherche participative en sciences sociales est nécessairement recherche et action [Wadsworth, 1998]. De la même manière, les simulations multi-agents participatives permettent à la fois d'explorer et de modéliser des comportements collectifs (objectif de compréhension) et de les reproduire (objectif d'ingénierie).

L'objectif de compréhension des phénomènes collectifs relève de la tradition des recherches en intelligence artificielle distribuée. Les simulations multi-agents sont en effet conçues pour étudier des comportements collectifs par l'agrégation de comportements individuels [Bousquet *et al.*, 2003]. Héritières de cette tradition, les simulations multi-agents participatives reprennent et font leur cet objectif de compréhension qui est indissociable de l'objectif d'ingénierie, de la même manière que les méthodes participatives en sciences sociales rendent la recherche indissociable de l'action.

1.1.4 Communautés mixtes

Parce que des humains sont insérés dans des systèmes multi-agents, les simulations multi-agents participatives sont des simulations hybrides. L'objectif de compréhension s'applique autant aux relations sociales sans la médiation de l'ordinateur qu'aux communautés mixtes, et l'objectif de conception de systèmes multi-agents s'applique aussi bien aux systèmes purement logiciels qu'à la conception d'agents artificiels pour interagir avec des humains au sein de systèmes hybrides.

Les recherches sur la conception d'agents artificiels pour les communautés mixtes passent d'abord par des études sur le traitement automatique du langage [Chicoisne, 2002], domaine à part entière. L'utilisation des simulations multi-agents participatives permet, plus modestement, de se concentrer sur l'exploration, la modélisation et la reproduction de comportements collectifs. Il est en effet nécessaire que les compor-

tements des agents correspondent aux attentes des utilisateurs [Sabah *et al.*, 1997; Chaignaud *et al.*, 2003]. J'espère que des expériences de simulations multi-agents participatives telles que celles menées depuis 2003, permettront de mettre en place des communautés mixtes dans lesquelles émergeront des comportements collectifs hybrides.

1.2 Que sont les simulations multi-agents participatives ?

1.2.1 Définition

Depuis 2003, ce que j'entends par "simulations multi-agents participatives" a évolué avant de prendre la forme décrite ici.

Ce sont des expériences menées en laboratoires ou à travers le réseau Internet, avec des participants humains et qui s'inscrivent dans une démarche multi-agents.

Ces simulations sont caractérisées par deux propriétés :

- les agents (logiciels) dans ces simulations participent à la simulation comme les humains et ne sont pas des entités qui fournissent des services.
- les participants (humains) accèdent à la simulation exactement comme le font ou le feraient des agents. En d'autres termes, chaque participant est assis à un poste de travail, et toutes les interactions, conçues comme des interactions entre agents, se font par le biais de l'ordinateur.

Les trois composantes de l'expression "simulations multi-agents participatives" sont essentielles et décrivent la spécificité de ce type d'expériences.

Le terme de "simulations" décrit le rapport de ces expériences avec la réalité. Les simulations multi-agents participatives ne sont pas seulement des systèmes multi-agents participatifs. Elles sont conçues pour explorer, modéliser et reproduire des phénomènes réels en les simulant. Elles conservent une distance avec la réalité.

Le terme "multi-agents" est central dans cette expression. Les simulations multi-agents participatives constituent un type très spécifique et particulier de simulations participatives. Ce sont des expériences informatiques, conçues par des chercheurs

en informatique avec, en premier lieu, des objectifs informatiques. Contrairement à d'autres expériences participatives en informatique, les simulations multi-agents participatives entretiennent un lien fort avec le domaine des agents : elles s'inscrivent dans la tradition des simulations multi-agents. Chaque participant associé à l'agent qu'il contrôle peut constituer un agent au sens informatique, avec toutes les propriétés désirées des agents dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée : un tel agent est intelligent, autonome, pro-actif, guidé par des buts, etc. Les simulations multi-agents participatives constituent un cadre idéal pour explorer, modéliser et reproduire des comportements collectifs sous la forme de simulations et de systèmes multi-agents.

Enfin, le qualificatif "participatif" rattache les simulations multi-agents participatives au domaine de la conception participative. Il souligne également que cette participation est prise dans toute sa dimension : ce qualificatif fait écho à la recherche action participative [Wadsworth, 1998]. La participation ne se fait pas en sens unique et les simulations multi-agents participatives prennent en compte l'impact qu'elles ont sur les participants. Ce ne sont pas des expériences qui utilisent les participants, mais elles se font avec eux.

1.2.2 Résolution collective de problèmes

Les simulations multi-agents participatives sont conçues pour explorer, modéliser et reproduire des comportements collectifs afin de construire des systèmes multi-agents capables de résoudre des problèmes de manière collective.

Par l'expression "résolution collective de problèmes", j'entends l'ensemble des tâches effectuées par les systèmes multi-agents et pour lesquelles ils sont conçus. Il y a eu un débat entre la notion de système multi-agents développée par Jacques Ferber, pour qui ces systèmes, quels que soient les objectifs pour lesquels ils ont été conçus, peuvent être analysés comme des systèmes de résolution de problèmes [Ferber, 1995], et la thèse défendue par Jaime Sichman, Yves Demazeau et Olivier Boissier, selon laquelle il ne faut pas confondre les systèmes distribués de résolution de problèmes et les systèmes constitués d'agents autonomes qui ont leurs propres buts [Sichman *et al.*,

1992]. En utilisant le terme de résolution collective de problèmes pour décrire l'ensemble des objectifs des systèmes multi-agents, je peux à première vue sembler me placer du côté de Jacques Ferber dans ce débat. En réalité, les simulations multi-agents participatives permettent de construire des systèmes multi-agents capables d'effectuer des tâches et de résoudre collectivement des problèmes aussi complexes que les tâches effectuées et les problèmes résolus par les communautés humaines. Ces systèmes sont, comme les groupes sociaux, composés d'agents qui sont autonomes et qui ont leur propres buts.

Pour deux raisons, j'utilise le terme de résolution "collective" (plutôt que "distribuée") de problèmes pour décrire l'objectif des systèmes multi-agents. La première raison est qu'elle souligne la primauté du problème à résoudre, ou de la tâche à effectuer, sur le système multi-agents. Dans le cadre de la résolution d'un problème, il n'est pas question de construire un système multi-agents pour le système lui-même, et de voir ensuite comment ce système peut résoudre des problèmes éventuels. La seconde raison est que cette expression permet d'insister sur l'aspect collectif de la solution apportée au problème. La résolution n'est pas uniquement distribuée entre plusieurs sous-unités, elle émerge de l'ensemble des stratégies individuelles.

Il me faut néanmoins insister sur le fait que les "problèmes" qui peuvent être résolus par les systèmes multi-agents sont très divers, et l'emploi d'une expression unique ne doit pas laisser croire que les simulations multi-agents participatives ne s'intéressent qu'à un seul type de problèmes.

I.3 Organisation de la thèse

Après cette introduction, le chapitre 2 place les simulations multi-agents participatives dans le domaine des agents, et présente les notions d'agents, de systèmes et de simulations multi-agents, ainsi que les problèmes posés par les systèmes hybrides.

La conception de systèmes multi-agents pour la résolution collective de problèmes s'appuie sur des modèles a priori. Les modèles utilisés sont souvent inspirés et dérivés d'observations de comportements sociaux. Le chapitre 3 montre comment les simula-

tions multi-agents participatives permettent de valider ces modèles de comportements sociaux.

Les stratégies individuelles ne sont pas toujours suffisamment explicitées dans les modèles a priori. Le chapitre 4 présente une méthode, l'utilisation de simulations multi-agents participatives avec des agents assistants, pour aider les participants à expliciter leurs stratégies individuelles. Cette méthode permet de compléter le modèle initial afin de construire un système multi-agents.

Les modèles a priori sont parfois dérivés des formalisations de l'économie. Le chapitre 5 montre qu'il n'est pas possible de s'appuyer sur les méthodes de l'économie expérimentale pour modéliser les comportements collectifs qui ne reposent pas sur des institutions économiques. Les expériences menées pour tester cette hypothèse ont néanmoins permis de remettre en cause certains mécanismes de négociation dans les systèmes multi-agents. Elles confirment l'apport des simulations multi-agents participatives pour concevoir des systèmes multi-agents.

Le chapitre 6 présente une technique d'apprentissage pour modéliser automatiquement des éléments des stratégies individuelles, à partir des enregistrements des expériences de simulations multi-agents participatives. À partir des résultats obtenus, j'énumère les propriétés nécessaires d'une modélisation informatique des interactions entre participants.

Le chapitre 7 explique, à partir d'une analyse de l'émergence et d'un exemple, pourquoi les simulations multi-agents participatives permettent de faire émerger des comportements collectifs plus efficaces pour résoudre le problème posé que le modèle a priori.

La conclusion place l'ensemble des résultats présentés dans une perspective plus large, en décrivant les simulations multi-agents participatives comme un outil permettant d'une part d'étudier des comportements collectifs pour eux-mêmes, dans le cadre des sciences sociales, et d'autre part de créer des systèmes hybrides où humains et agents effectuent certaines tâches ou résolvent des problèmes en collaboration.

I.4 Avertissements

L'année des références donnée dans le corps du texte est celle de la première publication, en langue originale, mais les mentions de pages et les citations se rapportent à l'édition mentionnée en bibliographie.

Les notions propres aux communautés scientifiques auxquelles j'appartiens ou dont je suis proche, sont définies au moment de leur premier emploi. J'ai essayé d'éviter les termes du jargon informatique qui sont transposés directement de l'anglais et qui n'existent pas en français.

Il m'est cependant difficile d'éviter le terme d'implémentation, utilisé par la quasi-totalité des chercheurs et des ingénieurs en informatique, même s'il ne se trouve pas dans le dictionnaire. L'implémentation, mot directement importé de l'anglais informatique, signifie la transcription sous forme de code informatique afin de produire un programme ou une partie d'un programme. Des variantes ont été proposées, comme "implantation", mais elles font généralement référence à d'autres notions et n'ont pas eu le succès de termes comme "courriel" ou "butineur".

2 Cadre des simulations multi-agents participatives : agents et systèmes hybrides

Les simulations multi-agents participatives s'inscrivent dans le domaine des agents et les agents y sont présents à plus d'un titre. Elles s'inspirent de méthodes développées par la communauté des chercheurs qui travaillent sur les agents, et plus spécifiquement sur les simulations multi-agents. Elles utilisent les agents, et en particulier les systèmes multi-agents, comme forme pour explorer, modéliser et reproduire les comportements collectifs. Elles visent à construire des systèmes multi-agents capables de résoudre des problèmes en s'inspirant des méthodes de résolution mobilisées par les groupes sociaux. Enfin, elles sont des systèmes hybrides qui font interagir humains et agents.

Ce chapitre place les simulations multi-agents participatives dans la perspective des recherches dans le domaine des agents. La première partie présente les notions d'agents, de systèmes et de simulations multi-agents. La seconde partie montre que la notion d'agent pose problème pour les chercheurs en informatique. Les simulations multi-agents participatives sont une réponse à ce problème et constituent des systèmes multi-agents idéaux. Enfin la troisième partie mentionne deux problèmes posés par la construction de systèmes hybrides et place les simulations multi-agents participatives dans la perspective des communautés mixtes.

2.1 Agents et systèmes multi-agents

2.1.1 Définitions d'agent

La notion d'agent dans la recherche en intelligence artificielle est fréquemment critiquée pour son manque de précision. Michael Wooldridge et Nick Jennings attribuent à Carl Hewitt le parallèle entre le malaise créé par l'absence de définition unique et précise du terme "intelligence" au sein de la communauté des chercheurs en intelligence artificielle, et celui créé par l'absence de définition unique et précise du terme "agent" au sein de la communauté agent [Wooldridge et Jennings, 1995]. Les nombreuses définitions [Ferber, 1995; Wooldridge et Jennings, 1995; Russell et Norvig, 2005, p. 32; Odell, 2002; Cardon, 2005, §1.1.1], parfois contradictoires, ne constituent pas des écoles au sein de la communauté, comme si la précision de la notion n'était pas nécessaire à son usage, exactement comme la précision de la notion d'intelligence n'est pas nécessaire aux chercheurs en intelligence artificielle. Je n'ai pas la prétention de proposer ici une définition qui serait plus précise et plus efficace, et une notion un peu vague parce que très large semble ici suffisante.

Le point commun à toutes les définitions est que l'agent est une entité qui agit. Cette proposition n'est pas tautologique et a deux conséquences sur lesquelles s'accorde toute la communauté agent. En tant qu'entité, l'agent est distinct d'autres agents et du reste, le reste étant appelé l'environnement [Weyns *et al.*, 2005, 2006]. Parce qu'il agit, l'agent est doué d'une certaine forme d'autonomie et guide éventuellement son action en fonction de buts fixes.

2.1.2 Agents réactifs et agents cognitifs

On oppose classiquement deux catégories d'agents, les agents cognitifs et les agents réactifs. Cette distinction est clairement liée à l'état de la technique et en particulier à la puissance de calcul lorsque sont apparus les "systèmes multi-agents", des ensembles composés d'un nombre parfois conséquent d'agents. Au début des années 1990, certains agents, dits cognitifs, étaient si compliqués qu'il était techniquement

difficile de faire des systèmes avec un grand nombre d'entre eux. Les systèmes multi-agents d'alors étaient par nécessité plutôt composés d'agents très simples dits réactifs. Ces systèmes se sont révélés étonnamment efficaces, permettant de montrer comme le fit Brooks en robotique que des modèles très simples pouvaient mieux résoudre certains problèmes que d'autres fondés sur des notions aussi complexes que la cognition [Brooks, 1986].

Aujourd'hui, la puissance de calcul est telle que la distinction perd un peu de son sens. Il est possible de concevoir des systèmes multi-agents avec un grand nombre d'agents très complexes. Ces nouveaux moyens permettent à Nigel Gilbert et son équipe d'espérer créer des sociétés artificielles d'agents au sein desquelles émergeraient une culture artificielle [Gilbert *et al.*, 2005].

2.1.3 Anthropomorphisme des agents

Le projet NewTies de Nigel Gilbert montre que la reproduction d'attributs des sociétés humaines et l'émergence de propriétés spécifiques à ces sociétés constituent un des objectifs de la conception de systèmes multi-agents.

Cet anthropomorphisme prométhéen se retrouve aux origines de l'intelligence artificielle. Lorsque cette discipline a été fondée par Allen Newell, Herbert Simon, Marvin Minsky et John McCarthy, la reproduction de l'intelligence humaine constituait un horizon sinon un objectif à atteindre [Newell et Simon, 1956]. Les modes de raisonnement humains ont représenté et continuent de représenter une source d'inspiration pour la création de systèmes informatiques capables de résoudre des problèmes similaires à ceux résolus par l'intelligence humaine.

De la même manière, les comportements collectifs humains et animaux représentent une source d'inspiration pour résoudre des problèmes de manière collective, à l'aide de systèmes multi-agents. Une large part des recherches actuelles sur les systèmes multi-agents tente de modéliser et de reproduire des propriétés de sociétés et d'interactions humaines afin de résoudre des problèmes. C'est ce que font les chercheurs qui importent les notions de confiance, de réputation ou de pouvoir au sein

des systèmes multi-agents [Sierra et Debenham, 2005; Casare et Sichman, 2005; Castelfranchi, 1990]. D'autres cherchent à modéliser les interactions entre agents pour qu'elles correspondent plus à ce que font les humains. Par exemple, avec l'écoute flottante, Éric Platon essaie de concevoir des agents capables d'écouter aux portes [Platon *et al.*, 2005]. Les concepts anthropomorphiques mis en œuvre permettent à des auteurs d'intituler ainsi une communication dans un congrès : "Réputation certifiée : comment un agent peut faire confiance à un étranger" [Huynh *et al.*, 2006].

L'aspect anthropomorphique des agents informatiques contribue, avec l'usage d'un terme partagé, à les rapprocher des agents d'autres disciplines, et en particulier de l'économie. Dans la littérature, les économistes parlent d'agents économiques [Folley, 2002]. Le parallèle est d'autant plus aisé que certains économistes font appel aux techniques de l'intelligence artificielle distribuée pour modéliser les comportements collectifs de leurs agents afin de tester des théories, de la même manière que les chercheurs en intelligence artificielle tentent de reproduire des comportements collectifs afin de résoudre des problèmes.

2.1.4 Systèmes multi-agents et simulations multi-agents

Même si les deux termes sont souvent utilisés de manière interchangeable dans la communauté agent, j'ai pris le parti ici de distinguer les "systèmes" multi-agents et les "simulations" multi-agents. Un système multi-agents est un ensemble d'agents conçu pour résoudre un problème particulier de manière collective. Une simulation multi-agents désigne un système d'abord conçu à des fins de simulation, ou plus fréquemment, la simulation elle-même. Les simulations multi-agents ne cherchent pas à résoudre des problèmes mais s'intéressent à des phénomènes réels. Par exemple, la thèse de Diane Vanbergue décrit une simulation multi-agents conçue pour représenter et étudier les migrations intra-urbaines de la ville de Bogota [Vanbergue, 2003]. De la même manière, les économistes qui utilisent les techniques multi-agents font des simulations multi-agents.

Les simulations multi-agents forment aujourd'hui un domaine à part entière avec un

colloque (*workshop*) annuel ou bisannuel aux conférences ICMAS (*International Conference on Multi-Agent Systems*) puis AAMAS (*Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*), appelé originellement *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulations* en 1998 puis, plus simplement, *Multi-Agent Based Simulations* [Sichman *et al.*, 1998; Moss et Davidsson, 2001; Sichman *et al.*, 2003; Hales *et al.*, 2003; Davidsson *et al.*, 2005; Sichman et Antunes, 2006].

Les expériences de simulations multi-agents participatives que j'ai menées illustrent aussi la distinction entre systèmes et simulations multi-agents. Elles sont qualifiées de "simulations multi-agents" parce que menées en laboratoire sans avoir pour but de résoudre un problème donné mais pour explorer et modéliser des comportements collectifs (chapitre 3). Ces expériences permettent de construire des systèmes multi-agents plus efficaces, c'est-à-dire capable de résoudre un problème de manière plus efficace (chapitre 7).

2.2 Problème posé par la notion d'agent

2.2.1 Phase d'observation

Le recours aux simulations multi-agents participatives est une réponse à un problème posé par la notion d'agent. En plus du malaise relevé par Carl Hewitt, dû à l'absence de consensus, cette notion pose un problème aux chercheurs en intelligence artificielle parce qu'ils programment leurs agents. Le concepteur de l'entité logicielle qu'est un agent, a du mal à trouver sa création autonome, pro-active ou guidée par un but parce qu'il a lui-même écrit le code déterministe et inerte qui régit les actions de l'agents. Il semble y avoir une coupure entre la notion d'agent dans la littérature et la réalité de la chose [Drogoul *et al.*, 2002].

Le problème est encore plus criant lorsqu'il s'agit d'un agent réactif, très simple, dont le fonctionnement peut être résumé par un diagramme. Par exemple, la figure 2.1 représente quatre étapes de l'évolution d'un système multi-agents. Le comportement des agents "termites" qui constituent ce système peut être résumé par la figure 2.2.

2. CADRE DES SIMULATIONS MULTI-AGENTS PARTICIPATIVES

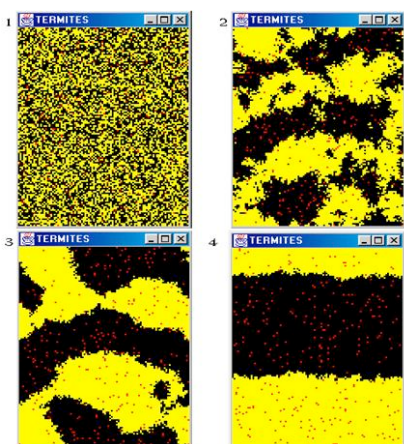


FIG. 2.1: 4 étapes du rassemblement des jetons par les agents "termites"

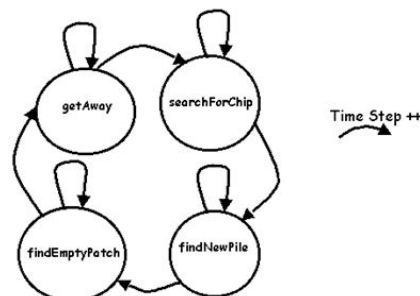


FIG. 2.2: Automate représentant le fonctionnement d'un agent "termite"

Dans un environnement toroïdal donné avec des jetons répartis aléatoirement, une population de tels agents rassemble tous les jetons en un seul tas (figure 2.1).

La coupure entre, d'une part, le fonctionnement déterministe parfois très simple des agents et, d'autre part, ce qu'ils représentent pour les chercheurs qui tentent de les doter de relations de confiance ou de réputation, se retrouve classiquement à chaque fois que des chercheurs ont recours aux simulations informatiques. Deborah Dowling explique que le processus de simulation d'un phénomène par ordinateur suppose deux phases distinctes [Dowling, 1999]. La première phase consiste en la nécessaire mise en place des détails de la simulation, en codant les comportements individuels. La seconde phase, dite phase d'observation, consiste à faire abstraction des détails internes de la simulation, en considérant la simulation comme une boîte noire.

Lorsqu'Alexis Drogoul, Thomas Meurisse et Diane Vanbergue se demandent légitimement "Où sont les agents?", ils regardent les détails internes, tels le diagramme représenté figure 2.2, et ils n'y voient ni l'autonomie, ni la pro-activité des agents qu'ils ont codés [Drogoul *et al.*, 2002]. Ces propriétés ne sont visibles que lors de la phase "boîte noire" de la simulation. Ces propriétés, malgré l'anthropomorphisme de la notion d'agent, appartiennent exclusivement à la réalité qu'il s'agit de reproduire ou de mimer. Parce qu'ils en sont les concepteurs, les informaticiens s'intéressent d'abord aux

mécanismes et aux rouages des systèmes multi-agents, et non pas à l'interprétation qu'il est possible de faire de leur évolution lorsqu'on les observe en faisant abstraction des détails internes.

En d'autres termes, les agents donnent l'illusion d'agir tant qu'il est fait abstraction des mécanismes déterministes qui les meuvent.

2.2.2 La simulation multi-agents participative comme système multi-agents idéal

Les simulations multi-agents participatives sont une réaction à ce problème posé par la notion d'agent. Les agents des simulations multi-agents participatives qui sont contrôlés par des humains possèdent toutes les propriétés désirées des agents. Il n'y a aucune illusion puisque la réalité qu'il s'agit d'explorer, de modéliser ou de reproduire, est invitée dans le système.

En plaçant les joueurs au cœur de systèmes multi-agents, je ne restreins que leur mode de communication. Les interactions prennent la forme des interactions entre agents logiciels. Lorsque le canal de communication est suffisamment large, les agents que les joueurs contrôlent via l'interface graphique des différentes applications sont capables de s'adapter aux problèmes posés, et d'élaborer des stratégies collectives pour les résoudre (cf. chapitre 5).

Bien sûr, les agents qui reproduisent les comportements observés en laboratoire lors des expériences de simulations multi-agents participatives sont évidemment déterministes. Mais en effectuant des expériences avec des humains, le caractère illusoire de l'idée qu'il est possible de reproduire à l'identique l'intelligence sociale à l'œuvre lors des expériences, est d'autant plus criant. Cette méthode ne vise pas à reproduire toute l'intelligence sociale : les systèmes qui peuvent être conçus à l'aide des simulations multi-agents participatives se contentent de reproduire certains mécanismes observés, en les simplifiant pour les adapter aux problèmes posés. Le système multi-agents que j'ai créé à partir des expériences de simulations multi-agents participatives SimCafé, ne reproduit qu'une toute petite part des comportements des joueurs, mais cette part se révèle plus efficace que le modèle initial pour résoudre le problème donné (cf. cha-

pitre 7). La raison pour laquelle les simulations multi-agents participatives constituent un outil efficace, est qu'il n'est pas envisageable de reproduire la totalité des facultés des participants ; il s'agit de les confronter à un problème donné, pour observer les comportements sociaux mobilisés pour le résoudre, afin d'en reproduire des éléments.

En d'autres termes, parce que les simulations multi-agents participatives sont des systèmes multi-agents idéaux (avec des humains pro-actifs, autonomes, intelligents, etc.), elles sont capables de résoudre des problèmes complexes et il est possible d'imiter les capacités de résolutions mobilisées.

2.3 Les systèmes hybrides

2.3.1 Agents et humains

La notion de systèmes multi-agents est parfois utilisée pour décrire des systèmes qui ne font pas appel à des agents logiciels, comme dans le cadre du travail collaboratif. C'est ce qu'avancent Alex Kosorukoff et Carl Hewitt quand ils décrivent Wikipedia comme un exemple de système multi-agents dans l'article "Multi-agent system" de cette encyclopédie collaborative¹.

Les simulations multi-agents participatives constituent des systèmes hybrides dans lesquels agents et humains interagissent. L'existence de systèmes hybrides illustre l'idée qu'il n'y a plus de frontière nette entre "réel" et "virtuel", mais qu'il s'agit de deux pôles d'un continuum au sein duquel figurent les systèmes hybrides et les communautés mixtes. Comme Yves Demazeau le fait remarquer, les communautés en ligne sont déjà le lieu de rencontre entre agents logiciels et humains [Demazeau, 2000]. Il cite l'exemple des forums de discussion. Plus généralement sur Internet, les robots interagissent avec les humains, et les utilisateurs se trompent parfois en les prenant pour des humains. Pour preuve, des administrateurs système s'amuse à collection-

¹"Wikipedia as a Multi-Agent System", http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system. En fait, Wikipedia rassemble utilisateurs et robots (agents logiciels), mais le rôle des robots est extrêmement limité en réalité ainsi que dans la description qui en est faite dans cet article.

ner les réponses faites par les utilisateurs aux messages générés automatiquement, en particulier aux messages indiquant que les courriers électroniques ne peuvent pas être transmis².

D'ailleurs, le système composé de l'ensemble des programmes qui gèrent le courrier électronique sur Internet peut être assimilé à un système multi-agents participatif. Le terme d'agent est même utilisé pour décrire les programmes en jeu dans l'édition et dans la distribution du courrier électronique. Plus spécifiquement, l'expression "agent utilisateur de courrier" (*Mail User Agent* ou *MUA*) désigne les logiciels placés du côté de l'utilisateur comme Thunderbird, Eudora ou Mail, et "agent de distribution du courrier" (*Mail Delivery Agent* ou *MDA*) désigne les logiciels de serveurs de courrier comme postfix, sendmail ou procmail. Ce système résout un problème simple, la distribution de courrier de point à point. Contrairement à une idée répandue, les courriers électroniques suivent toujours le même chemin déterminé à l'avance. Le protocole SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) permet de définir des routes secondaires, mais il n'y a quasiment aucune adaptation [Postel, 1982]. De plus, la quantité grossissante de courrier non désiré, qui représenterait environ 80% de la totalité du trafic [Kim, 2006], montre que ce système est très peu adaptatif en ce qui concerne le problème posé. Aujourd'hui, la distribution du courrier est relativement secondaire par rapport à la lutte contre le courrier indésirable. En d'autres termes, les protocoles actuels de distribution de courrier permettent de résoudre des problèmes locaux, comme des pannes réseau temporaires ou des problèmes de surcharge des serveurs, mais ne permettent pas de s'adapter ni de profiter des comportements humains.

2.3.2 Tolérance et collaboration dans les systèmes hybrides

Un des problèmes posés par les systèmes hybrides est la tolérance entre les humains et les agents [Demazeau, 2000]. L'exemple de la distribution de courrier sur le réseau Internet révèle l'enjeu de ce problème. Certes, ce système de distribution peut être considéré comme un système hybride. Mais il est très inefficace, et les humains

²Voir par exemple <http://www.jedi.com/obiwan/dearmd.html>

sont relégués au rôle d'utilisateurs du système ; ils ne peuvent pas agir directement sur lui, et en particulier ils ne peuvent pas redéfinir le problème traité, ni modifier l'organisation du système. Les utilisateurs n'ont strictement aucune prise sur le système ni sur les agents de distribution de courrier. Leur autonomie est même directement limitée, par exemple au sens où les agents qu'ils contrôlent ne leur permettent pas de s'échanger des courriers électroniques directement entre eux.

Le problème de la tolérance réciproque des agents et des humains, et celui de la collaboration entre eux, se posent dès qu'il s'agit de créer des systèmes hybrides où les utilisateurs ont la possibilité d'exhiber toutes les propriétés désirables des agents : pro-activité, autonomie et adaptation. Les simulations multi-agents participatives, en permettant d'explorer, de modéliser et de reproduire les comportements collectifs des humains, ont pour horizon de créer des agents tolérés par les joueurs et capables de collaborer avec eux, sans restreindre les capacités des humains au sein du système.

2.4 Conclusion

Les recherches dans le domaine des systèmes multi-agents reposent en grande partie sur la reproduction des mécanismes sociaux pour résoudre des problèmes de manière collective. Les concepteurs des agents et des systèmes multi-agents cherchent à les doter de qualités anthropomorphiques.

Cependant, les agents logiciels restent des programmes déterministes. Il est difficile pour les concepteurs de ces agents de faire abstraction de ce déterminisme afin de reproduire des relations sociales complexes comme la réputation ou la confiance. Pourtant, il est nécessaire de concevoir des agents reproduisant certains éléments des relations sociales, afin que des humains acceptent de collaborer avec eux au sein de systèmes hybrides.

Les simulations multi-agents participatives permettent de contourner le problème en plaçant des joueurs humains au cœur du système. Ces expériences sont comme des systèmes multi-agents idéaux et permettent de reproduire les comportements humains en laboratoire, dans le but de les intégrer à des systèmes multi-agents. La

reproduction des comportements humains repose sur la validation de modèles a priori de ces comportements.

3 Validation de modèles de résolution de problèmes

Les procédures de résolution collective de problèmes utilisées dans les systèmes multi-agents sont en majorité inspirées, de façon directe ou indirecte, de systèmes naturels ou sociaux.

Quand les systèmes multi-agents sont complètement indépendants et fermés, l'adéquation du modèle utilisé avec la réalité n'a strictement aucun impact sur l'efficacité du système multi-agents (par exemple, certains algorithmes de fourmis [Dorigo *et al.*, 1996] ou le protocole Contract Net [Smith, 1980]). Cependant, l'adéquation avec la réalité est nécessaire quand le système sert de support à une activité humaine collective, comme dans la gestion de rendez-vous par des agents assistants [Kozierok et Maes, 1993]. Les agents doivent adopter des comportements proches de ceux des humains pour que ceux-ci acceptent de collaborer avec eux. Une validation du modèle est nécessaire pour pouvoir discuter avec les experts du domaine. Comme je le montrerai au chapitre 7, les expériences qui ont pour but la validation permettent également de découvrir des protocoles de résolution de problèmes plus efficaces que les solutions informatiques inspirées de modèles a priori.

La question traitée dans ce chapitre est celle de la validation de modèles de comportements collectifs par des expériences de simulations multi-agents participatives, à la fois comme modèles représentatifs d'un phénomène social et comme modèles de résolution de problèmes. La méthode de validation consiste à reproduire, en laboratoire, la résolution collective de problèmes en donnant à des joueurs humains le contrôle

des agents d'un système multi-agents.

Ce chapitre s'ouvre sur une présentation de la modélisation de comportements collectifs à l'aide de simulations multi-agents, ce qui constitue une première méthode pour valider des modèles de comportements sociaux. La deuxième partie décrit l'approche MAS/RPG qui combine simulations multi-agents et jeux de rôles (Multi-Agent Systems/Role Playing Games), afin d'étudier les comportements collectifs et de vérifier leur adéquation avec les modèles. Dans la troisième partie, je propose une méthode de conception de simulations multi-agents participatives pour valider des modèles de comportements collectifs. Cette méthode est illustrée par les expériences SimCafé, qui ont été menées dans le but de valider un modèle des comportements collectifs adoptés pour résoudre un problème spécifique : la formation de coalitions par des producteurs de café pour satisfaire des offres d'achats.

3.1 Modélisation par des simulations multi-agents

Les simulations multi-agents sont des outils conçus pour étudier des phénomènes collectifs par la modélisation de comportements individuels. Les simulations multi-agents participatives représentent une extension des simulations multi-agents qui sont conçues pour modéliser et comprendre des procédures collectives de résolution de problèmes. C'est pourquoi les simulations multi-agents participatives héritent du cadre théorique des simulations multi-agents.

La thèse de Diane Vanbergue est une des études les plus récentes et les plus abouties du processus de conception de ces simulations [Vanbergue, 2003]. Ce processus y est représenté par un diagramme circulaire reproduit en figure 3.1.

Les simulations multi-agents sont conçues dans le cadre d'un référentiel théorique propre à une discipline ou à un domaine particulier. Par exemple, les simulations multi-agents conduites par David Servat pour modéliser les dynamiques de flux dans les processus de ruissellement, d'infiltration et d'érosion, s'inscrivaient dans le cadre de l'hydro-pédologie et ont été menées en coopération avec Édith Perrier, spécialiste de la modélisation hydro-pédologique [Servat, 2000; Perrier, 2002]. Comme d'autres

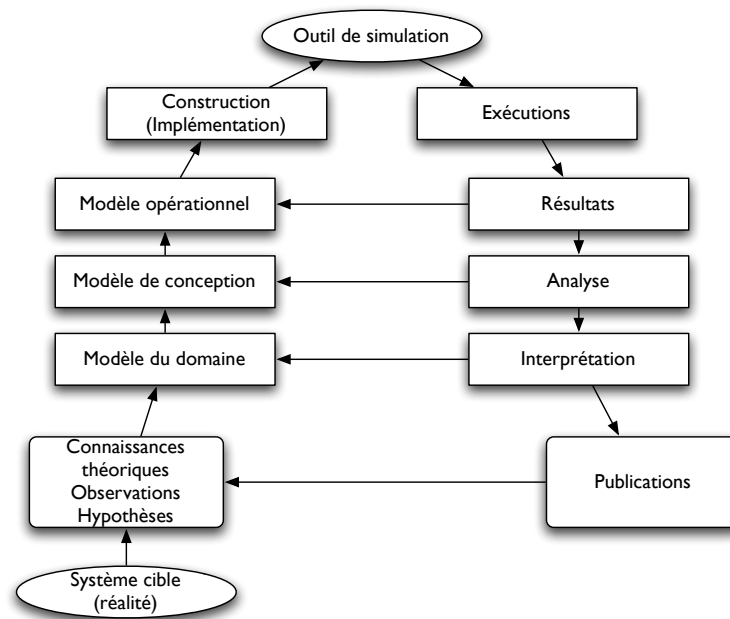


FIG. 3.1: Conception de simulations multi-agents (d'après Vanbergue [2003])

chercheurs en informatique qui s'intéressent aux simulations multi-agents, j'appelle "domaine" le domaine ou la discipline dans lesquels s'inscrivent les simulations, et "experts du domaine" les spécialistes de ce domaine, tels Édith Perrier.

3.1.1 Trois modèles, trois rôles

Le processus tel qu'il est décrit par Diane Vanbergue consiste à construire un "modèle du domaine" à partir des théories, hypothèses et observations propres au domaine. Ce modèle est élaboré par l'expert du domaine utilisant les termes et les formulations de sa discipline. Pour construire la simulation, il est nécessaire de transformer le modèle en un "modèle opérationnel" qui décrit comment doit se faire l'implémentation.

Idéalement, le modèle opérationnel est une spécification tellement précise que tous les outils de simulation possibles qui le respectent conduisent aux mêmes résultats. Un certain nombre de paramètres qui ne font naturellement pas partie des préoccupations de l'expert du domaine peuvent avoir un impact sur l'évolution d'une

simulation. Par exemple, la façon dont est conçu l'échéancier, c'est-à-dire l'ordre dans lequel les agents agissent, influe directement sur le résultat de la simulation [Meurisse et Vanbergue, 2001; Meurisse, 2001].

La distance qui sépare le modèle du domaine du modèle opérationnel conduit Diane Vanbergue à postuler l'existence d'un modèle intermédiaire dit "modèle de conception". Ce dernier modèle est plus formel que le modèle du domaine et un certain nombre de propriétés de la simulation y sont explicitées, comme le choix des unités. Il doit aussi préciser des paramètres qui peuvent influencer sur l'évolution de la simulation, comme l'ordre dans lequel les agents agissent. Les entités du modèle de conception peuvent être différentes des entités du modèle du domaine. Par exemple, dans le système RIVAGE, l'eau est représentée par des boules, entités intermédiaires sans réalité en hydro-pédologie [Treuil *et al.*, 1997].

Aux trois modèles correspondent trois rôles : le rôle de l'expert du domaine (Diane Vanbergue écrit *thématicien*), le rôle du *modélisateur* et le rôle de l'informaticien; chacun construit un modèle de la simulation. Cette décomposition est très théorique : en réalité, il n'y a jamais trois acteurs. Le rôle du modélisateur peut être complètement éludé si l'expert du domaine possède suffisamment de connaissances en programmation et si l'informaticien connaît suffisamment le domaine [Coquillard et Hill, 1997]. De fait, le modèle de conception est l'objet de la négociation entre l'informaticien et l'expert du domaine, et constitue une représentation commune du phénomène. Le rôle du modélisateur représente cet important travail de coordination.

3.1.2 Optimisation de la boucle de conception

Le processus de conception de simulations multi-agents est représenté comme itératif. La nature cyclique de ces représentations trahit une certaine parenté avec la taxonomie des simulations informatiques de Paul Fishwick (représentée figure 3.2). Paul Fishwick décrit cette figure avec la légende suivante :

La simulation informatique est la discipline qui consiste à concevoir un modèle d'un système physique réel ou théorique, à faire tourner le modèle

sur un ordinateur et à analyser le résultat. [Fishwick, 1994, TdA]¹

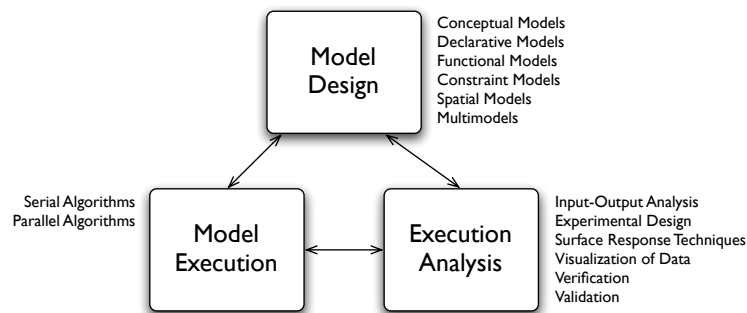


FIG. 3.2: Taxonomie des simulations (d'après Fishwick [1994])

Cette phrase décrit trois étapes successives mais ne mentionne pas le lien entre l'analyse de la simulation et la conception du modèle. De plus, les relations entre les étapes sont présentées comme chronologiques et unidirectionnelles. Pourtant, la figure de Paul Fishwick est composée de trois rectangles, représentant les étapes, reliés par des flèches bi-directionnelles et disposés en triangle (figure 3.2). Et dans un article plus récent, l'auteur reproduit le même schéma et définit la simulation comme un processus itératif associant ces trois étapes de la simulation, qu'il appelle sous-domaines de l'étude des simulations informatiques [Fishwick, 1998].

Le cycle joue le même rôle dans le domaine des simulations que la sphère chez les platoniciens. C'est l'équivalent d'un cercle vertueux, une représentation du travail de conception comme un processus infini qui vise la perfection en fournissant un meilleur résultat à chaque itération. C'est pour cette raison que quasiment tous les processus de conception sont cycliques.

Diane Vanbergue décrit la conception de simulations multi-agents (figure 3.1) à l'aide de cycles imbriqués. Les différentes flèches horizontales, de droite à gauche, représentent les retours en arrière lorsque le système n'est pas satisfaisant. Par exemple, la flèche entre les étapes "Exécutions" et "Construction (Implémentation)" représente

¹"Computer simulation is the discipline of designing a model of an actual or theoretical physical system, executing the model on a digital computer, and analyzing the execution output."

le *déverminage*, c'est-à-dire la correction des erreurs dans le code lui-même. Il faut passer par ce cycle pour atteindre l'étape "Résultats". Les résultats peuvent être suffisamment éloignés de ce qui était attendu pour qu'il faille amender le modèle opérationnel. À chaque étape, la vérification et la validation peuvent conduire à une remise en cause des modèles. En d'autres termes, le travail est présenté comme particulièrement long avant d'atteindre l'étape "Publications".

Avec ses nombreux cycles, le processus de conception de simulations multi-agents est présenté comme laborieux et relativement lent. Dans cette représentation de la conception des simulations multi-agents, le système cible est l'élément le plus éloigné de l'outil de simulation. Il est relativement naturel, surtout pour l'informatique dont la culture est marquée par l'optimisation de boucles, de chercher à rapprocher l'outil du système cible. C'est ce rapprochement qui est traduit par l'expression "simulations multi-agents *participatives*". C'est aussi ce que propose l'approche MAS/RPG (*Multi-Agent Systems/Role-Playing Games*).

3.2 L'approche MAS/RPG

L'approche MAS/RPG (*Multi-Agent Systems/Role-Playing Games*) est définie par Olivier Barreteau comme la méthode consistant à coupler jeux de rôles et simulations multi-agents [Barreteau, 1998; Barreteau et Bousquet, 1999]². Cette méthode est aussi appelée GMABS (*Games and Multi-Agent Based Simulations*) [Adamatti et al., 2005]. Les simulations multi-agents participatives, correspondant à une fusion des simulations multi-agents et des jeux de rôles, peuvent être analysées comme une évolution de la méthode MAS/RPG. En d'autres termes, les simulations multi-agents participatives sont dans la lignée des méthodes de conception de simulations, qui part des simulations

²Le terme de systèmes multi-agents (*Multi-Agent System*) est souvent utilisé pour faire référence indifféremment aux systèmes multi-agents et aux simulations multi-agents (*Multi-Agent Based Simulation* ou encore *Agent-Based Simulation*). C'est le cas dans les différents articles qui définissent l'approche MAS/RPG : Olivier Barreteau fait référence à ce que les spécialistes des agents appellent des simulations multi-agents [Barreteau et al., 2001, §2.1].

multi-agents et inclut l'approche MAS/RPG.

La méthode MAS/RPG permet, en faisant participer les acteurs à des jeux de rôles, de tester la validité et d'améliorer des modèles de comportements collectifs. Comme le processus de conception de simulations multi-agents décrit par Diane Vanbergue, cette méthode est un processus itératif (figure 3.3).

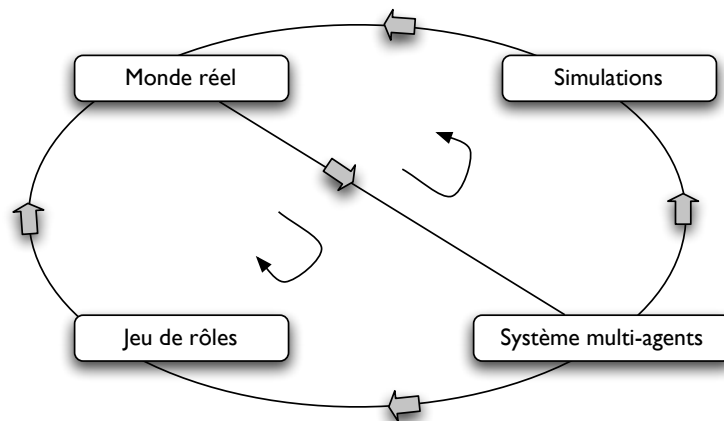


FIG. 3.3: Méthode MAS/RPG (d'après Barreteau *et al.* [2001])

Les représentations de la méthode MAS/RPG distinguent bien la simulation multi-agents du jeu de rôles qui sont deux processus séparés. Cette approche repose sur une analyse méthodologique de l'usage des jeux de rôles à des fins non ludiques.

3.2.1 Trois usages des jeux de rôles

En tant qu'outils, les jeux de rôles ont trois usages distincts : entraînement, observation et action.

L'entraînement est l'usage le plus répandu. Les jeux de rôles conçus pour l'entraînement sont des exercices avec des enjeux fictifs, qui ont pour objectif d'apprendre à mieux réagir dans certaines situations. Les séances suivent des scénarios incluant des éléments exceptionnels mais plausibles et se déroulent dans un environnement réel ou assez réaliste. Il s'agit par exemple d'exercices pour connaître et apprendre à composer avec les points faibles d'une organisation dans des situations de crise, comme dans les

3. VALIDATION DE MODÈLES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

simulations d'évacuations ou les simulations d'attaques terroristes [Toth, 1988].

Les jeux de rôles sont aussi utilisés à des fins d'observation du comportement des joueurs. Les jeux de ce type sont souvent conçus pour tester une hypothèse ou pour répondre à une question scientifique. Dans ces jeux, l'environnement n'est pas nécessairement réaliste. En revanche, il faut faire particulièrement attention aux motivations qui poussent les joueurs à participer afin d'éviter tout biais. C'est pourquoi les enjeux sont souvent réels. Par exemple, si le jeu est fondé sur une question économique, les joueurs peuvent vraiment gagner de l'argent en fonction de leur comportement dans le jeu. Ces jeux ne sont pas conçus pour être ludiques mais sont plutôt fondés sur l'idée que les joueurs se comportent dans le jeu comme dans la réalité et utilisent les mêmes stratégies. Ces expériences sont suivies de séances de verbalisation (*debriefing*) afin de mieux comprendre le comportement des joueurs [Lederman, 1992].

Le troisième usage des jeux de rôles est l'action au sens de la tradition de la recherche action participative (*participatory action research*) [Wadsworth, 1998]. Ces jeux de rôles cumulent l'apprentissage individuel et l'apprentissage collectif, et ils regroupent les joueurs autour d'un problème particulier. Parce qu'ils favorisent la discussion entre les joueurs, ces jeux peuvent être utilisés à des fins de discussion ou comme support à la négociation [Tsuchiya, 1998]. Les enjeux sont fictifs mais l'environnement est réaliste. Ce dernier est même parfois construit par les joueurs eux-mêmes comme première étape du jeu pour ouvrir la discussion [d'Aquino *et al.*, 2003]. Les rôles sont parfois échangés, permettant ainsi aux joueurs d'avoir une meilleure idée du point de vue des autres participants dans les situations réelles.

Ces trois usages sont difficiles à séparer, même si la méthode utilisée diffère suivant les objectifs. Par exemple, l'organisation de la séance de verbalisation dépend de l'enjeu de l'expérience pour les organisateurs [Peters *et al.*, 1998]. Les joueurs et les organisateurs peuvent avoir un point de vue différent sur l'intérêt d'un jeu ; les joueurs trouveront par exemple qu'un jeu permet d'apprendre des choses, tandis que les organisateurs s'intéresseront davantage à la possibilité d'observer les joueurs pendant le jeu.

Olivier Barreteau fait le parallèle entre ces trois usages des jeux de rôles et trois

usages des simulations multi-agents : l'exploration virtuelle d'un modèle à des fins pédagogiques (entraînement), la production et la validation de théories (observation), et l'aide à la décision (action) [Barreteau, 2003a]. Ces trois usages se retrouvent dans une typologie des simulations participatives qui sera présentée au chapitre 4. Les expériences SimCafé, qui ont été conduites pour valider un modèle de résolution de problèmes, correspondent au second usage, la production et à la validation de théories.

3.2.2 La méthode MAS/RPG

Simulation multi-agents et automate cellulaire

La première étape de la méthode MAS/RPG consiste à développer un système informatique qui simule un phénomène social. Ce système informatique prend généralement la forme d'un modèle Comas. Comas est une plate-forme de conception de simulations multi-agents, mise au point au CIRAD par François Bousquet, Christophe Le Page et Pierre Bommel qui en assurent la maintenance [Bousquet *et al.*, 1998]. Cette plate-forme gère un grand nombre d'aspects de la simulations multi-agents, comme la visualisation, l'enregistrement de traces, la génération de courbes, etc. Les modèles Comas peuvent inclure, outre des agents, un automate cellulaire permettant de simuler l'environnement dans lequel les agents évoluent et sur lequel les agents peuvent agir.

La méthode MAS/RPG est surtout utilisée dans la démarche ComMod. Il s'agit d'étudier des situations où l'environnement, ou une ressource naturelle, est un enjeu pour les acteurs. Par exemple, le modèle SylvoPast de Michel Étienne est une simulation du sylvopastoralisme dans la forêt méditerranéenne, c'est-à-dire le cumul, sur le même espace, des activités sylvicoles et pastorales [Etienne, 2003]. Dans ce type de simulations informatiques, l'automate cellulaire est dérivé d'un modèle de la dynamique de l'environnement ou de la ressource naturelle qui est en jeu (figure 3.4).

Le modèle de l'automate cellulaire est parfois tellement réaliste qu'il a été l'objet de publications en tant que tel dans le domaine concerné (écologie, agronomie,

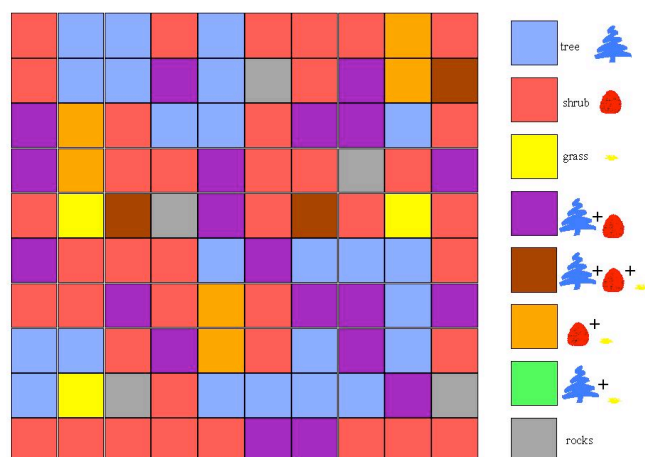


FIG. 3.4: Automate cellulaire de SylvoPast (version Excel) [Etienne, 2003]

etc.). Par exemple, la simulation multi-agents Mejan, élaborée par Michel Étienne et qui permet de simuler différents scénarios d'extension des pins sur le Causse Méjean, est fondée sur un modèle complexe de la dissémination des différentes espèces de pins des Cévennes (*Pinus halepensis*, *Pinus brutia*, *Pinus nigra*, *Pinus radiata* et *Pinus sylvestris*). Dans le but de valider ce modèle, Michel Étienne a construit un automate cellulaire qui a ensuite été directement utilisé dans la simulation Mejan [Etienne, 2001; Etienne *et al.*, 2003].

Transformation en un jeu de rôles

La seconde étape de la méthode MAS/RPG consiste à transformer la simulation multi-agents en un jeu de rôles où les joueurs tiennent le rôle des agents. Par exemple Mejan a été transformé en MejanJeu, et SylvoPast en SylvoPastJeu. Lorsque la simulation multi-agents repose sur un automate cellulaire, celui-ci est utilisé pour simuler l'évolution de l'environnement du jeu de rôles. Des auteurs comme François Bousquet ou Olivier Barreteau insistent sur les modifications à apporter à la simulation multi-agents pour en faire un jeu de rôles [Barreteau *et al.*, 2001]. En particulier, le nombre de joueurs du jeu de rôles est souvent inférieur au nombre d'agents de la simulation.

Les règles utilisées dans la simulation sont parfois trop complexes pour le jeu et sont simplifiées. Le dialogue avec les acteurs du domaine permet de choisir un nombre restreint de symboles jugés significatifs.

Aspects pratiques de la méthode MAS/RPG

En pratique, lorsque les chercheurs utilisent Cormas, l'un des organisateurs du jeu de rôles saisit les actions des joueurs sur l'ordinateur qui calcule l'effet de ces actions et l'évolution de l'automate cellulaire. Par exemple, dans les jeux ButorStar ou JogoMan, l'interface entre Cormas et les joueurs se fait sous la forme de fiches imprimées à chaque tour de jeu, sur lesquelles les joueurs peuvent indiquer ce qu'il souhaite faire [Mathevet *et al.*, 2005; Adamatti *et al.*, 2005]. Diane Adamatti représente ce processus par le schéma reproduit en figure 3.5.

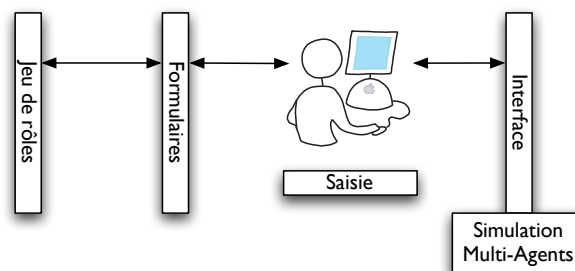


FIG. 3.5: Interaction entre l'environnement simulé par Cormas et le jeu de rôles (d'après Adamatti *et al.* [2005])

Accès à l'information

Plusieurs organisateurs de jeux de rôles avec lesquels j'ai eu l'occasion de collaborer insistent sur l'accès à l'information. C'est le cas de Raphaël Mathevet qui a créé le jeu ButorStar pour montrer le lien entre l'exploitation des roselières et la situation préoccupante d'une espèce d'oiseau en voie de disparition, le butor étoilé (*Botaurus stellaris*) [Mathevet *et al.*, 2005]. Dans ce jeu, l'environnement est divisé en une moitié exploitée par des acteurs du secteur public, et une moitié exploitée par des acteurs du

3. VALIDATION DE MODÈLES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

secteur privé. Les fiches imprimées fournies aux joueurs ne représentent que la moitié de l'environnement, celle qui est exploitée par leur secteur.

De la même manière, Michel Étienne et Christophe Le Page utilisent les “points de vue” de Cormas pour présenter des informations différentes aux joueurs en fonction de leur rôle³. Un point de vue est un mode d’affichage de l’automate cellulaire et des agents. Par exemple, le point de vue pour les forestiers dans SylvoPastJeu présente les informations spécifiques à la sylviculture. Un autre point de vue a été créé pour le naturaliste, qui s’intéresse aux tortues. Ce point de vue affiche les tortues qui sont menacées par le risque d’incendie de la forêt.

À l’inverse des joueurs, les organisateurs sont omniscients. Michel Étienne sait quels sont tous les points de vues disponibles puisqu’il les a créés. Il ne transmet l’information qu’à la demande des joueurs : il ne montre le risque d’incendie sur la zone d’habitat des tortues que si le naturaliste le lui demande. En ne donnant pas la liste des vues disponibles, Michel Étienne essaie de ne pas influencer les joueurs⁴. Il est également possible aux organisateurs de créer, pendant la partie, de nouveaux points de vue sur l’environnement si les joueurs en font la demande.

Le besoin de telles interactions entre les organisateurs et les joueurs laisse penser que les jeux peuvent difficilement se dérouler à distance et par ordinateur. Cependant, durant son stage réalisé au LIP6 en 2004, Benjamin Corbara a créé un module pour Simulación, la plate-forme de simulations multi-agents participatives que j’ai développée, permettant d’analyser les demandes de visualisation des joueurs à partir des données de l’automate cellulaire (figure 3.6). Lorsque l’utilisateur saisit des phrases comme “afficher le risque d’incendie et les tortues” ou “risque d’incendie et tortues”, ce module affiche l’environnement de SylvoPast en indiquant le niveau de risque d’incendie sur les cases où se trouvent les tortues. Les bergers qui n’ont par exemple pas connaissance de la présence de tortues dans la forêt méditerranéenne n’ont pas accès à cette information.

³Discussions à Lourmarin en novembre 2004.

⁴Discussions en Avignon, septembre 2004.

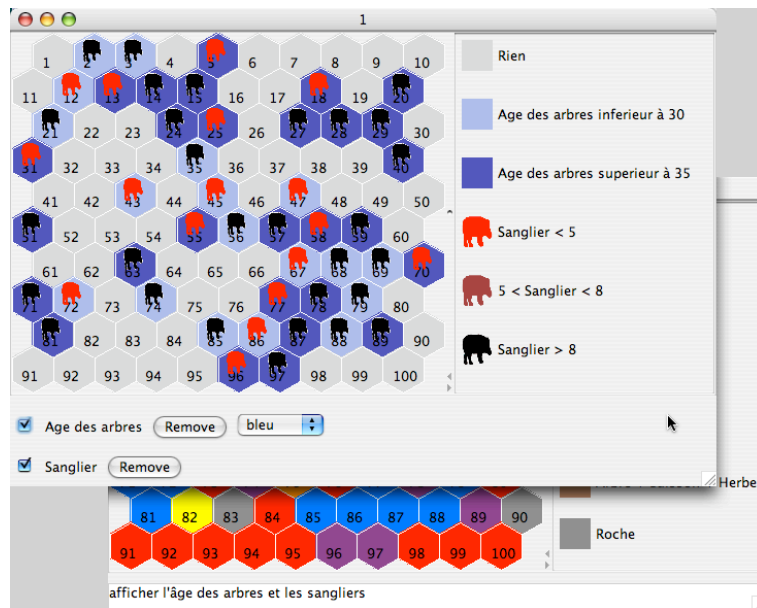


FIG. 3.6: Module de visualisation pour Comas, permettant de créer n'importe quel point de vue

3.3 SimCafé

La plate-forme Simulación, depuis les expériences SimCafé, permet d'organiser des simulations multi-agents participatives où les joueurs interagissent exclusivement par le biais d'ordinateurs. SimCafé est une simulation multi-agents participative construite pour déterminer la validité d'un modèle a priori de résolution collective de problèmes, en l'occurrence la satisfaction d'offres d'achat par la formation de coalitions entre des producteurs de café. Ces expériences ont été l'occasion d'une formalisation de la méthode de conception des simulations multi-agents participatives, méthode inspirée de la conception des simulations multi-agents et de l'approche MAS/RPG.

3.3.1 La conception de simulations multi-agents participatives

Le diagramme de conception de simulations multi-agents participatives (figure 3.7) reprend le processus de conception de simulation multi-agents, hérité du schéma de Diane Vanbergue. Les simulations sont conçues à partir de connaissances qui portent

3. VALIDATION DE MODÈLES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

sur le système cible. Le processus s'appuie sur trois modèles : le modèle du domaine, le modèle de conception et le modèle de simulation. Les acteurs sont impliqués au sein du processus sous la forme de la participation aux séances de verbalisation et aux simulations. Ce diagramme représente aussi l'influence des simulations sur les acteurs. On y voit également que l'analyse est produite à partir des séances de verbalisation et des enregistrements des simulations, deux éléments essentiels des expériences. Un des apports essentiels des simulations multi-agents participatives par rapport à l'approche MAS/RPG, réside dans l'enregistrement systématique de toutes les actions des participants.

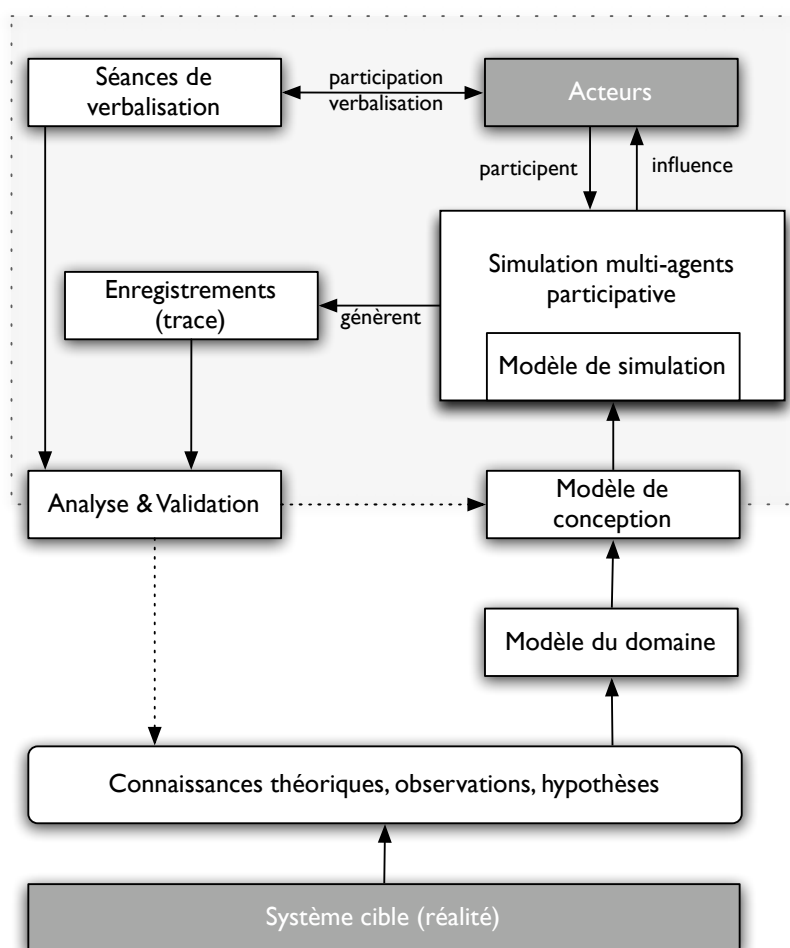
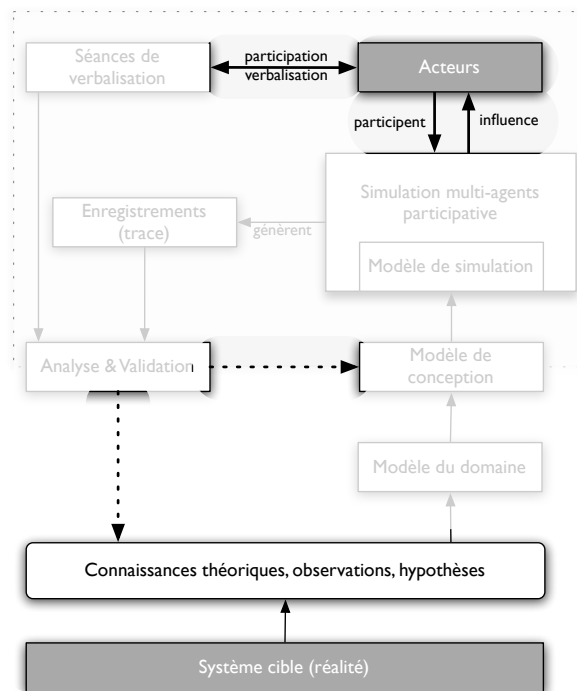


FIG. 3.7: Processus de conception des simulations multi-agents participatives

De la même manière que l'intérêt des simulations multi-agents ne se limite pas à l'outil informatique, cette méthode ne se limite pas aux expériences elles-mêmes ; le diagramme ne saurait servir de recette pour conduire des expériences de simulation multi-agents participatives. Les simulations multi-agents participatives ne permettent de valider des modèles de comportements que lorsqu'elles s'inscrivent dans l'ensemble du processus, avec principalement l'analyse et la validation fondées sur les séances de verbalisation et les enregistrements des simulations.

Le diagramme (figure 3.7) est le résultat de plusieurs évolutions. En 2004, j'ai proposé une méthode, inspirée du modèle de Diane Vanbergue ainsi que de l'approche MAS/RPG, pour concevoir des simulations multi-agents participatives [Guyot et Drogoul, 2004]. Cette méthode et sa représentation ont ensuite été reprises par Minh Nguyen-Duc et Athmane Hamel pour théoriser leurs propres expériences participatives [Nguyen-Duc, 2005; Hamel, 2006]. Ces deux auteurs ont insisté sur les échanges avec les experts du domaine. Minh Nguyen-Duc a mené des expériences pour concevoir et tester de nouveaux protocoles de collaboration entre les contrôleurs aériens. Il a doublé la méthode de conception d'une "méthodologie d'accompagnement", "solution méthodologique pour guider les acteurs sociaux dans [le] processus [de conception participative de comportements d'agents]" [Nguyen-Duc, 2005, p. 22]. Athmane Hamel a, quant à lui, mené des réunions avec des experts de la filière avicole. Il décrit ses propres expériences en s'inspirant de la méthode proposée en 2004 et en insistant sur les retours vers les experts [Hamel, 2006, pp. 201–202].

Ces deux auteurs insistent sur le retour vers les experts du domaine. Ils en font l'élément essentiel d'un schéma qui correspondait à une méthode dans laquelle le retour vers les experts était tout à fait secondaire : les simulations multi-agents participatives ont d'abord été conçues à des fins d'ingénierie de systèmes multi-agents. Le retour vers le domaine est effectivement un élément important des expériences participatives. Pour le faire figurer, il faut en distinguer deux composantes : l'expérience acquise par les acteurs et la production de connaissances à l'issue des expériences. La nouvelle représentation du processus de conception illustre ces deux formes de retour par des flèches.



Le diagramme reproduit en figure 3.7, représente l'implication des acteurs et trois retours vers le "monde réel". Les acteurs sont influencés par leur participation aux expériences et aux séances de verbalisation ; les différentes flèches qualifient leur implication dans le processus. Lors d'une série d'expériences, le modèle de conception est parfois modifié à partir des analyses pour préciser les hypothèses testées ou améliorer les résultats. Enfin, l'analyse des simulations produit de nouvelles connaissances théoriques.

Les expériences SimCafé constituent le premier exemple de simulations participatives fondées sur cette méthode, même si les séances de verbalisation étaient très limitées par rapport aux expériences que j'ai menées par la suite. Le domaine de ces expériences est la production de café dans l'état de Veracruz.

3.3.2 Modèles des expériences SimCafé

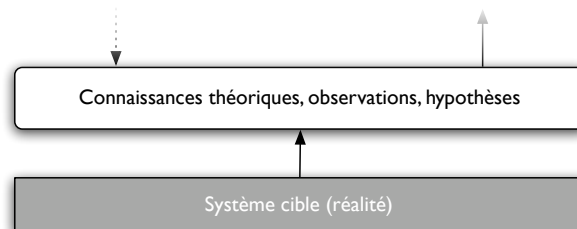
Les expériences SimCafé ont été conçues pour vérifier la validité de modèles de formation des coalitions qui permettent aux producteurs de café de l'état de Veracruz

de mieux satisfaire les offres des acheteurs sur le marché international du café.

Contexte des simulations

Les expériences SimCafé ont été conduites en mai 2003 dans cadre d'un projet relatif au marché électronique du café. Ce projet, financé par le Laboratoire Franco-Mexicain d'Informatique (LAFMI), était coordonné par Amal El Fallah-Seghrouchni et Christian Lemaître Léon. L'objectif du projet était de concevoir et de développer un langage de programmation orienté agents. Ce langage devait servir de fondement à un système de commerce électronique appliqué au marché du café produit dans l'état de Veracruz, au Mexique, et destiné à l'exportation [Suna et al., 2005]. Cet objectif de conception nécessitait de modéliser le marché du café et en particulier le comportement de ses acteurs. Les expériences SimCafé ont servi à vérifier la validité des modèles des comportements des acteurs, élaborés dans le cadre de ce projet.

Le système cible : la situation des producteurs de café

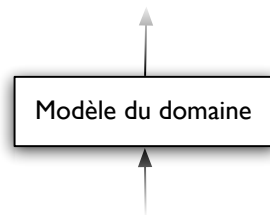


Le Mexique est le sixième producteur mondial de café et, en 1999-2000, l'état de Veracruz représentait 25% de la production nationale, avec 1,56 millions de sacs de 60 kg à 95% destinés à l'exportation. Le marché international du café est divisé en un marché de gros et un marché du café de qualité. L'essentiel de la production de l'état de Veracruz était vendu sur le marché de gros. Le prix de vente sur ce marché s'était récemment effondré, passant de 3,18 USD la livre en 1997 à 0,50 USD la livre en 2002, ce qui est inférieur au prix de revient des producteurs mexicains. Cette situation a poussé un grand nombre d'entre eux à abandonner la production de café et à se reconvertir dans la sylviculture, ou à chercher à passer la frontière avec les

États-Unis [Hernández Navarro, 2004].

Cette collaboration entre le Laboratoire d'Informatique de Paris VI et le Laboratorio Nacional de Informática Avanzada s'inscrivait dans un projet politique plus large. Les producteurs de café de l'état de Veracruz produisaient peu de café, avaient un faible revenu et étaient nombreux. En 2001, ils ont fondé avec le gouvernement de l'état, un conseil de régulation du café (*Consejo Regulador des Café Veracruz*). L'objectif était de créer une appellation d'origine contrôlée pour que le café de Veracruz soit vendu sur le marché international du café de qualité, à un prix plus élevé. Cette instance vérifie que le café est produit selon des normes de qualité et d'origine et certifie les sacs de café.

Le modèle du domaine : la production de café



Le modèle de la production de café décrit ici sert de modèle du domaine pour les simulations SimCafé. Ce modèle a été élaboré par Christian Lemaître, chercheur au LANIA, et Edgar Mendoza Flores, étudiant de la Maestría en Ciencias de la Computación (Master d'Informatique), et non pas par des spécialistes de la production du café. Edgar Mendoza Flores s'est néanmoins fondé sur des études sur le domaine et nous avons ensemble interrogé des producteurs de trois exploitations différentes, deux exploitations familiales et une grosse exploitation de taille industrielle (figure 3.8).

La production de café se fait en quatre étapes.

Le fruit, appelé cerise (*el café cereza*), est cueilli une fois par an sur les arbustes. Il est ensuite débarrassé de son écorce et de son enveloppe charnue. Le procédé consiste à frotter les grains entre deux disques métalliques puis à les laisser tremper dans l'eau pendant 24h afin que ce qui reste de chair se désagrège. Ce processus se déroule dans une fabrique appelée "beneficio húmedo". Le café ainsi produit s'appelle *café*

pergamino (café parchemin), parce que le grain est toujours entouré d'une pellicule, insoluble dans l'eau, appelée endocarpe ou parchemin. Ensuite, le café pergamino est décortiqué, transformé en *café oro* ou *café verde* (selon la couleur du grain) dans des fabriques appelées *beneficio seco* parce qu'elles n'utilisent pas d'eau. À la fin du processus, le café est torréfié. L'unité de production est le sac, un sac de café pergamino pesant 60 kg.

Les 67 000 producteurs de l'état de Veracruz sont essentiellement des cultivateurs d'arbustes et des journaliers payés pour cueillir le café cereza à la main. Quelques producteurs possèdent un "beneficio húmedo". Ils possèdent leurs propres arbustes ou, plus fréquemment, achètent du café cereza aux cultivateurs. Ces producteurs transforment le café cereza en pergamino et le vendent à des propriétaires de "beneficio seco". Les propriétaires de "beneficio seco" vendent le café verde ou oro sur le marché international.

D'après les producteurs que nous avons interrogés, l'étape la plus critique de la production de café est la transformation du café cereza en café pergamino. C'est pour cette raison que les producteurs représentés dans le modèle utilisé par SimCafé sont des producteurs de beneficio húmedo. La transformation du café cereza en café pergamino dure trois jours, le débit d'un beneficio húmedo dépendant de sa taille.

Coalitions

Les producteurs reçoivent des offres d'achat pour du café oro ou pour du café pergamino. À cause des délais de livraison, ces offres sont des offres à terme, et les producteurs ont en général une semaine pour les accepter. Quelques producteurs sont organisés en coopératives (appelées "sociedades" ou "alianzas").

Le modèle du domaine, tel qu'élaboré par Christian Lemaître et Edgar Mendoza Flores, suppose que des coalitions se forment sur le marché du café. Les producteurs, y compris ceux qui ne font pas partie de coopératives, accepteraient ainsi des offres d'achat pour des quantités supérieures à leur stock et ils achèteraient à d'autres producteurs une partie du café vendu. Ces comportements ne sont cependant pas admis

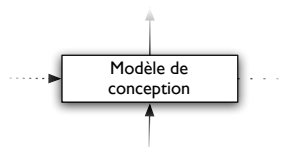


FIG. 3.8: Producteurs de café rencontrés à la Feria del Café

par les producteurs qui, lorsqu'ils sont interrogés, nient toute participation à des coalitions.

Les expériences SimCafé ont été construites pour tester l'hypothèse de la formation de coalitions sur le marché du café. Ces coalitions représentent un comportement collectif qui permet de mieux satisfaire les offres d'achat.

3.3.3 Le modèle de conception



Le modèle de conception est une évolution du modèle du domaine. Il comprend une description fine de différents modes, supposés ou existants, de coalition entre les producteurs de café. Trois types de coalitions sont pris en compte dans le modèle de conception : les coalitions directes, les coopératives et les coalitions avec multi-diffusion

d'offres.

Coalitions directes

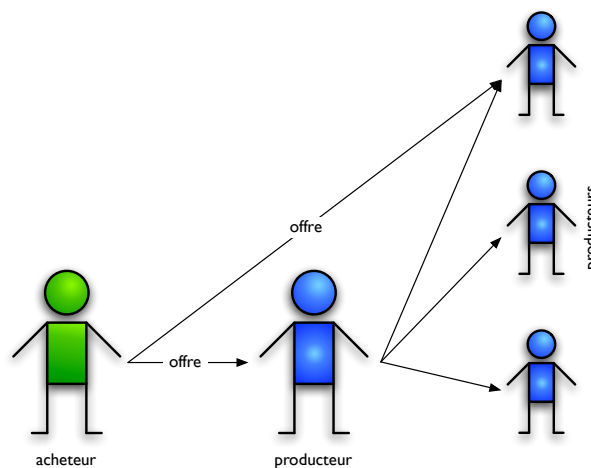


FIG. 3.9: Coalition directe entre producteurs

Les coalitions directes entre producteurs sont la forme la plus simple de coalitions (figure 3.9). Elles correspondent au comportement supposé des producteurs de café, et leur existence n'a pas été confirmée par les producteurs eux-mêmes, ni par une étude de terrain.

L'acheteur envoie une offre d'achat à un producteur qui initie la coalition. Ce producteur contacte d'autres producteurs et leur fait une offre d'achat. Les autres producteurs peuvent par ailleurs avoir été contactés directement par l'acheteur.

Dans cette forme de coalition, le producteur qui initie la coalition est libre de sélectionner les informations qu'il transmet aux autres producteurs. En particulier, il n'est pas forcé de leur indiquer le prix annoncé par l'acheteur.

Coopératives

Les coopératives sont une autre forme de coalitions, qui correspond à un comportement collectif public et connu (figure 3.10). Dans ce scénario, l'acheteur contacte un producteur qui est membre d'une coopérative. Le producteur partage alors l'informa-

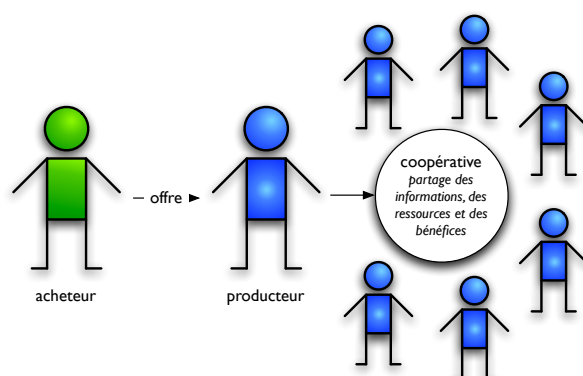


FIG. 3.10: Participation d'un producteur à une coopérative

tion avec les autres membres de sa coopérative qui peuvent participer à l'offre d'achat de l'acheteur. Les risques, essentiellement des incidents de livraison, et les bénéfices sont partagés.

Multi-diffusion

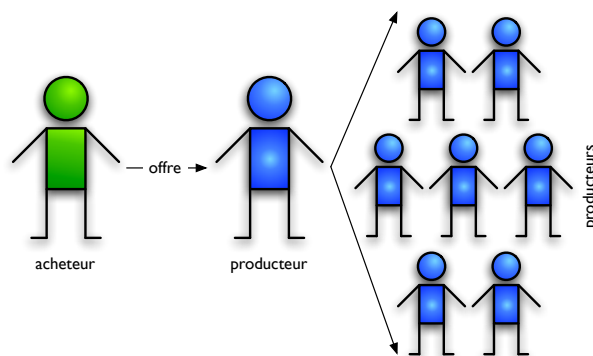


FIG. 3.11: Coalition avec multi-diffusion

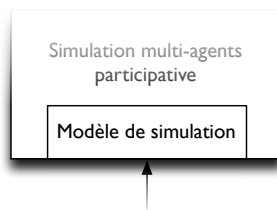
La multi-diffusion (*broadcast*) consiste à envoyer un message à un grand nombre de destinataires. Cette forme de coalition correspond à une solution classique en ingénierie de systèmes multi-agents et s'inspire d'un système d'enchères.

L'acheteur envoie une offre d'achat à un producteur, qui pour la satisfaire, émet à son tour une offre à destination d'un grand nombre d'autres producteurs (figure 3.11).

Ce type de coalition ne correspond pas à la situation où les producteurs discutent de visu ou par téléphone. Il s'apparente au protocole "Contract Net" [Smith, 1980].

Contract Net est une spécification des modes de communication entre les unités d'un système distribué conçu pour résoudre des problèmes. Cette spécification est fondée sur l'envoi de message par multi-diffusion. L'inclusion de ce type de coalition dans le modèle de conception, alors qu'il est probable que les producteurs de café ne l'utilisent pas, est dû au domaine d'application du projet financé par le LAFMI. Contract Net est en effet un des protocoles de référence pour la conception de marchés électroniques, et d'agents pour ces marchés. L'envoi de messages par multi-diffusion est censé accélérer la formation de coalitions.

3.3.4 Le modèle de simulation



Le modèle de simulation est l'équivalent du modèle opérationnel des simulations multi-agents (cf. section §3.1.1). Il est obtenu en modifiant le modèle de conception pour l'adapter aux contraintes de l'expérience et à l'objectif de test de l'hypothèse de départ. Ce modèle sert de fondements aux expériences de simulations multi-agents participatives.

Simplification

La contrainte principale est de rendre le modèle suffisamment simple pour qu'il puisse être expliqué et assimilé rapidement par les participants des expériences. Il faut également opérer une simplification similaire à celle décrite dans la méthode MAS/RPG : le modèle de simulation correspond à une expérience en laboratoire et ne peut pas toujours avoir la dimension d'un modèle du domaine qui décrit la réalité. Le modèle de simulation doit néanmoins rester suffisamment fidèle au modèle de concep-

3. VALIDATION DE MODÈLES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

tion et au modèle du domaine pour que les participants adoptent des comportements les plus proches possibles de leurs comportements réels.

Comme la phase de transformation du café cereza en café pergamino est la phase la plus critique, nous n'avons retenu qu'un seul type de producteurs de café dans le modèle de simulation, les propriétaires de beneficio húmedo. Ces producteurs ne récoltent pas de café mais ils l'achètent à prix fixe. Ils peuvent transformer du café cereza en café pergamino à un rythme qui dépend de la taille de leur fabrique. Les producteurs peuvent aussi discuter entre eux et s'acheter du café pergamino.

Le modèle de simulation ne comporte qu'un seul acheteur, rôle assumé par les organisateurs des expériences. L'acheteur envoie des offres d'achat aux producteurs. Il est omniscient, c'est-à-dire qu'il peut connaître à tout instant quels sont les stocks des producteurs, l'évolution de leur production de pergamino et la quantité d'argent dont ils disposent. Les offres d'achat qu'il envoie aux producteurs sont paramétrées pour favoriser l'émergence de coalitions. Par exemple, l'acheteur peut volontairement envoyer à un producteur une offre pour une quantité à peine supérieure au stock de ce producteur.

Pour simplifier la simulation, les offres de l'acheteur ne sont pas négociables. Elles sont envoyées à un ou plusieurs producteurs et elles ont une date d'expiration. Tant qu'une offre est valide, ses destinataires qui possèdent assez de pergamino peuvent l'accepter, et le premier à l'accepter conclut la vente. Un destinataire d'une offre d'achat peut savoir quels sont les autres producteurs qui ont reçu la même offre.

Primitives

Autre différence avec le modèle de conception, les actions dans le modèle de simulation sont divisées en primitives. Par exemple, il n'y a pas d'action correspondant à l'achat de café à un autre producteur. Cette action se divise, dans le modèle de simulation, en envois de messages textuels, de café et d'argent.

Cette division permet à la fois de valider et de consolider le modèle initial. La validation nécessite de ne pas forcer les joueurs à suivre les comportements décrits

dans le modèle. La consolidation consiste à ajuster le modèle pour qu'il soit plus proche des faits observés. Pour ce faire, il est important que les joueurs puissent adopter des modes d'interaction qui ne sont pas prévus mais qui reflètent mieux la réalité, permettant ainsi d'améliorer la pertinence du modèle.

Par exemple, la division de l'achat de café en primitives permet des variations non prévues dans le modèle de conception comme l'achat de café à terme, le prêt de café et le don.

3.3.5 Les expériences

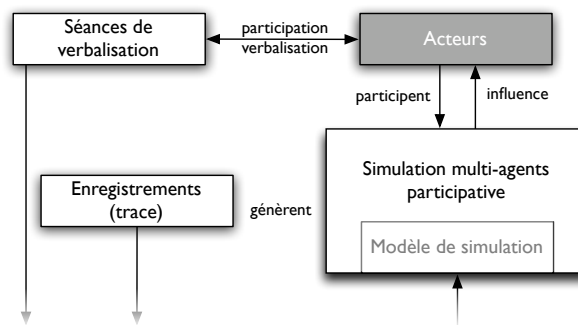


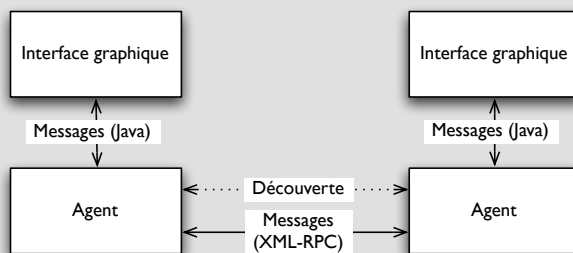
FIG. 3.12: Expériences SimCafé : Edgar Mendoza Flores assumant le rôle de l'acheteur

Les expériences SimCafé ont été menées au LANIA pendant une même demie journée. Huit étudiants de la Maestría en Ciencias de la Computación ont joué le rôle de producteurs de café dans trois simulations d'environ une heure trente chacune. Chaque joueur était assis à un ordinateur et participait à l'expérience à travers l'interface graphique de l'application SimCafé. Edgar Mendoza Flores jouait le rôle de l'acheteur (figure 3.12).

Première architecture réseau de Simulación

Dans Simulación, chaque agent est un processus java sur un des ordinateurs du réseau. Chaque joueur est assis à une station de travail sur laquelle se trouve l'agent qu'il contrôle. L'architecture réseau se divise en deux parties : la découverte des autres agents et l'envoi de messages.

La première architecture réseau utilisée pour les expériences SimCafé était fondée sur le protocole mDNS pour la découverte et XML-RPC pour l'envoi de message. D'inspiration multi-agents, l'ensemble était parfaitement symétrique : tous les agents étaient égaux et il n'y avait aucun serveur central. L'avantage de cette approche est la facilité d'utilisation. SimCafé et SimBar I fonctionnent sans configuration. Il suffit d'exécuter le programme sur des machines qui sont sur le même réseau local.



Architecture réseau de SimCafé

mDNS signifie multicast-DNS. C'est un protocole dérivé du protocole DNS (*Domain Name Service*) qui permet de résoudre les noms, c'est-à-dire de traduire un nom (par exemple `lip6.fr`) en une adresse IP (par exemple `132.227.73.20`). Le protocole DNS permet également de déterminer la machine fournissant un service donné, par exemple pour savoir quel(s) ordinateur(s) centralise(nt) le courrier électronique du LIP6.

Le protocole mDNS est une variante du protocole DNS où les requêtes sont transmises sur l'ensemble du réseau local (par *UDP multicast*) au lieu d'être dirigé vers un serveur unique (par *UDP unicast*). Dans le protocole mDNS, toutes les machines concernées par une requête transmettent la réponse à l'ensemble du réseau local.

Dans SimCafé, lorsqu'un agent cherche un autre agent, il envoie un paquet sur l'ensemble du réseau local et l'agent concerné lui répond. L'envoi de message se fait par XML-RPC, c'est-à-dire en suivant le protocole HTTP (le protocole utilisé pour transmettre les pages sur Internet) et en envoyant des messages en XML (c'est-à-dire des messages textuels structurés).

Aspects techniques

La différence la plus visible avec la méthode MAS/RPG est que les acteurs interagissent directement via l'ordinateur. Dans les simulations multi-agents participatives, il n'y a ni organisateur qui saisit les données pour que l'ordinateur calcule l'effet des actions des joueurs, ni formulaire à imprimer et à remplir.

L'avantage le plus évident de cette méthode est l'enregistrement de la totalité des actions des joueurs. Techniquement, l'enregistrement est décentralisé : un agent *Log* reçoit des informations des agents contrôlés par les joueurs et les écrit dans un fichier. J'ai pris pour habitude de profiter de la possibilité d'avoir deux agents *Log* redondants pour m'assurer de ne rien rater des échanges.

Faire asseoir chaque joueur à une station de travail pose le problème de la stabilité du code et de l'infrastructure réseau. Ce problème est résolu par la robustesse du système en tant que système multi-agents. Le modèle du jeu de SimCafé permet par exemple à des agents de disparaître ou d'apparaître au cours du jeu, de manière à gérer les erreurs d'exécution ou les problèmes réseau lors des expériences. L'ensemble du code est écrit pour gérer les erreurs et les exceptions de manière à ne pas interrompre la simulation.

La facilité du jeu est un autre problème. Dès la première application *Simulación*, un certain nombre de paramètres qui influent sur la facilité du jeu ont été inclus directement dans un fichier de configuration qui pouvait être modifié entre deux sessions.

3. VALIDATION DE MODÈLES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

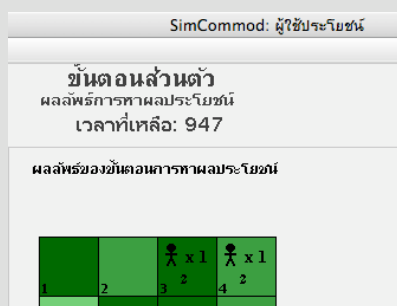
Par exemple, à la fin de la première expérience qui servait d'introduction au modèle, l'échelle de temps, c'est-à-dire le rapport entre le temps réel et le temps simulé, a été modifiée afin de répondre aux demandes des participants qui trouvaient le jeu un peu trop rapide.

Java, un choix historiquement marqué

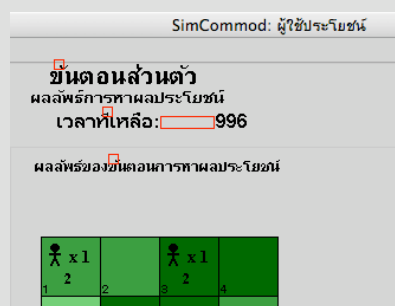
La plate-forme Simulación a été développée à partir du printemps 2003 pour les expériences SimCafé. Le système devait être conçu pour fonctionner sur différents ordinateurs dont la configuration n'était pas connue à l'avance. Il fallait faire un programme pour chacun des différents systèmes susceptibles d'être utilisés pour les simulations (MacOS X, FreeBSD, Solaris, Linux, Windows, etc.).

Le choix s'est porté sur Java, et en particulier la version 1.4. Cette version a été rendue disponible pour la quasi-totalité des machines dans les laboratoires d'informatique lorsque Apple a publié sa version pour MacOS X en mars 2003. La jeunesse de la version 1.4 jouait en sa défaveur, mais elle était beaucoup plus rapide que la version précédente.

Java avait comme avantage par rapport aux autres solutions (Qt, X11, SmallTalk, HTML, etc.) la facilité de conception d'interfaces graphiques fonctionnant sur toutes les plate-formes, la présence de fonctions XML avancées et une bibliothèque de fonctions pour les opérations réseau, facile à utiliser et suffisamment développée pour faire un système distribué.



Java 1.5.0_05



Java 1.4.2_09

Détail de l'interface graphique de SimCommod (en Thai)

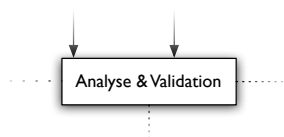
Java 1.4 s'est révélé suffisant. Les applications Simulación successives (SimCafé, SimBar I & II, SimCommod-Tokyo & SimCommod-Bangkok, SimBar III) n'utilisent pas de fonctions disponibles uniquement dans les versions plus récentes. L'installation a

toujours été aisée et l'interface graphique a presque toujours fonctionné à l'identique sur mon ordinateur et sur les ordinateurs utilisés par les joueurs. Le seul problème qui est apparu concernait le thaï qui n'a pas toujours été correctement affiché par certaines machines virtuelles. Les voyelles en thaï s'inscrivent parfois au-dessus des consonnes et les accents qui indiquent le ton sont encore au dessus, formant l'équivalent d'un second rang ; ce second rang n'est pas toujours dessiné.

Java n'a pas que des avantages. L'inconvénient le plus important est qu'il interdit tout développement d'applications Simulación par des chercheurs qui n'ont pas de solides connaissances en programmation. L'éventualité d'un développement des simulations par des experts du domaine m'est apparue lorsque j'ai rencontré des chercheurs qui, tels Michel Étienne à l'INRA, ont été formés à VisualWorks pendant 15 jours au CIRAD, et qui sont capables de développer des systèmes multi-agents complexes en SmallTalk à l'aide de Cormas [Bousquet et *al.*, 1998]. Développer des scénarios avec Simulación est une activité de programmation plus classique, où les phases de conception, de compilation et de déverminage sont clairement séparées, et cela nécessite une formation plus longue. SmallTalk est beaucoup plus simple à apprendre parce que ce langage est fondé sur un paradigme relativement simple (tout est objet et tout est envoi de message), alors qu'en Java, il y a des objets et des messages, mais également des valeurs (les entiers et les booléens) et des expressions. La programmation Java fait de plus appel à des concepts de la programmation par objet comme l'encapsulation qui ne sont pas très faciles à acquérir. Enfin, les environnements de développement Java sont autrement plus compliqués que VisualWorks, ne serait-ce parce que le code source des programmes est divisé en fichiers et que chaque fichier correspond nécessairement à une classe.

Cet inconvénient et la puissance des ordinateurs qu'on trouve désormais dans les laboratoires d'informatique font qu'aujourd'hui, je n'utiliserais pas Java si j'avais à refaire la plate-forme Simulación. Les différents systèmes fondés sur la technique AJAX (Asynchronous JavaScript And XML) constituent en 2006 un bien meilleur choix. AJAX est une technique rendue possible par la pénétration des butineurs modernes (Safari, Firefox, Opéra, etc.) qui permettent, grâce à l'objet JavaScript XMLHttpRequest, d'échanger des messages avec les serveurs sans recharger toute la page. Grâce à AJAX et à l'évolution du matériel, les applications web d'aujourd'hui comme Google Mail, sont beaucoup plus fluides et intuitives que les applications web de 2003, à tel point qu'on a pu parler de révolution "Web 2.0". Les scénarios Simulación pourraient, en 2006, être conçus comme des applications web. AJAX a tous les avantages de Java (multiplate-forme, multilingue, fonctions XML, fonctions réseau) sans en avoir l'inconvénient majeur : le processus de développement d'applications web ne comprend pas une phase de compilation et est à la portée d'un public beaucoup plus large que le développement d'applications en Java.

Analyse et validation



Quantité (sacs)	Prix par sac	Durée de l'offre	Vendeur	Caractéristique de la vente
200	15	200	Hector	directe
50	15	40	Abelardo	directe
500	20	200	Hector	coalition (achat de 470 sacs aux autres)
30	10	40	Abelardo	directe
100	15	40	Francisco	directe
25	50	40	Clemente	directe
50	10	40	Benjamin	directe
10	20	40	Daniel	directe (Francisco préparait une coalition)
120	10	50	Abelardo	directe
800	25	250	Hector	coalition (achat de 480 sacs aux autres)

FIG. 3.13: Offres conclues durant la troisième expérience

La figure 3.13 présente la liste des offres conclues durant la troisième expérience SimCafé. Pour chaque offre, cette figure indique les caractéristiques de l'offre d'achat (quantité de sacs, prix par sac en pesos et durée de l'offre en heures simulées) et comment la vente a été conclue.

Comme l'indique le tableau 3.13, deux coalitions simples se sont produites pendant la troisième expérience. Hector, l'initiateur de la première coalition, a acheté à trois autres producteurs 94% du café livré (290 sacs à Francisco, 80 sacs à Emiliano et 100 sacs à Abelardo). Pour la seconde coalition, il a acheté 60% du café livré en cinq transactions différentes (10 sacs à Francisco, 160 puis 80 sacs à Emiliano et 130 puis 100 sacs à Ignacio).

Aucune coopérative ne s'est formée pendant ces expériences même si certains joueurs ont mentionné l'idée de s'allier. Ce résultat s'explique par l'absence de risque dans le modèle de simulation : les coopératives sont essentiellement conçues pour partager les risques et les bénéfices, or les risques (transport, variation des récoltes) ont été écartés du modèle à des fins de simplification.

Pour la troisième expérience, les joueurs ont été informés de la possibilité d'envoyer des messages par multi-diffusion. Ils ont profité de cette possibilité mais les coalitions ont globalement reposé sur des interactions individuelles.

Résultats

Les expériences SimCafé vérifient l'hypothèse de la possibilité de formation de coalitions simples sur le marché du café. Bien sûr, comme elles n'ont été conduites qu'avec des étudiants, cette vérification se limite à la possibilité de la formation de coalitions et elles ne permettent pas de déterminer la réalité du phénomène chez les producteurs de café de l'état de Veracruz. En effet, pour deux raisons liées au contexte des expériences, aucun producteur n'a pu ou voulu prendre part aux simulations. D'une part, le budget ne permettait pas de payer des producteurs pour qu'ils participent. D'autre part, ce projet s'inscrivait dans le cadre de la mise en place d'une appellation d'origine contrôlée et ce nouveau label de qualité était perçu négativement par les producteurs, car il imposait de faire des investissements et de réduire la production et les effectifs.

SimCafé constitue cependant un outil unique qui permet d'organiser des discussions avec les producteurs à propos du recours aux coalitions. Le modèle est construit pour permettre l'émergence de coalitions, et ce comportement pourrait être discuté par la suite avec les producteurs lors de séances de verbalisation. En tant qu'outil, l'innovation de SimCafé se situe dans l'organisation des expériences. Par rapport aux jeux de rôles d'Olivier Barreteau, toutes les interactions se déroulent via le réseau et sont enregistrées. Il s'agit du premier outil de modélisation d'accompagnement où l'ordinateur ne sert pas uniquement à calculer l'impact des actions des joueurs sur l'environnement.

Les résultats les plus intéressants des expériences SimCafé sont qu'elles valident la méthode proposée, en tant que méthode pour tester et vérifier la validité de modèles de comportements collectifs. Elle a ainsi permis d'observer et d'enregistrer la formation de coalitions simples avec des joueurs humains.

Par ailleurs, les expériences SimCafé, en tant que simulations multi-agents participa-

tives, ont été l'objet de recherches et ont produit des résultats qui dépassent le cadre de la validation de modèles de comportements collectifs. Ces résultats sont décrits aux chapitres 6 (analyse automatique des interactions entre les producteurs) et 7 (efficacité des rôles émergents pour la résolution de problèmes).

3.4 Conclusion : stratégies individuelles et comportements collectifs

Pour valider des modèles de comportements collectifs, les simulations multi-agents participatives s'inspirent de la tradition des simulations multi-agents et de l'approche MAS/RPG qui permettent d'étudier des phénomènes et des comportements collectifs. Les expériences SimCafé montrent qu'il est possible de tester la validité des modèles de comportements sociaux sur lesquels s'appuie la conception de systèmes multi-agents.

Les simulations multi-agents participatives diffèrent des jeux de rôles sur plusieurs points. À l'inverse des expériences MAS/RPG, toutes les actions des joueurs s'effectuent par le biais de l'ordinateur et elles sont toutes enregistrées. La forme que prend la participation des joueurs est également différente. Dans un jeu de rôles, les joueurs peuvent agir à peu près comme dans la réalité ou en ayant recours à des symboles représentant des activités réelles qui sont discutés et choisis en commun. En revanche, dans les simulations multi-agents participatives, les joueurs se comportent comme s'ils prenaient le contrôle d'agents. Les interactions entre les joueurs se font dans le strict cadre des interactions entre agents. Cette propriété n'est pas une conséquence du jeu par ordinateur : les "réunions" d'Athmane Hamel ne se font pas sous la forme d'interactions entre agents, bien que les ordinateurs y soient abondamment utilisés, mais seulement pour discuter et noter les questions et les réponses des participants [Hamel, 2006].

De la même manière que les jeux de rôles ne sont pas des enquêtes de terrain, les simulations multi-agents participatives introduisent un biais dans la validation de modèles de comportements collectifs, en imposant des interactions de type "agent".

Le cadre conceptuel qu'est la simulation multi-agents est spécialisé dans l'articulation entre l'individuel et le collectif, et les simulations multi-agents participatives permettent également d'aborder l'articulation entre les stratégies individuelles et les comportements collectifs.

Les modèles testés par les simulations multi-agents participatives ne sont pas nécessairement vérifiés. En fait, les modèles de comportements collectifs de résolution de problèmes qui pourraient être utilisés pour concevoir des systèmes multi-agents, sont le plus souvent des modèles du système à un niveau agrégé (celui du groupe, de la société, etc.). Par exemple, dans le cas du marché du café, le modèle du domaine stipule l'existence de coalitions, mais il n'en spécifie ni la forme, ni les stratégies individuelles qui mènent à leur émergence.

Or la conception d'un système multi-agents repose sur la conception des agents pris individuellement. Il est impossible de construire un système multi-agents sans avoir une connaissance détaillée des comportements et des stratégies individuelles des agents. Les simulations multi-agents participatives, comme je le montre dans le chapitre suivant, incitent les acteurs à expliciter leurs comportements individuels, permettant ainsi de concevoir des systèmes multi-agents.

4 Le joueur, l'agent et le chercheur : explicitier les stratégies individuelles

La reproduction des comportements de résolution collective de problèmes, comme la simulation des comportements sociaux, nécessite de modéliser les stratégies individuelles. La méthode de modélisation participative, encore appelée "modélisation d'accompagnement", consiste à impliquer les acteurs d'un domaine spécifique dans le processus de modélisation des comportements collectifs. L'approche MAS/RPG, qui sert de fondement à la démarche ComMod (*Companion Modelling* ou modélisation d'accompagnement), fait participer les acteurs à des jeux de rôles et à des séances de verbalisation [Barreteau, 2003b]. L'observation des comportements, et les explications données par les participants, sont utilisées pour concevoir des simulations multi-agents [Bousquet et al., 2001]. La démarche ComMod repose sur un certain nombre d'artefacts qui incitent les acteurs à exhiber des comportements similaires aux comportements réels lors des jeux de rôles, puis à expliciter leurs comportements lors des séances de verbalisation [Boissau, 2003].

Les simulations multi-agents participatives SimCommod-Bangkok s'inspirent de l'approche ComMod et constituent une évolution par rapport à cette démarche. D'une part, les expériences se sont déroulées entièrement par le biais de l'outil informatique et toutes les interactions ont été enregistrées. D'autre part, ces expériences ont été l'occasion d'introduire des agents assistants dotés de capacités d'apprentissage limitées afin d'aider les participants à expliciter leurs stratégies et leur compréhension du modèle.

La première partie de ce chapitre présente une typologie des simulations participatives fondée sur les objectifs de la participation des acteurs aux expériences. Elle décrit plus en détail le réseau ComMod, qui rassemble des chercheurs ayant adopté l'approche MAS/RPG, et le rôle du chercheur au sein d'expériences qui permettent de faire expliciter les stratégies individuelles. La seconde partie du chapitre décrit les expériences de simulations multi-agents participatives SimCommod qui ont été développées comme exemple type de la démarche ComMod. Enfin, la troisième partie présente les apports de l'introduction d'un agent assistant pour aider les participants à expliciter leur comportements et à décrire leur perception du modèle.

4.1 Le chercheur et les joueurs

4.1.1 Typologie des simulations participatives

Trois objectifs, trois approches

Comme cela a été fait pour les jeux de rôles au chapitre 3, on peut dresser une typologie des simulations participatives à partir des trois objectifs de ces simulations. Cette typologie est résumée figure 4.1. Les trois objectifs sont énoncés par François Bousquet et Olivier Barreteau qui distinguent un objectif de recherche, un objectif pédagogique et un objectif de support à la décision [Barreteau et Bousquet, 1999].

Une première approche, que l'on peut qualifier d'approche de recherche, ou so-

Type	Objectif de la participation	Participants	Exemples
Recherche	Concevoir, valider et améliorer des modèles	Acteurs du domaine	SHADOC, SimCafé, PAT
Pédagogie	Faire comprendre le lien entre individuel et collectif	Étudiants	Virus, Butorstar
Négociation	Favoriser les négociations entre acteurs	Acteurs du domaine (rôles parfois inversés)	SylvoPastJeu, MejanJeu

FIG. 4.1: Typologie des simulations participatives

ciologique, a pour objectif de concevoir, valider ou améliorer des modèles de comportements collectifs. Les participants des simulations relevant de cette approche sont les acteurs du domaine. Les simulations multi-agents participatives SimCafé (chapitre 3), le jeu SHADOC d'Olivier Barreteau, et le jeu PAT de Stanislas Boissau sont de ce type [Barreteau et Bousquet, 2000; Boissau, 2003]. C'est aussi l'approche prédominante dans le domaine de l'économie expérimentale (présentée au chapitre 5).

L'approche pédagogique consiste à faire comprendre aux participants les liens entre les comportements individuels et les comportements collectifs. Le modèle est souvent calibré pour rendre le jeu plus pédagogique. Par exemple, dans ButorStar (cf. page 33), les paramètres du système multi-agents sous-jacent sont choisis pour faire disparaître l'espèce à protéger, le butor étoilé, en cas de désaccord entre les joueurs ou en cas de mauvaise gestion des roselières [Mathevet *et al.*, 2005]. L'objectif pédagogique consiste souvent à ne pas dévoiler les mécanismes du système étudié, en particulier comment s'y articulent individuel et collectif, et à demander aux participants d'essayer de les deviner. C'est exactement ce qu'a fait Vanessa Collella lors de ses expériences "Virus" [Collella, 1998; Collella *et al.*, 1998].

Enfin, l'approche de négociation vise à favoriser la discussion entre les acteurs d'un domaine. C'est l'objectif des jeux SylvoPastJeu et MejanJeu de Michel Étienne [Etienne, 2003]. Les acteurs disposent de beaucoup plus de liberté que dans l'approche pédagogique. La participation aux simulations les oblige à expliciter leur comportement et ils doivent rendre compte de leurs choix aux autres acteurs pendant les séances de verbalisation. Parfois les rôles des différents acteurs sont échangés. Par exemple, pour certaines parties de SylvoPastJeu, Michel Étienne donne le rôle du berger à un forestier et inversement. L'ensemble du processus vise à une meilleure compréhension des points de vue de chacun afin de faciliter la négociation.

Comme dans toute typologie, les limites entre les catégories ne sont pas aussi tranchées et les simulations participatives comportent souvent des aspects relevant de plusieurs catégories.

Participants

Parce qu'en pratique, la participation des experts du domaine aux jeux de rôles et aux simulations participatives est plus lourde et plus difficile à organiser que celle d'étudiants, les expériences sont majoritairement de type pédagogique.

Les jeux doivent en effet être testés avant de pouvoir être joués par les experts du domaine. Olivier Barreteau a testé le jeu SHADOC avec des étudiants pour leur montrer les problèmes de gestion de ressource partagée et la conception de simulations multi-agents, avant de faire jouer les acteurs du domaine, en l'occurrence des paysans sénégalais [Barreteau et Bousquet, 2000].

Par ailleurs, les acteurs sont parfois peu disponibles, ou moins disponibles que des étudiants, pour des raisons contingentes ou inhérentes au domaine. Raphaël Mathevet, auteur de ButorStar, ne pourrait mobiliser au mieux que cinq équipes d'acteurs du domaine, correspondant aux cinq sites au monde où se pose le problème de la survie du butor étoilé dans le milieu des roselières. Comme d'autres experts, il a préféré se concentrer sur l'objectif pédagogique des jeux de rôles [Mathevet *et al.*, 2005]. Raphaël Mathevet m'a dit préférer continuer de parfaire son système pour éviter de "griller ses cartouches" avec les rares acteurs concernés¹.

Les expériences "Virus" de Vanessa Colella sont des expériences pédagogiques, comme les expériences ButorStar. Les joueurs sont dotés de badges avec des diodes lumineuses et un émetteur et un capteur infra-rouge [Colella, 1998; Colella *et al.*, 1998]. Les diodes s'allument, représentant les symptômes d'une maladie. Les joueurs sont contagieux avant que les symptômes n'apparaissent. Dans ce jeu, les participants doivent essayer de déterminer la dynamique de la propagation de la maladie. Ce jeu n'est pas fondé sur un modèle scientifique de contamination par un virus et les expériences ont un but uniquement pédagogique.

Lorsque les joueurs ne sont pas des acteurs du domaine, il n'est pas possible de valider la simulation en comparant son évolution avec le système cible. Les possibilités de validation concernent principalement ses aspects pédagogiques et sa cohérence in-

¹Discussion à Lourmarin en novembre 2004.

terne. En d'autres termes, les expériences pédagogiques sont neutres par rapport au domaine : la conformité de leur modèle avec un modèle du domaine n'a aucune influence sur les qualités pédagogiques de l'expérience, et l'évolution de l'expérience ne permet pas de conclure quoi que ce soit pour le domaine. En revanche, les expériences relevant de l'approche "recherche" ou "sociologique", et de l'approche "négociation" ne sont pas neutres par rapport au domaine, et correspondent à deux postures scientifiques entre lesquelles hésitent la plupart des chercheurs de ce domaine, en particulier ceux regroupés dans le réseau ComMod.

4.1.2 Le réseau ComMod

ComMod signifie modélisation d'accompagnement ou "companion modelling". C'est une charte élaborée en 2003 en français et en anglais, et mise à jour en 2004 [Barreteau, 2003b]. Elle est actuellement signée² par trente-cinq chercheurs, quasiment tous francophones et travaillant au sein d'instituts de recherche français tels le CIRAD, le CEMAGREF, l'INRA ou l'IRD. Cette charte regroupe des chercheurs de différents horizons qui s'intéressent aux jeux de rôles et à la modélisation par des simulations multi-agents.

Plus de la moitié des signataires sont des spécialistes de l'environnement (écologues, géographes, hydrologues, agronomes, etc.), sept signataires se présentent comme spécialistes de la modélisation, trois se rattachent à l'informatique³ et six revendiquent une spécialité en sciences sociales (anthropologie, économie, sociologie).

Du fait de ses origines et des laboratoires de recherche impliqués, ce réseau est très marqué par les problématiques de développement durable et de gestion collective de ressources renouvelables. Cette implication est exprimée dès la première phrase

²<http://cormas.cirad.fr/fr/reseaux/ComMod/ComModTeam.htm>

³Il s'agit d'Alexis Drogoul, Claude Monteil et Jean-Pierre Müller. La demande d'adhésion de Claude Monteil révèle qu'il se présente plutôt comme un informaticien spécialiste de la modélisation de phénomènes agricoles, converti à l'usage des simulations multi-agents au contact de François Bousquet et Christophe Le Page.

de la charte ComMod : "les recherches que nous menons portent sur la gestion des ressources renouvelables et de l'environnement".

La charte ComMod

La charte ComMod présente quatre principes fondamentaux, rédigés comme suit :

- Considérer que toutes les idées à la base de la modélisation ont comme vocation d'être remises en cause au contact du terrain, c'est-à-dire d'être volontairement et directement soumises à réfutation ;
- N'avoir aucune hypothèse implicite dans l'expérimentation : ceci constitue un objectif en soi de la démarche et implique le développement de procédures de mise en évidence de telles hypothèses à la fois sur le plan empirique et conceptuel, ce dernier plan consistant à confronter le modèle à des résultats reconnus par la communauté scientifique ;
- Prendre en considération, dès les premières étapes, l'impact du processus de recherche sur le terrain, que ce soit en termes d'objectifs définis, de qualité de la démarche, d'indicateurs quantifiables, de suivi et d'évaluation ;
- Donner une attention particulière aux processus de validation de cette démarche de recherche, sachant qu'il n'existe pas de théorie générale de la validation des modèles et que des procédures autres que celles utilisées dans les modèles bio-physico-mathématiques sont à envisager.

Le premier et le second principe relèvent d'une posture positiviste inspirée par la tradition poppérienne [Popper, 1934]. La réalité est objective et l'observation sur le terrain est le mode pour y accéder et s'y confronter. Tout ce qui peut être falsifiable doit être identifié et testé. Les signataires de la charte ComMod s'engagent à comparer leurs résultats à ceux des communautés scientifiques concernées.

Tranchant avec l'approche positiviste des premiers principes, le quatrième principe signale la prise de conscience de la difficulté de la validation qui ne peut être obtenue par la seule observation de la réalité. Ce quatrième principe propose de découvrir et

de tester de nouvelles procédures de validation, par exemple par la concertation avec les acteurs du domaine.

Le troisième principe rappelle que tout travail de recherche influence le sujet étudié. Cet impact est connu et inévitable. La leçon d'écriture de *Tristes Tropiques* en est un fameux exemple [Lévi-Strauss, 1955, Partie 7, chapitre 28]. Les termes de jeu de rôles et de simulation ne diminuent pas cette influence de la recherche sur le domaine étudié même s'ils peuvent laisser supposer une certaine déconnexion avec la réalité.

En tenant compte de l'impact, parfois volontaire, du processus de recherche sur le terrain, la charte ComMod se place dans la tradition de la recherche action participative. Dans les années 1980, partant de l'idée que cet impact est inévitable, un certain nombre de chercheurs se sont réclamés de la recherche participative ou de la recherche action participative. William Foote Whyte définit la recherche action participative comme le domaine où les acteurs participent à la recherche, et où l'enquête débouche sur une action fondée sur une décision collective [Whyte, 1991]. D'autres auteurs insistent sur les trois objectifs de la recherche action participative : la recherche sociologique, l'éducation et l'action. Ces trois objectifs correspondent aux catégories de la typologie des simulations participatives (figure 4.1).

Ambivalence de la charte ComMod

La charte ComMod révèle l'existence de débats et d'hésitations au sein du réseau. La revendication d'un certain positivisme, hérité des sciences naturelles, s'oppose à des objectifs normatifs de développement durable et aux réflexions sur l'impact social des jeux de rôles. Cette ambivalence n'empêche pas les membres du réseau de coopérer même si les objectifs de recherche sont divergents. C'est le cas pour le projet Samba, mené par un anthropologue (Stanislas Boissau) et un agronome (Jean-Christophe Castella) [Boissau *et al.*, 2004].

Pour créer une simulation multi-agents qui modélise l'usage d'une ressource, les chercheurs du réseau ComMod partent d'un modèle de l'environnement fondé sur l'observation, et y introduisent les acteurs. Ce passage ne se produit pas sans une

certaine tension entre un modèle objectif des ressources, et un modèle subjectif de leur usage. Lorsqu'il est incorporé dans le jeu de rôles, le modèle de l'environnement est souvent modifié pour déclencher certains comportements chez les joueurs, ou pour favoriser la prise de conscience de certains enjeux.

La validation par le terrain s'inscrit à la fois dans une démarche positiviste et dans une démarche de recherche action. Le modèle de l'environnement est confronté aux observations de l'environnement naturel et il est discuté avec les acteurs pendant et après le jeu de rôles. Dans SylvopastJeu, par exemple, les acteurs vérifient la validité du modèle de la dynamique de la forêt et des risques d'incendie par l'observation qu'ils en font pendant le jeu. Les acteurs sont eux-mêmes experts de la forêt, et Michel Étienne m'a dit bénéficier de leurs remarques pour améliorer son modèle⁴.

4.1.3 Les trois rôles du chercheur

Comme les trois rôles décrits par Diane Vanbergue dans son modèle de la conception de simulations multi-agents, le chercheur qui mène des simulations participatives endosse trois rôles distincts.

Le concepteur

Le premier rôle est celui de concepteur. Le concepteur modélise l'environnement, programme la simulation multi-agents et, dans le cas des simulations multi-agents participatives, l'interface de jeu. Le concepteur reprend les trois rôles du concepteur de simulations multi-agents [Vanbergue, 2003]. Ce rôle peut être assumé par une équipe composée de plusieurs personnes.

Dans ce type d'expériences, il est très fréquent d'avoir besoin d'ajuster le code en temps réel, en fonction du déroulement du jeu. Il est indispensable que le concepteur fasse partie de l'équipe, dans la mesure où l'expérience montre qu'il y a toujours quelques différences entre la spécification documentée et l'implémentation du logiciel.

⁴Discussion en Avignon, septembre 2004.

Par exemple, la première version de SimCommod, application fondée sur la plateforme Simulación, avait été écrite par Patrick Taillandier qui a mené une expérience au LIP6 en juin 2005. En septembre 2005, à partir de son travail, j'ai organisé les expériences SimCommod-Tokyo. Même si j'avais apporté d'importantes modifications au code, je ne maîtrisais pas entièrement le programme. Certains cafouillages lors de la première partie auraient pu être évités si Patrick Taillandier avait été présent. De plus, en me fondant sur les spécifications du jeu, j'ai indiqué aux participants qu'un agent logiciel, en l'occurrence le gouvernement, avait un certain comportement, alors que le comportement réel, tel que codé, était tout autre.

L'organisateur

Le chercheur est aussi organisateur des expériences. L'organisation d'une simulation participative passe par des tests préliminaires, le recrutement des joueurs et la présentation de la simulation. L'organisation requiert également des compétences particulières pendant le jeu. Il faut faire face aux imprévus et corriger les éventuels problèmes le plus rapidement possible pour ne pas gêner le temps de présence des joueurs. La robustesse du système et sa flexibilité dépendent des outils utilisés.

Un environnement SmallTalk, comme VisualWorks par exemple, permet de corriger des erreurs dans le code en temps réel, sans interrompre l'expérience. C'est ce que j'ai été amené à faire lors des expériences SimCommod-Bangkok organisées avec Christophe Le Page. La veille d'une expérience, nous avons ajouté la possibilité d'enregistrer l'évolution de l'environnement dans un format particulier pour que Christophe Le Page puisse la comparer avec ses propres expériences de simulations participatives (jouées sans ordinateur). Il y avait une erreur dans le nouveau code. À la fin du premier tour de jeu, l'erreur est apparue et, grâce au système de déverminage de VisualWorks, j'ai pu la corriger sans interrompre le jeu. Les joueurs se sont à peine rendus compte du problème.

De la même manière, l'utilisation systématique d'un fichier séparé de configuration dans Simulación m'avait permis de faire un ajustement entre deux parties de SimCafé.

Le modérateur

Le troisième rôle du chercheur qui organise une simulation participative est celui de modérateur des séances de verbalisation. Ainsi, la discussion autour du jeu et les retours des joueurs ont toujours eu une très grande valeur dans les expériences que j'ai menées. Lors des expériences SimCafé et SimBar, j'ai fourni aux joueurs un questionnaire afin de les amener à réfléchir sur le modèle du jeu pendant l'expérience. Ce rôle a été cédé à un agent assistant dans SimCommod (voir section §4.3).

La discussion a généralement lieu dans la langue commune des participants. À Xalapa en mai 2003, les discussions, malheureusement trop brèves faute d'avoir bien mesuré l'importance de la verbalisation, ont eu lieu directement en espagnol. À Bangkok, les discussions se sont faites en thaï. Guy Trébuil, chercheur au CIRAD, nous traduisait instantanément les discussions, pendant que Thadsanee Chaiyawong et Kongpob Kunjaranusorn, participants du projet Ecole Commod, prenaient des notes. Lors des expériences SimCommod-Tokyo, la discussion a eu lieu en anglais a été filmée. L'enregistrement vidéo et l'enregistrement des actions des joueurs m'ont permis de comparer ce qui s'était dit et ce qui s'était fait. La vidéo a également mis en évidence que les participants se sentent encore dans le jeu pendant la séance de verbalisation. Provoquant le rire de l'ensemble des participants, un des joueurs a déclaré :

Je ne me souviens plus [qui n'a pas tenu ses promesses]. Tenir sa promesse n'est pas une expression qui fait sens dans ce labo.⁵

Il est facile d'imaginer les tensions qui peuvent apparaître lors d'un jeu avec de vrais acteurs, surtout si la simulation a pour but de favoriser la négociation. Michel Étienne m'a expliqué que le discours lors des séances de verbalisation ne correspond pas toujours à ce qui a été fait pendant le jeu, et qu'il n'hésite pas à montrer aux joueurs les enregistrements de la partie pour dévoiler leurs ré-interprétations⁶.

⁵“Who did not keep their promises? — I don't know. I don't remember. ... It is nonsense to keep promises in this laboratory.”

⁶Discussion en Avignon, septembre 2004.

Dans toutes les expériences de simulation multi-agents participatives, l'enregistrement des actions des joueurs au format XML a permis d'extraire, pendant et après l'expérience, des éléments de la partie (évolution de l'environnement, choix des joueurs, etc.). Ceci a fourni une vision globale de ce qui s'était passé entre les joueurs et a également permis de vérifier et de préciser ce qu'ils avaient restitué pendant la séance de verbalisation.

Simulación et XML

Depuis 2003, la plate-forme Simulación utilise massivement le format XML pour la configuration, l'échange des messages et l'enregistrement de toutes les actions des joueurs. XML était alors encore un peu lourd mais ce choix pariait sur un développement de la technique pour facilement traiter les données *a posteriori*.

XML (*Extensible Markup Language*) est un langage très générique permettant de représenter des données structurées et semi-structurées sous forme de texte. La première version du standard XML date de 1998.

Depuis 1999, il existe un langage, XSLT (*XSL Transformations*, où XSL est l'acronyme de *Extensible Stylesheet Language*), qui permet de transformer un document XML en un autre document XML. Ce langage permet notamment d'extraire facilement des informations des documents XML et de les présenter sous la forme d'une page HTML. Trois lignes de XSLT suffisent pour extraire l'évolution de la carte de l'environnement dans SimCommod. Il est également très facile d'extraire la totalité de la discussion entre les joueurs pour voir ce qui s'est dit ou pour traduire les messages échangés.

Les outils pour traiter les données en XML continuent d'évoluer. La deuxième version de XSLT a été standardisée en novembre 2005. Cette nouvelle version permet, avec d'autres standards datant également de 2005, de très facilement extraire des données complexes comme par exemple la moyenne des volumes de café échangés.

Avec ces outils, l'écriture et la mise au point d'une feuille de style XSLT prend quelques minutes.

4.2 SimCommod, une simulation multi-agents participative inspirée de l'approche ComMod

L'application SimCommod a été conçue dans le cadre du projet "Ecole ComMod (E-Collective Learning on Companion Modelling)" financé par le programme ASIA IT&C de l'Union Européenne⁷. L'objectif était de faire une simulation participative emblématique de l'approche ComMod autour de la gestion de ressources renouvelables.

Les expériences SimCommod ont été l'occasion de mener des simulations multi-agents participatives qui adoptent la démarche ComMod tout en l'étendant, à la fois en fusionnant le jeu de rôles et la simulation multi-agents, et en insérant des agents logiciels pour améliorer les qualités pédagogiques du système et aider les participants à expliciter leurs comportements individuels.

4.2.1 CherIng

Le modèle SimCommod a été conçu en collaboration avec Christophe Le Page, Alexis Drogoul et Patrick Taillandier. SimCommod est directement dérivé du jeu de rôle *CherIng* créé par Christophe Le Page et Michel Étienne pour des formations sur l'utilisation de jeux de rôles couplés aux simulations multi-agents dans le domaine de la gestion de ressources partagées [Etienne *et al.*, 2004]. *CherIng* est un jeu de rôles où les joueurs sont des exploitants et l'environnement est simulé par un modèle Comas. Les joueurs jouent en levant des cartons et l'ordinateur ne sert que pour calculer l'évolution de l'environnement plus rapidement qu'à la main.

La ressource

L'environnement est représenté par un automate cellulaire de 16 cellules réparties sur une grille carrée de 4 cellules de côté (figure 4.2).

⁷Référence TH/ASIA IT&C II/05 (96511)

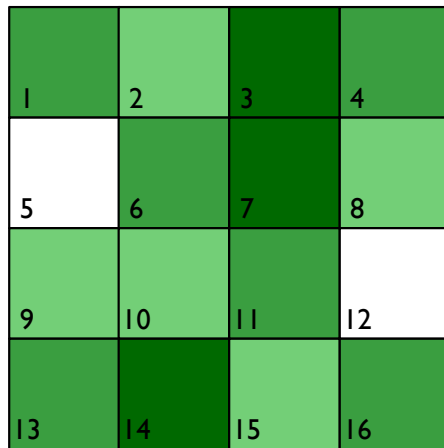


FIG. 4.2: Environnement dans CherIng & SimCommod (état initial)



FIG. 4.3: Les quatre niveaux de la ressource

CherIng est volontairement conçu de manière abstraite : la ressource est appelée Ing (prononcé *ɪŋ*)⁸ et sa dynamique suit l'une des dynamiques classiques des ressources renouvelables. Chaque case de l'environnement représente une partie de l'espace sur laquelle se trouve une certaine quantité de ressource. Le niveau de ressource sur chaque case est représenté par un vert plus ou moins foncé ; les cases blanches sont des cases où il n'y a pas de ressource (Figure 4.3).

La croissance de la ressource dans CherIng est liée à son exploitation. La ressource décroît si elle est abandonnée ou si elle est sur-exploitée. Les règles exactes de l'automate cellulaire sont détaillées figure 4.4.

Les exploitants

L'objectif des exploitants est de récolter un maximum de ressource. À chaque tour de jeu, les joueurs décident simultanément, en brandissant des cartons numérotés, quelle case ils veulent exploiter. L'opérateur (Christophe Le Page) saisit leurs choix et Cormas calcule la quantité de ressource que chacun a pu récolter.

⁸CherIng est à la fois un jeu de mot sur l'anglais *sharing* et la contraction de Chercheur (sous entendu, chercheur participant aux formations de Michel Étienne et de Christophe Le Page) et de Ing, la ressource.

4. LE JOUEUR, L'AGENT ET LE CHERCHEUR

Nombre x d'exploitants sur la case aux tours précédents				Évolution de la ressource (t_{n+1})
t_{n-3}	t_{n-2}	t_{n-1}	t_n	
.	.	.	$x = 1$	Constante
.	.	.	$x > 1$	Décroit de x
.	.	$x \geq 1$	$x = 0$	Croît de 1
.	$x \geq 1$	$x = 0$	$x = 0$	Croît de 1
$x \geq 1$	$x = 0$	$x = 0$	$x = 0$	Constante
0	$x = 0$	$x = 0$	$x = 0$	Décroit de 1

FIG. 4.4: Evolution de la ressource lng en fonction de la présence d'exploitants

La quantité récoltée dépend du niveau de ressource sur la case exploitée. Les cases en vert foncé correspondent à trois unités de ressource, vert médian à deux unités et vert pâle à une unité de ressource. Un des exploitants présents sur la case est choisi aléatoirement et reçoit un maximum de deux unités de ressource. Dans le cas des cases vert foncé, dotées de trois unités de ressource, un deuxième exploitant est choisi aléatoirement et reçoit la troisième unité.

La quantité de ressource récoltée n'est pas directement liée à l'évolution de la ressource sur la case. Par exemple, une case vert médian fournira deux unités de ressource à un des exploitants présents. Si l'exploitant est seul, la case restera vert médian au tour suivant. Si un autre exploitant est présent, la case deviendra blanche.

Les exploitants dans Cherlng ne sont informés que des règles du jeu. Ils ne connaissent ni le principe ni les détails de la dynamique de la ressource. Ils savent seulement que le vert foncé représente plus de ressource que le vert pâle.

Évolution du jeu

Les joueurs dans Cherlng ne connaissent pas l'algorithme de distribution de la ressource. Le nombre de joueurs est choisi pour que l'environnement soit rapidement couvert de blanc, c'est-à-dire pour que la ressource disparaisse. Lors du premier tour, les joueurs se placent spontanément sur les cases les plus foncées, lesquelles sont donc occupées par plusieurs joueurs et deviennent vert pâle ou blanches. Pour que

l'environnement devienne vert foncé, il faudrait que plusieurs joueurs décident de ne pas exploiter pour un tour, ce qui, d'après ce que m'a dit Christophe Le Page, n'est jamais arrivé dans les expériences CherIng, étant donné que l'objectif individuel est de récolter un maximum de ressource⁹.

Lors d'une seconde partie, les joueurs sont répartis en équipes et peuvent, au début de la partie, se mettre d'accord sur la stratégie que chacun va suivre. Ce début de collaboration évite que deux joueurs de la même équipe exploitent la même case, mais ne permet pas d'augmenter la quantité de ressource dans l'environnement.

Comme d'autres jeux organisés par les membres du réseau ComMod, CherIng contient une part de manipulation dans le but de faire négocier et de faire réagir les participants. Le modèle et le nombre de joueurs sont en effet tels, que la ressource diminue mécaniquement sous l'effet des stratégies individuelles, tandis qu'avec une stratégie collective concertée, l'environnement pourrait devenir entièrement vert foncé.

4.2.2 De CherIng à SimCommod

SimCommod est une simulation multi-agents participative construite à partir du modèle de CherIng. Le nombre de joueurs dans SimCommod est réduit à 7 ou 8. Un des joueurs tient un rôle nouveau, celui de l'environnementaliste, chargé de protéger la ressource. Les 6 ou 7 autres joueurs sont des exploitants.

Les tours de jeu dans SimCommod sont divisés en deux phases principales : l'exploitation et la négociation.

L'exploitation

Dans un premier temps, les exploitants choisissent où exploiter, simultanément et sans avoir connaissance des choix des autres exploitants. Ils ont la possibilité d'exploiter trois fois, comme s'ils dirigeaient une équipe de trois journaliers. Ils peuvent exploiter trois cases différentes, ou trois fois la même case, ou deux fois une case et une fois une autre. Comme dans CherIng, la stratégie naïve consiste à exploiter de préférence

⁹Discussion à Bangkok en novembre 2005.

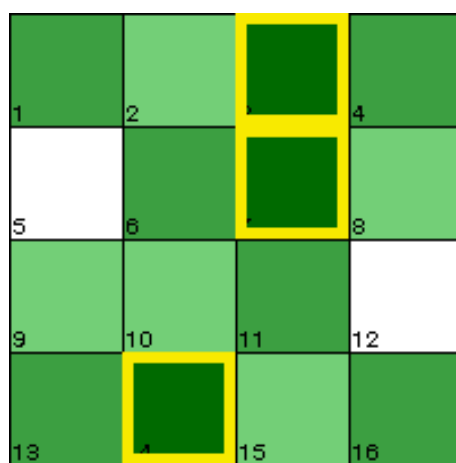


FIG. 4.5: Sélection des 3 cases les plus foncées pour les exploiter

les cases les plus foncées (Figure 4.5).

Une fois que tous les joueurs ont choisi où exploiter, le modèle Cormas calcule le nombre d'unités de ressources récoltées en suivant le même algorithme que celui de CherInq, et envoie l'information aux joueurs. Ensuite, Cormas détermine l'évolution de la ressource, c'est-à-dire calcule l'étape suivante de l'automate cellulaire, en suivant, encore une fois, les mêmes règles que dans CherInq. La nouvelle carte ainsi obtenue est transmise à tous les joueurs.

La négociation

Cette nouvelle carte sert de base à une négociation. Le gouvernement, rôle assumé par les organisateurs, a la possibilité d'interdire l'exploitation de trois cases. La négociation entre les joueurs indique au gouvernement quelles cases l'ensemble des joueurs souhaite qu'il protège.

Les joueurs indiquent les cases qu'ils souhaitent protéger ou exploiter avec des jetons de couleur. Les exploitants disposent de trois jetons verts pour indiquer quelles cases ils souhaitent exploiter et l'environnementaliste dispose de dix jetons rouges pour indiquer quelles cases il souhaite protéger. Les jetons verts ont une valeur de 1 point et les jetons rouges de -1 point. Pour chaque case, les points positifs et négatifs

sont additionnés.

Pendant la phase de négociation, les joueurs peuvent discuter entre eux, déplacer leurs jetons et voir où sont les jetons des autres joueurs (figure 4.6). À la fin de la phase de négociation, le gouvernement choisit les trois cases à protéger.

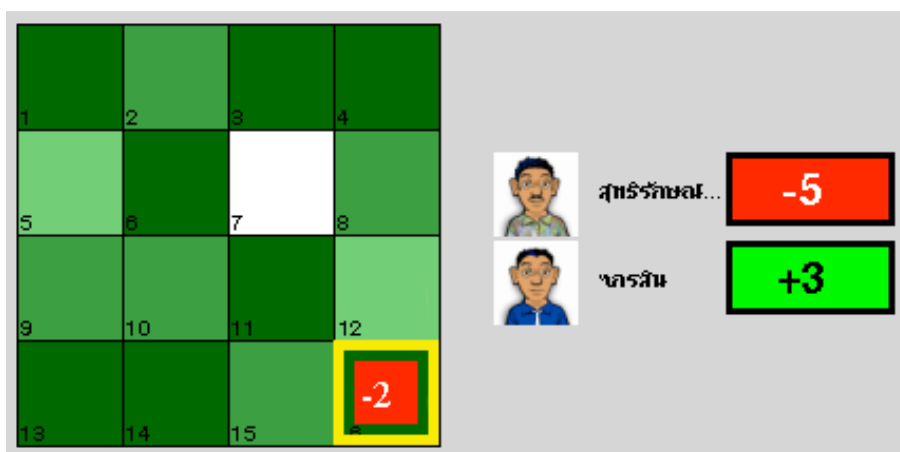


FIG. 4.6: Négociation dans SimCommod-Bangkok

L'environnementaliste et la valeur du terrain

SimCommod diffère de CherInq par la présence d'un environnementaliste chargé de maximiser la valeur de l'environnement, en influant sur le comportement des autres joueurs et sur le gouvernement lors de la négociation. Le but exact de l'environnementaliste a été exprimé de manière différente lors des expériences de Paris (juin 2005), Tokyo (septembre 2005) et Bangkok (novembre 2005).

Lorsque la première version de SimCommod a été testée au Laboratoire d'Informatique de Paris VI, l'environnementaliste, rôle assumé par Alexis Drogoul, devait faire de son mieux pour créer un couloir avec une forte densité de ressource. Ce couloir représentait l'habitat pour une espèce à protéger. Les organisateurs n'ont pas communiqué cet objectif aux autres joueurs mais l'environnementaliste le leur a indiqué lors de la négociation ("J'ai besoin d'un corridor coudé" leur a-t-il dit). SimCommod ne fournissait cependant pas un indicateur chiffré de l'atteinte de cet objectif.

Lors des expériences menées à Tokyo, l'objectif de l'environnementaliste n'a pas été précisé. Ces expériences s'inscrivaient dans une démarche inspirée de l'économie expérimentale et sont décrites au chapitre 5.

Pour les expériences menées à Bangkok, l'environnementaliste devait maximiser la valeur du terrain. Cette valeur était d'autant plus élevée qu'il existait des zones contiguës vert foncé ou vert moyen. Chaque case vert moyen ou vert foncé valait un point auquel s'ajoutait le nombre de cases voisines (au sens du voisinage de von Neumann) qui étaient vert moyen ou vert foncé. Les autres cases, blanches ou vert clair, ne valaient aucun point. Par exemple, dans la grille initiale (figure 4.2), la case 7 vaut quatre points et la case 13, deux points. La valeur totale de l'environnement initial est de 19 points. Dès la première séance, nous avons fourni à l'environnementaliste une fiche complète (traduite en thaï) détaillant le calcul de cette valeur. L'interface graphique pour l'environnementaliste affichait la valeur du terrain à chaque phase du jeu.

Cormas et Simulación

Le jeu SimCommod a été construit à partir de la plate-forme Simulación et du modèle CherIng sous Cormas. Une version initiale a été écrite par Patrick Taillandier et testée au LIP6. J'ai ensuite repris le projet pour l'adapter aux expériences menées à Tokyo puis à Bangkok.

Cormas est une plate-forme écrite en SmallTalk, un des premiers langages de programmation par objets. Dans SimCommod, les agents Simulación (les exploitants, l'environnementaliste, le gouvernement) ont des mandataires dans Cormas qui apparaissent comme de véritables agents Cormas.

La technique repose sur une propriété du langage SmallTalk. Lorsqu'un objet SmallTalk reçoit un message qu'il ne gère pas, SmallTalk réifie ce message et envoie un nouveau message, `doesNotUnderstand:`, avec le message original en paramètre. Par défaut, ceci conduit à l'affichage d'une fenêtre d'erreur. Les mandataires des agents Simulación dans Cormas sont des objets qui définissent uniquement le message `doesNotUnderstand:`. Lorsqu'un mandataire reçoit un tel message, le message est transmis par le réseau au mandant. Ceci est une description légèrement simplifiée. En réalité, l'intégration de Cormas et de Simulación fait appel à plusieurs aspects de la réflexivité du langage SmallTalk. Par exemple, la plate-

forme Comas accède aux méthodes de classe des entités et il faut donc définir `doesNotUnderstand`: pour les instances et pour la classe.

Cette technique permet de développer un modèle dans Comas puis de remplacer les agents logiciels par des agents Simulación pour transformer la simulation multi-agents en simulation multi-agents participative. Quelques lignes de SmallTalk suffisent pour la partie Comas. Il faut tout de même créer les interfaces Simulación pour chaque modèle.

4.3 L'agent assistant

Les simulations SimCommod-Bangkok ont été l'occasion de suivre la démarche ComMod en la doublant de l'introduction d'un agent assistant pour aider les participants à mieux expliciter leur connaissance du modèle et leurs stratégies individuelles.

4.3.1 Projet d'agent maïeutique

L'idée d'un agent maïeutique apparaît avec les expériences conduites par Minh Nguyen-Duc, appliquées à la gestion du trafic aérien [Nguyen-Duc *et al.*, 2005; Sempé *et al.*, 2005]. En posant des questions, l'agent maïeutique attaché à chaque contrôleur aérien l'aide à expliciter son comportement et à fournir des informations difficiles à obtenir par d'autres moyens.

Dans les expériences menées par Minh Nguyen-Duc, les relations entre l'agent assistant et l'expert sont conçues comme des relations tuteur/apprenti. L'assistant fait une proposition choisie dans un ensemble d'actions possibles, appelé *catalogue*. L'expert peut suivre cette proposition ou l'amender. Lorsque l'expert modifie la proposition, l'agent assistant lui demande d'expliquer la modification et pourquoi la proposition a été modifiée. La demande de justification est conçue pour aider l'expert à formuler son savoir-faire. L'expert doit d'abord identifier les entités (avions, balises, plans de vol, etc. dans le cas du contrôle aérien) qui sont les causes de sa modification puis il doit expliquer pour chaque entité pourquoi elle l'a conduit à modifier la proposition de

l'assistant.

4.3.2 Expériences de Bangkok

Une série de cinq expériences (*I*, *A1*, *B1*, *A2* et *B2*) ont été menées à l'Université Chulalongkorn à Bangkok pour déterminer dans quelle mesure un agent assistant maïeutique aide les participants à mieux comprendre et expliciter leurs stratégies. Pour ces expériences, l'interface de SimCommod a été traduite en thaï. Les joueurs, quatorze étudiants spécialisés dans la gestion de ressources renouvelables, ont été rémunérés pour participer.

La première séance (*I*) était consacrée à la présentation du jeu et à un premier tour pour que les joueurs se familiarisent avec l'interface graphique. Les joueurs étaient placés en binômes à des postes de travail. Les quatorze étudiants ont été répartis en deux groupes de sept, *A* et *B* (figure 4.7). Chaque groupe a participé à deux des quatre séances suivantes. Le groupe *A* a participé aux expériences *A1* et *A2* et le groupe *B* aux expériences *B1* et *B2*. Avec la séance initiale, chaque joueur a joué trois fois.



FIG. 4.7: En blanc, les participants de SimCommod à Bangkok (groupe *A*)

Chaque séance était composée de 45 minutes de jeu et de 15 minutes de verbalisation pendant lesquelles nous avons demandé aux joueurs de parler du jeu et de décrire leur stratégie.

4.3.3 L'agent assistant

L'agent assistant est toujours présent sur l'écran, dans le coin inférieur gauche (figure 4.8). Pendant les séances *A1* et *B1*, l'agent assistant était complètement inactif. Il ne faisait que cligner des yeux de temps en temps. Hérités de l'application SimCafé qui s'inscrivait dans le contexte particulièrement masculin du marché du café dans l'état de Veracruz, les assistants ont tous des noms et des visages masculins. Deux indices montrent que lors des premières séances, les joueurs ont donné un rôle à ce personnage. Les messages échangés entre eux mentionnent le nom des assistants (par exemple dans des messages comme "Bonjour Suthirak"). De plus, certains thèmes abordés dans la discussion entre les joueurs sont fondés sur l'hypothèse que certains personnages sont des hommes alors que sur les quatorze participants, douze étaient des étudiantes. Par exemple, l'étudiante qui avait choisi le personnage Suraphon interpellait l'environnementaliste (aussi joué par une étudiante) en écrivant : "Je vais tuer ta fille [si tu ne fais pas ce que je demande]". Puis, voyant que l'environnementaliste ne cédait pas, elle ajouta : "J'ai aussi ta femme avec moi". Cette dernière menace a suscité ce commentaire de la part d'une autre joueuse : "Suraphon est fou!".

Lors des séances *A2* et *B2*, les agents assistants sont devenus actifs. À l'image des agents maïeutiques de Minh Nguyen-Duc, ils faisaient des suggestions (figure 4.8) et demandaient aux joueurs pourquoi ils n'avaient pas suivi leurs conseils. Les agents assistants des exploitants les conseillaient en leur indiquant sur quelles cases envoyer leurs journaliers. Celui de l'environnementaliste suggérait des cases à protéger.

À la différence des agents maïeutiques de Minh Nguyen-Duc, les agents de SimCommod étaient dotés d'un mécanisme d'apprentissage. Très simple, ce mécanisme leur permettait d'élaborer une suggestion à partir des actions passées du joueur qu'ils assistaient.

4. LE JOUEUR, L'AGENT ET LE CHERCHEUR

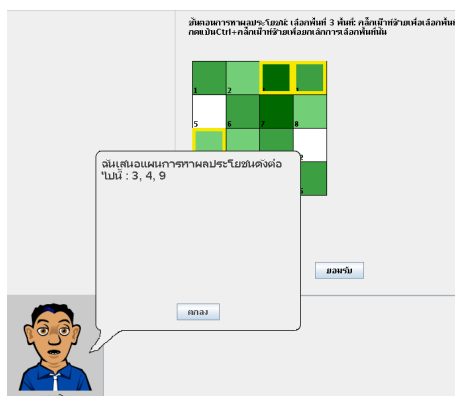


FIG. 4.8: L'agent assistant en train de faire une suggestion

L'agent assistant de l'exploitant

L'agent assistant de l'exploitant propose trois cases à exploiter. Au premier tour, les trois cases sont choisies aléatoirement. Cette stratégie est fondée sur une connaissance du jeu que n'ont pas les participants. Étant donné que l'espérance de gain est fonction inverse du nombre de joueurs sur une case, en l'absence de concertation, choisir trois cases aléatoirement est la meilleure stratégie individuelle.

À partir du deuxième tour, les trois cases proposées sont de la même couleur que les cases exploitées par le joueur au tour précédent.

Lors de la séance *A2*, la proposition pour le premier tour suivait une stratégie très naïve. Les six assistants des exploitants ont suggéré d'exploiter les trois cases les plus foncées (Figure 4.5). Parce qu'ils avaient déjà joué, les participants du groupe *A* savaient que cette stratégie était particulièrement inadéquate et cette proposition leur a donné l'impression que leur assistant était stupide.

Lors de la séance *B2*, la proposition pour le premier tour suivait une stratégie fondée sur une connaissance complète du jeu. Les six assistants ont chacun proposé trois cases, une de chaque nuance de vert, choisies aléatoirement. L'espérance de gain pour six joueurs suivant cette stratégie était maximale parce que la grille initiale (figure 4.2) comportait trois cases vert foncé (deux exploitants peuvent gagner des points sur ces cases) et six cases vert moyen.

Le fait que la suggestion du premier tour soit naïve ou réfléchie n'a pas eu d'effet significatif sur la propension des joueurs à suivre les conseils de leur assistant. Lors de la séance *A2*, les joueurs ont suivi la proposition dans 26% des cas contre 23% pour la séance *B2*.

L'agent assistant de l'environnementaliste

Les conseils de l'agent assistant de l'environnementaliste étaient conçus pour l'aider à maximiser la valeur de l'environnement. L'agent assistant proposait de placer les jetons rouges sur les n cases les plus foncées telles que la valeur de l'environnement serait maximale si les autres cases devenaient blanches. Pour le premier tour, l'agent assistant suggérait de placer les jetons sur quatre cases. Lors des tours suivants, le nombre de cases proposées était égal au nombre de cases où l'environnementaliste avait posé ses jetons au tour précédent.

L'agent assistant a sans doute influencé le comportement des environnementalistes. Avec les conseils de l'assistant, ils ont tenté de protéger moins de cases que lors des sessions précédentes. C'est une approche plus efficace car le gouvernement n'interdit l'exploitation que de trois cases ; en répartissant ses jetons rouges sur un grand nombre de cases, l'environnementaliste dilue son poids dans la négociation.

4.3.4 Verbalisation et discussion

Lors des expériences SimCommod, les capacités d'apprentissage de l'agent assistant étaient très limitées. Ceci était d'abord dû à une contrainte technique : il n'y avait pas assez de données pour permettre un apprentissage plus développé. Même si toutes les actions des joueurs étaient enregistrées, il n'était pas possible de généraliser le comportement d'un joueur et de l'adapter sur toute une partie (en général 5 ou 6 tours), surtout lorsque les joueurs ne sont pas des experts et tâtonnent faute de maîtriser les principes du jeu. Cependant, l'ajout d'un agent assistant doté d'une capacité d'apprentissage limitée a modifié de manière significative la compréhension et la perception du jeu.

4. LE JOUEUR, L'AGENT ET LE CHERCHEUR

Dans la mesure où l'agent assistant est suffisamment crédible, il aide les joueurs à formuler leur stratégie en leur demandant pourquoi ses propositions ne sont pas suivies, comme dans les expériences menées par Minh Nguyen-Duc. Répondre aux questions de l'agent assistant permet de mieux comprendre le jeu. Lors de la séance A2, une des joueuses a expliqué à son assistant qu'elle préférerait exploiter d'autres cases parce qu'elle pensait qu'il y aurait trop de compétition sur les cases vert foncé indiquées par l'assistant. Aucune information de ce genre n'avait été mentionnée lors des séances de verbalisation suivant les parties où l'agent assistant était resté passif.

La crédibilité de l'agent assistant est cependant mise à mal par le modèle du jeu lui-même. En l'absence de stratégie collective, l'environnement devient vert pâle voire blanc et, mécaniquement, le nombre de points gagnés décroît au cours de la partie. La plupart des joueurs n'ont pas anticipé ce phénomène et ont accusé leur assistant d'être responsable des mauvais scores. Par exemple, un étudiant a dit à son assistant :

“La dernière fois, j'ai suivi ton conseil, mais je n'ai eu aucun point. Cette fois-ci, je préfère ne pas faire comme tu suggères.”

L'agent assistant influe également sur la discussion lors des séances de verbalisation. Des joueurs ont remarqué que leur assistant ne proposait pas la meilleure action possible. En effet, sa proposition dépendait des actions passées du joueur. Il a été plus facile pour les participants d'expliquer comment améliorer les suggestions de l'assistant que de décrire une bonne stratégie pour le jeu.

De plus, les joueurs peuvent se sentir responsables de l'état de l'environnement à la fin de la partie, et en particulier de la faible quantité de ressource restant sur la carte. Les joueurs se sentent plus à l'aise vis-à-vis de cette situation lorsqu'ils peuvent se comparer aux agents assistants qui, leur semble-t-il, n'étaient pas très intelligents, et qui étaient conçus par les organisateurs.

Anticipation, connaissance commune et théorie des jeux

CherIng et SimCommod, comme SimBar, peuvent être légitimement considérés comme inspirés de la théorie des jeux [von Neumann et Morgenstern, 1944]. Le choix des cases à exploiter dépend du comportement des autres joueurs.

L'idée que la meilleure stratégie individuelle dépend de la stratégie des autres joueurs est en fait antérieure à la théorie inventée par John von Neumann et Oskar Morgenstern. On trouve cette idée dans le concours de beauté de la *Théorie Générale* imaginé pour expliquer la fluctuation des prix sur les marchés des actions [Keynes, 1936]. Keynes décrit une situation où des agents rationnels (au sens économique) participent à un concours organisé par un journal londonien. Le journal publie cent photos de femmes et les participants du concours doivent choisir les six photos des femmes qu'ils trouvent les plus belles. Le gagnant du concours sera tiré au sort parmi ceux qui auront choisi les six photos les plus populaires. La stratégie naïve, explique Keynes, est de choisir les six photos que l'on préfère. Une stratégie plus évoluée pour maximiser ses chances consiste à choisir les six photos que l'on pense correspondre à la majorité. La troisième stratégie est de choisir les six photos correspondant à ce que les autres pensent correspondre à la majorité. Keynes qualifie de stratégie du troisième degré l'anticipation de ce que l'opinion générale pense être l'opinion générale. Et il existe, pense-t-il, des acteurs qui adoptent des stratégies du quatrième voire du cinquième degré.

Ce type de série d'anticipation constitue le principe de la connaissance commune (*Common Knowledge*) [Lewis, 1969; Dupuy, 1992]. Il y a connaissance commune d'une proposition p dans un groupe d'agents lorsque tous les agents savent p , tous savent que tous savent p , tous savent que tous savent que tous savent p , etc.

Dans le cas de SimCommod, la meilleure stratégie consiste à ne pas jouer la même chose que les autres. Naïvement, les joueurs peuvent être conduits, lors de la première partie, à choisir les 3 cases les plus foncées. Tous les joueurs se rendent compte que c'est la pire des stratégies et certains choisissent d'exploiter d'autres cases. D'autres ont une stratégie du troisième degré et exploitent quand même une ou plusieurs cases vert foncé.

Les joueurs ayant participé à trois parties successives lors des expériences de Bangkok, nous avons pu y observer ce phénomène d'anticipation et de connaissance commune. Lors de la session A2, il est ressorti de la séance de verbalisation, ainsi que des échanges entre les joueurs et leur agent assistant, que tous les joueurs ont jugé trop naïve la suggestion initiale (exploiter les trois cases vert foncé). Tous savaient que c'était la pire des stratégies et tous savaient que tous savaient, c'est pourquoi certains ont quand même exploité des cases vert foncé.

4.4 Conclusion

Les expériences SimCommod ont montré que les simulations multi-agents participatives sont une alternative crédible à l'approche MAS/RPG pour le domaine de la modélisation d'accompagnement. Dans l'approche MAS/RPG, les individus explicitent leurs comportements à travers des jeux de rôles qui les forcent à prendre des décisions dans un environnement simulé, et à travers des séances de verbalisation où ils restituent leur expérience de la simulation. Les expériences de simulations multi-agents participatives vont plus loin en enregistrant la totalité des échanges et des actions des participants.

De plus, les expériences SimCommod-Bangkok ont été l'occasion d'introduire des agents assistants dotés de capacités d'apprentissage limitées. Ces agents ont facilité la discussion et ont permis aux participants de mieux expliciter leur comportement et leur compréhension du jeu.

Les simulations multi-agents participatives permettent d'une part de valider des modèles de comportements collectifs, et d'autre part de faire expliciter les stratégies individuelles des joueurs aussi bien lors de leur interaction avec l'agent assistant que lors des séances de verbalisation. Cependant, pour concevoir un système multi-agents à partir de ce que les joueurs ont rendu explicite, il faut pouvoir traduire leur discours et leurs explications en algorithmes. Dans le domaine des systèmes multi-agents, il est relativement classique d'avoir recours à la théorie des jeux pour formaliser ce type de stratégies individuelles [Axelrod, 1997b; Sandholm et Crites, 1995]. Le chapitre suivant explore la possibilité de faire correspondre l'explication donnée par les joueurs de leurs stratégies individuelles dans le cadre de comportements collectifs, à des théories formelles comme la théorie des jeux.

5 Apports de l'économie expérimentale pour l'étude des comportements collectifs

L'observation, et même les méthodes permettant de faire expliciter les stratégies individuelles par les acteurs, ne suffisent pas pour construire directement un système informatique qui reproduit les comportements collectifs. Un modèle formel est nécessaire. Pour cette raison, un certain nombre de systèmes multi-agents sont conçus non pas à partir d'observations de première main, mais à partir de modèles formels des sciences sociales et en particulier de l'économie et de la théorie des jeux [Sandholm et Crites, 1995; Axelrod, 1997b; Ito et Parkes, 2006; Phelps *et al.*, 2006].

La théorie économique a donné naissance à un courant méthodologique, l'économie expérimentale, qui procède de manière parallèle à la méthode MAS/RPG. Cette méthode permet en particulier de tester l'impact des institutions sur les comportements des joueurs humains [Smith, 1989]. Ce sont les mêmes institutions qui servent de fondement à certains modèles de systèmes multi-agents.

La question traitée dans ce chapitre est la possibilité d'utiliser les méthodes de l'économie expérimentale pour concevoir des systèmes multi-agents à partir de simulations multi-agents participatives. Pour répondre à cette question, ce chapitre détermine quelles sont les conditions pour qu'émergent des comportements collectifs entre les participants d'expériences de simulations multi-agents participatives. En particulier,

le point développé dans ce chapitre sous la forme d'une série de résultats est que les méthodes de l'économie expérimentale sont trop restrictives pour permettre d'observer et d'analyser des comportements collectifs complexes qui ne reposent pas sur les institutions économiques. Néanmoins l'application de certains préceptes de l'économie expérimentale a abouti à une remise en cause des protocoles de négociation entre les agents.

La première partie de ce chapitre décrit la théorie et les méthodes de l'économie expérimentale. Ce cadre théorique et méthodologique comprend deux prescriptions qui prennent le contre-pied de la méthode MAS/RPG : les joueurs ne doivent pas communiquer, et les notions doivent être présentées sous la forme de symboles abstraits. La seconde partie présente les expériences SimBar qui constituent une analyse, à partir d'un problème de la théorie des jeux, de la nécessité de laisser les joueurs communiquer pour qu'émergent des comportements collectifs. La troisième partie du chapitre décrit les expériences SimCommod-Tokyo. Ces expériences ont révélé que lorsque les joueurs ont la possibilité de communiquer mais que les notions en jeu sont présentées de manière abstraite comme le préconise l'économie expérimentale, des termes concrets émergent dans les discussions entre les joueurs. Ces termes créent des relations de pouvoir et leur émergence fournit des pistes pour concevoir et modifier les protocoles de négociation entre les agents.

5.1 L'économie expérimentale

L'économie expérimentale est beaucoup plus ancienne que les techniques multi-agents et que l'ensemble des techniques participatives décrites jusqu'ici. Les premières expériences de Vernon Smith datent de janvier 1956 [Smith, 1989]. Un petit nombre de chercheurs aux États-Unis et en Allemagne ont conduit des expériences similaires entre les années 1950 et les années 1970.

5.1.1 Le “modèle du domaine” et l'économie expérimentale

Certain termes des simulations multi-agents sont aussi utilisés en économie expérimentale, parfois avec un sens très différent. La notion d'agent en économie expérimentale représente des entités qui échangent des produits et des ressources et qui communiquent (ils émettent et reçoivent des messages) [Smith, 1982].

La conception de simulations multi-agents passe par l'élaboration de plusieurs modèles (modèle du domaine, modèle de conception, modèle opérationnel) mais dans ce contexte, le terme de modèle reste relativement flou. Ce terme recouvre un concept très précis en économie : c'est une construction théorique qui représente les processus économiques par un ensemble de variables et par des relations logiques ou quantitatives entre elles. Ce que nous appellerions “modèle du domaine” repose, dans le cas de l'économie expérimentale, sur cinq concepts¹ :

L'environnement économique est l'ensemble de ce qui est donné et qui échappe à l'économie expérimentale : techniques de production, contraintes imposées par les ressources, etc. Il comprend également les propriétés des agents. Parce que les agents des économistes sont des entités qui se limitent à communiquer, produire et échanger des biens, leurs propriétés sont les biens dont ils disposent initialement, ce qu'ils préfèrent (leur fonction de préférence) et comment ils transforment les ressources en produits avec leur travail (leur fonction de production). La notion d'environnement économique est à cet égard très éloignée de celle d'environnement dans les systèmes multi-agents.

L'institution régit les interactions entre les agents. Elle recouvre essentiellement les règles et les normes qui déterminent comment les agents peuvent se comporter et communiquer entre eux. Dans le cas d'expériences appliquées aux enchères, le type

¹Les cinq concepts décrits ici (environnement, institution, comportement, messages et résultats) correspondent à ce qui est décrit notamment par Vernon Smith sous les termes anglais *environment*, *institution*, *behavior*, *messages* et *outcomes* [Smith, 1982, 1994].

de l'enchère (hollandaise², anglaise³, etc.) fait partie de l'institution.

Le comportement est ce qu'un agent décide de faire en fonction de l'environnement et de l'institution, c'est-à-dire de ses propriétés et des pratiques autorisées. La distinction entre le comportement et l'environnement ne suit pas la distinction de la programmation objet entre les données et le code. Dans une modélisation informatique orientée objet de l'agent économique, la dotation initiale de ressources serait une donnée, mais le comportement, la fonction de préférence et la fonction de production seraient représentés par du code.

Les messages sont ce que les agents économiques émettent lorsqu'ils communiquent⁴. Ce concept est relativement parallèle au concept homonyme dans les systèmes multi-agents, où toutes les interactions se font sous la forme d'envoi de messages, mais il y a deux différences importantes. D'une part, la notion de message en économie expérimentale est restreinte à l'échange d'informations entre les joueurs. Les agents peuvent aussi s'échanger des produits négociés. Les messages sont ce que les agents s'envoient lorsqu'ils participent aux négociations ; par exemple, enchérir consiste à envoyer un message. D'autre part, les messages sont échangés à travers l'institution qui est le plus souvent centralisée et qui détermine la forme qu'ils prennent.

Enfin, les résultats d'une expérience désignent les prix des biens et leur répartition entre les agents, tels qu'ils peuvent être observés par les organisateurs à la fin de l'expérience.

²L'enchère hollandaise est un type d'enchère utilisé pour la vente des tulipes hollandaises au XVII^e siècle. Le prix décroît (jusqu'à un prix minimum fixé initialement) et la vente est conclue dès qu'un acheteur accepte le prix courant.

³L'enchère anglaise est la forme d'enchères la plus connue. Le prix croît. Les acheteurs enchérissent en proposant un prix plus élevé que le prix courant. L'enchère s'arrête dès qu'aucun acheteur ne surenchérit et la vente est conclue avec l'acheteur qui a proposé le prix le plus élevé.

⁴Cette présentation s'inspire des travaux de Vernon Smith pour qui l'échange de messages à travers les institutions est l'élément le plus important de l'économie expérimentale. Tous les économistes ne partagent pas ce point de vue.

5.1.2 L'importance de l'institution

L'objectif des expériences de l'économie expérimentale est d'étudier ce que les économistes appellent le comportement des agents économiques. La méthode consiste à fixer l'environnement et les règles (l'institution) puis à observer les résultats. En d'autres termes, l'économie expérimentale s'intéresse à l'impact des décisions individuelles (le comportement) sur le prix et la répartition des biens.

Un des premiers apports de l'économie expérimentale à la théorie économique est d'avoir révélé l'importance de l'institution : elle agrège les comportements des agents économiques et les transforme en prix [Smith, 1982]. En effet, les expériences de laboratoire sur les enchères montrent que le comportement des agents dépend de la manière dont les règles de l'institution transforment leurs messages en résultats. Par exemple, le résultat des enchères hollandaises et anglaises est différent : le prix final est plus élevé dans le cas d'une enchère hollandaise que dans le cas d'une enchère anglaise [McCabe *et al.*, 1990]. L'efficacité, mesurée en termes d'impact de mauvaises informations, de stabilité du prix, d'adaptation aux changements de l'environnement et de rapidité de la convergence, dépend aussi de l'institution [Plott et Smith, 1978]. De plus, les agents enchérissent différemment en fonction de la transformation de leurs actions en résultats. Ils peuvent être preneurs de prix (*price-taker*) ou fixeurs de prix (*price-maker*).

D'après Vernon Smith, la découverte par l'économie expérimentale de l'importance de l'institution est la cause d'un changement dans la théorie économique. Il parle d'une transition, dans les années 1960, d'une théorie économique faisant abstraction de l'institution (*Institution-Free Theory*) à une théorie économique prenant en compte l'institution (*Institution-Specific Theory*). La figure 5.1 résume cette transition.

⁵La *forme extensive* est la spécification d'un jeu de la théorie des jeux. C'est un arbre de décision qui décrit, pour chaque étape du jeu, les actions possibles des joueurs, les informations dont ils disposent et les gains des différentes actions. La *structure de la forme extensive* est la structure de cet arbre. De manière moins formelle, l'institution inclut les actions possibles des joueurs en fonction des actions des autres joueurs. Par exemple, dans une enchère anglaise, un agent ne peut pas proposer un prix inférieur à l'enchère actuelle.

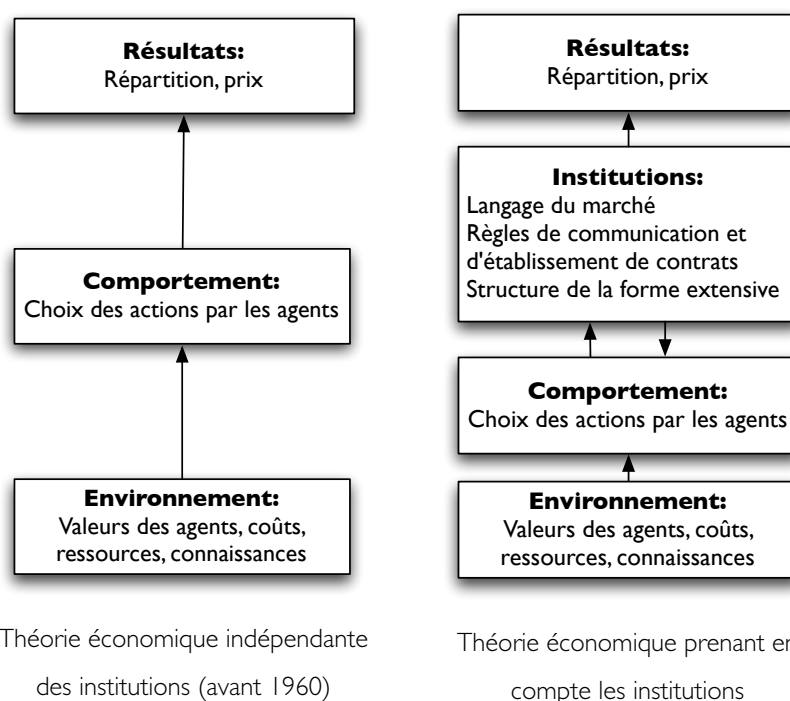


FIG. 5.1: Les institutions dans la théorie économique⁵ (d'après Smith [1989])

Les économistes continuent de faire des expériences pour déterminer l'efficacité et l'impact des institutions sur la formation des prix et sur la répartition des biens comme le montre un rapport récent [Capra *et al.*, 2005].

5.1.3 Test, échec des théories et conception participative

Les économistes ont plusieurs objectifs quand ils recourent aux expériences en laboratoire.

Le cadre analytique de l'économie néo-classique est le résultat de l'appropriation des méthodes de la physique du XIX^{ème} siècle par les économistes afin de se conformer à une certaine idée de la science [Mirowski, 1989]. Le premier objectif de l'économie expérimentale est inspiré de cette conception de la science et du rôle qu'y jouent les expériences. Pour les économistes, celles-ci permettent de tester les théories économiques ou de faire varier l'environnement et l'institution, conçus comme les paramètres d'un protocole de test; elles permettent aussi de découvrir de nouveaux

modèles.

Dans les faits, les participants ne se comportent pas toujours comme le prédit la théorie. Colin Camerer et Ernst Fehr relatent des expériences conduites pour mesurer les préférences, dont les résultats étaient contraires à la théorie micro-économique [Camerer et Fehr, 2003]. En 1952, plusieurs chercheurs ont organisé des expériences inspirées de la théorie des jeux. Les résultats se sont révélés incohérents avec la théorie économique [Kalisch *et al.*, 1954]. John F. Nash, prix Nobel d'économie 1994 pour son travail sur la théorie des jeux, était au nombre de ces chercheurs. Son faible intérêt pour l'économie expérimentale dans la suite de sa carrière s'expliquerait par un découragement face aux résultats obtenus lors de ces premières expériences [Nasar, 1998].

Les économistes ne remettent pas toujours en cause la théorie lorsque les expériences la contredisent. Au contraire, l'incohérence des résultats est théorisée, voire invoquée comme justification de l'économie expérimentale : lorsque les résultats sont incohérents, c'est qu'il faut faire plus d'expériences [Smith, 1994]. Le choix de donner plus de poids à la théorie qu'aux expériences s'appuie sur la thèse de Duhem-Quine ou "holisme épistémologique". Cette thèse stipule qu'il n'est pas possible de réfuter une théorie par un simple test car il est toujours possible de justifier la théorie *ex post*, en recourant à des hypothèses auxiliaires. Tout test expérimental est intrinsèquement le test d'une théorie et d'hypothèses auxiliaires, et à la fois celui de la conception et de la conduite de l'expérience. Le premier réflexe lorsqu'une expérience ne correspond pas à la théorie est d'en chercher les causes dans l'organisation de l'expérience, ou dans des hypothèses négligées. Par exemple, la rémunération des participants dépend de leurs gains dans le jeu. Une des hypothèses fréquemment négligées est l'impact des montants en jeu, comme montré par des expériences de Vernon Smith [Smith et Walker, 1993]. Colin Camerer explique l'échec des expériences de 1952, notamment, par les faibles gains des participants [Camerer, 2003].

La thèse de Duhem-Quine prend une dimension particulière en économie expérimentale. Elle a été au centre d'une importante polémique lorsque Glenn Harrison a critiqué l'ajout d'hypothèses auxiliaires pour expliquer les incohérences entre les expé-

riences et la théorie économique [Harrison, 1989; Hey, 1991; Harrison, 1992; Smith et Walker, 1993]. Concluant cette polémique, certains mettent en garde contre un usage abusif de cette thèse qui permet de dire tout et son contraire [Smith, 1994].

Les économistes revendiquent également l'utilisation des expériences dans une démarche de conception participative. Les expériences permettent de tester de nouveaux types d'institution et de concevoir des politiques publiques. Colin Camerer et Eric Talley comparent cet usage des expériences à la mise au point des ailes d'avion dans une soufflerie [Camerer et Talley, 2005]. Le choix de cette métaphore trahit le rapports des économistes aux participants des expériences de conception participative : ils considèrent qu'ils ne sont pas influencés par les expériences.

5.1.4 Les méthodes

Pour Colin Camerer, le nombre restreint des équipes jusque dans les années 1970 explique le fait que l'économie expérimentale se soit dotée assez rapidement d'une méthode et de conventions claires qui permettent de comparer les résultats. Plusieurs auteurs décrivent cette méthode et ces conventions [Camerer, 2003; Camerer et Talley, 2005; Friedman et Sunder, 1994]. Ces méthodes peuvent servir d'inspiration pour construire des simulations multi-agents participatives.

Les données

Par convention, la plupart des articles de la discipline contiennent des données brutes⁶. Colin Camerer présente ce fait comme un gage de scientificité par rapport à d'autres disciplines comme la psychologie. Il écrit :

Un psychologue à qui on demanderait les données de ses expériences, ou des détails pour les reproduire, se sentirait sans doute insulté, parce qu'il est de coutume dans son domaine d'accorder aux auteurs le bénéfice du

⁶Pourtant, les seules "données brutes" que j'ai trouvées dans les articles sont des graphes ou des descriptions de protocoles expérimentaux.

doute. [Camerer, 2003, p. 34, TdA]⁷

Les participants

Les participants sont souvent des étudiants rémunérés. La rémunération est justifiée de la façon suivante : pour que l'expérience fonctionne, il faut que l'enjeu soit réel [Smith, 1962]. De nos jours, le recrutement des participants se fait par Internet. Par exemple, la page d'accueil du Centre Interdisciplinaire pour la Science Économique de l'Université George Mason (*Interdisciplinary Center for Economic Science at George Mason University*) invite actuellement les étudiants à s'inscrire en ligne :

Étudiants de George Mason, si vous voulez gagner de l'argent en participant à une expérience économique, inscrivez-vous sur notre système de recrutement en ligne. Vous recevrez par courrier électronique des invitations pour participer à des expériences compatibles avec votre emploi du temps. [<http://www.ices-gmu.org/>, 01/2003-05/2006, TdA]⁸

Même si les économistes ne prétendent pas faire de la sociologie, ils remarquent et analysent des différences en fonction de la catégorie sociale des participants. Par exemple, ils notent que le résultat des expériences diffère lorsque les participants sont des salariés, des étudiants en économie ou des étudiants dans une autre discipline. Quelques recherches se sont aussi intéressées à des populations spécifiques comme les autistes [Hill et Sally, 2002]. Des études comparatives entre différentes populations montrent que les membres de petites sociétés ne se comportent pas comme le prédit la théorie en termes de rationalité [Henrich *et al.*, 2001]. Ces études sont cependant présentées, et perçues dans la discipline, comme étant largement inspirées de l'anthropologie, et les économistes considèrent que des étudiants, y compris des étudiants en économie, sont des participants adéquats pour leurs expériences.

⁷"If you asked a psychologist for data or instructions he or she might be insulted, because the convention in that field is to give the writer the benefit of the doubt."

⁸"If you are a George Mason University student and are interested in earning cash in an economic experiment, please sign up with our online recruiter. You will receive e-mail invitations to participate in experiments that fit your schedule."

Les effets de bord

Pour éviter des effets non contrôlés, les jeux sont anonymes. Les participants ne jouent qu'une seule fois à un jeu, et il n'y a aucune communication verbale entre les joueurs. Des études ayant montré que les joueurs se comportaient différemment en fonction du vocabulaire employé, les jeux sont décrits avec des symboles abstraits [Andreoni, 1995].

Colin Camerer note également qu'il est tabou de tromper les joueurs [Camerer, 2003]. Pour la bonne conduite des expériences, les participants doivent croire l'information qui leur est fournie et la crédibilité des organisateurs ne doit pas être affectée sur le long terme. Des concepts de la théorie économique sont mobilisés pour justifier ce tabou. Les expériences et les séances de verbalisation que j'ai menées confirment l'importance de la crédibilité des organisateurs.

Valeur statistique

Les chercheurs en économie expérimentale conduisent un grand nombre d'expériences (plusieurs dizaines avec à chaque fois des joueurs différents). Sans toujours l'indiquer explicitement, leur approche est fondée sur l'idée qu'un petit nombre d'expériences ne permet pas de valider un résultat et qu'il faut atteindre un seuil statistiquement significatif.

5.1.5 Economie expérimentale et simulations multi-agents

Dans le domaine de l'économie, l'économie expérimentale et les simulations multi-agents sont parfois considérées comme complémentaires. Comme les chercheurs du réseau ComMod avec la démarche MAS/RPG, les économistes utilisent les expériences pour concevoir les simulations, et les simulations pour concevoir les expériences.

Deux approches complémentaires

Les simulations multi-agents sont utilisées en économie. Cette approche porte le nom d'économie informatique orientée agent (*Agent-based Computational Econo-*

mics) [Tesfatsion, 2001]. Les simulations permettent de tester des modèles dérivés de l'observation de comportements économiques ou de la théorie économique.

Dans certains cas, les simulations sont combinées aux expériences, avec la même démarche que l'approche MAS/RPG. Les simulations sont utilisées pour calibrer les expériences ou pour valider des modèles élaborés à partir de l'observation des expériences. Les simulations permettent également de comprendre pourquoi les comportements observés lors d'une expérience ne correspondent pas à la théorie. Juliette Rouchier et Stéphane Robin ont construit une simulation multi-agents d'un marché organisé selon une institution de double enchère⁹, pour analyser comment les perceptions du prix du marché influencent les stratégies individuelles et collectives [Rouchier et Robin, 2006].

De nombreux travaux de ce domaine s'intéressent au modèle Kiyotaki-Wright d'émergence de la monnaie [Kiyotaki et Wright, 1989], et en particulier à l'émergence de comportements spéculatifs. Dans un article de 2001, John Duffy présente ses expériences et ses simulations fondées sur ce modèle [Duffy, 2001]. Il cite un certain nombre d'études similaires et fait deux remarques éclairantes sur l'usage complémentaire des simulations multi-agents et des expériences en laboratoire pour l'économie. Tout d'abord, il remarque que les simulations multi-agents décrites dans les articles qu'il cite mettent en œuvre beaucoup plus d'agents, et pour une période beaucoup plus longue, qu'il n'est possible avec des joueurs pour une expérience en laboratoire. De plus, les agents dans les simulations ont souvent la possibilité de communiquer ou bien directement, ou bien, lorsqu'ils sont créés par un algorithme évolutionniste¹⁰, via leur information génétique¹¹. Pour éviter d'introduire un biais, ce n'est pas le cas dans

⁹La double enchère est un type d'enchère où les vendeurs et les acheteurs font des propositions de prix. Ce type d'enchère est utilisé pour des biens identiques possédés par plusieurs vendeurs et qui intéressent plusieurs acheteurs, par exemple pour les actions ou les obligations sur les marchés financiers.

¹⁰Le principe des algorithmes évolutionnistes est présenté dans l'encadré page 99.

¹¹L'assimilation d'un algorithme évolutionniste à de la communication entre des agents est séduisante intellectuellement, mais pour qu'un tel algorithme fonctionne, il faut que la population ait une taille suffisante, bien supérieure au nombre de participants des expériences relatées (au maximum 30 joueurs). De

les expériences avec des joueurs. L'auteur en conclut que les résultats des simulations multi-agents sont en général difficilement comparables avec ceux des expériences en laboratoire.

Agents logiciels pour fixer une variable

John Duffy présente une simulation multi-agents élaborée à partir d'éléments observés lors d'une première série de 25 expériences en laboratoire avec 636 participants [Duffy et Ochs, 1999]. Dans ce modèle, il existe trois types de biens et trois types d'agents économiques. Les agents d'un type donné produisent un bien et en consomment un autre. Les agents sont appariés aléatoirement par le système avec des agents d'un autre type et décident ou non d'échanger des biens entre eux. La seule interaction entre les agents consiste à accepter ou à refuser l'échange.

La simulation multi-agents permet à John Duffy de proposer plusieurs hypothèses et de construire un modèle prédictif qu'il vérifie avec une autre série d'expériences mêlant agents logiciels et joueurs humains. Les joueurs humains prennent le rôle des agents économiques d'un des trois types et l'ordinateur simule les agents économiques des deux autres types, en suivant une stratégie déterministe. L'avantage de cette approche est qu'elle fixe une variable pour étudier le comportement des joueurs : ils n'échangent des biens qu'avec des agents logiciels dont le comportement est connu.

Même si les résultats de John Duffy ont été contestés, notamment par Juliette Rouchier qui estime qu'ils ne sont pas reproductibles en laboratoire [Rouchier, 2003], ses expériences sont les plus anciennes que j'ai trouvées qui revendiquent l'approche multi-agents et qui mêlent agents logiciels et participants humains.

Impact de la présence d'agents logiciels

Dans un article de 2003, Jens Grossklags et Carsten Schmidt présentent une série de 18 expériences avec 108 participants, mêlant agents et joueurs [Grossklags et

plus, les comportements réels ne peuvent pas être comparés avec des simulations mettant en œuvre des agents dont certaines facultés sont créées par une méthode évolutionniste.

Schmidt, 2003]. La simulation est celle d'un marché organisé selon une institution de double enchère continue. Ils ont mené trois types d'expériences. Dans le premier cas, les joueurs ont joué seul. Dans le second cas, ils ont joué avec des agents logiciels mais sans le savoir. Les auteurs considèrent explicitement qu'ils ont respecté le principe de l'économie expérimentale de ne pas mentir aux joueurs en leur cachant cette information. Dans le troisième type d'expériences, les joueurs ont joué avec des agents et en étaient informés.

Les agents logiciels introduits par ces auteurs ont un comportement d'"*arbitragiste*". L'arbitrage consiste à exploiter une différence de prix entre deux marchés afin de dégager un profit sans prendre de risque. Les arbitragistes sont considérés comme bénéfiques dans la théorie économique ; ils influent sur les marchés en effaçant des distorsions et en accélérant le retour à l'équilibre.

Les expériences montrent que le marché est plus efficace, c'est-à-dire qu'il converge plus rapidement à l'équilibre, dans le cas où les participants jouent avec des agents logiciels et le savent, que lorsqu'ils jouent sans agents logiciels. Ce résultat est conforme à la théorie économique puisque les agents se comportent comme des arbitragistes. La découverte la plus surprenante de ces auteurs est que le marché est le moins efficace lorsque les joueurs ne savent pas que des agents participent. Ce résultat n'est malheureusement pas analysé, bien qu'il soit un premier pas vers des recherches sur l'impact de la présence publique ou cachée d'agents logiciels. Les auteurs notent cependant qu'il y a de grandes variations dans leurs observations entre les différentes expériences. En remarquant que c'est fréquemment le cas dans la littérature, ils sous-entendent que leur résultat n'est peut-être pas valide.

5.2 SimBar

Les expériences de simulations multi-agents participatives SimBar ont été conduites pour analyser la possibilité de la formation de comportements collectifs dans un problème difficile de la théorie des jeux, tout en adoptant les méthodes de l'économie expérimentale. Le modèle sur lequel sont fondées ces expériences a été l'objet de

plusieurs études à l'aide de simulations informatiques.

5.2.1 Le bar El Farol

Le modèle des expériences SimBar est inspiré du problème du “bar El Farol”, imaginé par l'économiste Brian Arthur du Santa Fe Institute [Arthur, 1994].



FIG. 5.2: Bar El Farol, Santa Fe, Nouveau Mexique

El Farol est la *cantina* la plus ancienne de Santa Fe (figure 5.2). Ce bar est connu pour son animation musicale et en 1994, on y jouait de la musique irlandaise tous les jeudis soirs.

Le problème du bar El Farol est le suivant : chaque semaine, N agents doivent décider, indépendamment, d'aller ou non au bar El Farol le jeudi soir. Le bar a une taille limitée et les agents ne profitent de leur soirée au bar que s'il n'est pas trop plein. L'agent qui se retrouverait seul au bar le jeudi soir passerait tout de même une bonne soirée, profitant du concert. Le seuil arbitraire fixé est tel que si moins de 60% des N agents vont au bar, ils y passeront une meilleure soirée que chez eux. À chaque tour, il est impossible de savoir à coup sûr combien d'agents iront au bar. Par conséquent, chaque agent décide d'aller au bar en fonction de son estimation du

comportement des autres : il ira s'il estime que moins de 60% d'agents iront et restera chez lui dans le cas contraire. Le choix et l'utilité¹² des agents ne sont pas affectés par leurs visites précédentes au bar (ils ne se lassent pas de la musique irlandaise). Il n'y a pas de communication entre les agents ; la seule information disponible est le nombre d'agents qui sont allés au bar lors des semaines précédentes.

La question que pose le problème du bar El Farol est celle de la convergence de la fréquentation du bar autour de 60%. L'intérêt de ce modèle est l'absence de solution collective, car il n'est pas possible de prédire le nombre d'agents qui iront au bar, et il n'existe pas un modèle correct de la fréquentation du bar auxquels tous les agents pourraient se fier. Les comportements doivent diverger. Si tous les agents estiment que peu d'agents iront au bar, tous iront. Si tous les agents estiment que le bar sera plein, aucun n'ira.

Le modèle du bar El Farol constitue un problème particulièrement délicat sans solution a priori et sans stratégie gagnante. La somme des utilités des joueurs est maximale lorsque le bar n'est pas trop plein, et les joueurs doivent collaborer pour trouver une solution collective. Ce problème constitue un bon test pour déterminer les conditions d'émergence de comportements collectifs.

5.2.2 Simulations informatiques

Fonctions de prédiction

Dès l'origine, le problème a été analysé à l'aide de simulations informatiques. La simulation de Brian Arthur est fondée sur un modèle relativement simple de raisonnement des agents [Arthur, 1994]. Il crée un ensemble de fonctions de prédiction : même fréquentation que la semaine précédente, moyenne sur les quatre dernières semaines, même fréquentation qu'il y a 5 semaines, etc. Il distribue à chaque agent un nombre k de fonctions de prédiction choisies aléatoirement dans cet ensemble. Chaque agent teste les fonctions de prédiction dont il dispose et prend sa décision en adoptant la

¹²L'utilité est un concept d'économie qui représente la mesure du bien-être ou de la satisfaction des agents apportés par la consommation de biens ou de services.

fonction de prédiction qui a le mieux prédit la fréquentation des semaines passées.

Dans la simulation de Brian Arthur, la fréquentation converge autour de 60%. Ce résultat s'explique analytiquement. 60% est le seul *attracteur* du modèle, c'est le point où la somme des utilités des agents est maximale. Par conséquent, le système ne peut converger que vers 60%. De plus, le système converge parce que toutes les fonctions de prédiction sont surjectives, et la fréquentation peut être perçue comme une combinaison linéaire de ces fonctions où les coefficients dépendent du choix des agents, c'est-à-dire de la qualité de la prédiction. L'apprentissage des agents revient à ajuster les coefficients associés aux fonctions de prédiction.

Apprentissage et rationalité

Un certain nombre d'autres travaux sur le problème du bar El Farol sont partis des hypothèses selon lesquelles le raisonnement de tous les agents est identique, et les agents ont la possibilité de faire des tirages au sort. Amy Greenwald a ainsi montré que la fréquentation ne converge pas lorsque les agents sont tous rationnels et que leurs prédictions sont fondées sur un algorithme d'apprentissage [Greenwald *et al.*, 1998]. En particulier, si la prédiction de la fréquentation converge, les agents sont face à un paradoxe dû à l'effet de seuil. Le bar n'est pas trop plein s'ils restent chez eux et il est trop plein s'ils y vont.

Cet auteur a effectué des simulations où les agents ont parfois un comportement irrationnel. Dans ces simulations, après quelques itérations, 60% des agents vont au bar. Amy Greenwald y voit une confirmation de l'idée que la rationalité et la prédiction adaptative sont incompatibles avec la convergence, mais que la prédiction adaptative seule suffit pour que la fréquentation converge.

Dans un article ultérieur, Julie Farago, Amy Greenwald et Keith Hall relatent le résultat de simulations suivant plusieurs modèles où les agents ont recours à un tirage au sort : jeu fictif (*fictitious play*), apprentissage sans regret (*no-regret learning*) et apprentissage Q (*Q-learning*) [Farago *et al.*, 2002]. Dans le cas du jeu fictif, le système converge rapidement vers un équilibre où 60% des agents vont tout le temps au bar et 40%

restent chez eux. Dans les autres cas, la fréquentation oscille autour de 60%.

Le biais de ces simulations est qu'elles reposent sur un modèle unique pour tous les agents. On se trouve alors mécaniquement dans l'un des trois cas révélés par les multiples simulations effectuées : les agents se comportent tous de la même manière et le système oscille autour de 60% mais l'aléa est tel que l'équilibre est inefficace, ou bien le modèle crée une différenciation assez rapide fondée sur l'aléa et seulement 60% des agents vont au bar, ou encore les agents ne sont pas rationnels.

Algorithmes évolutionnistes et programmation génétique

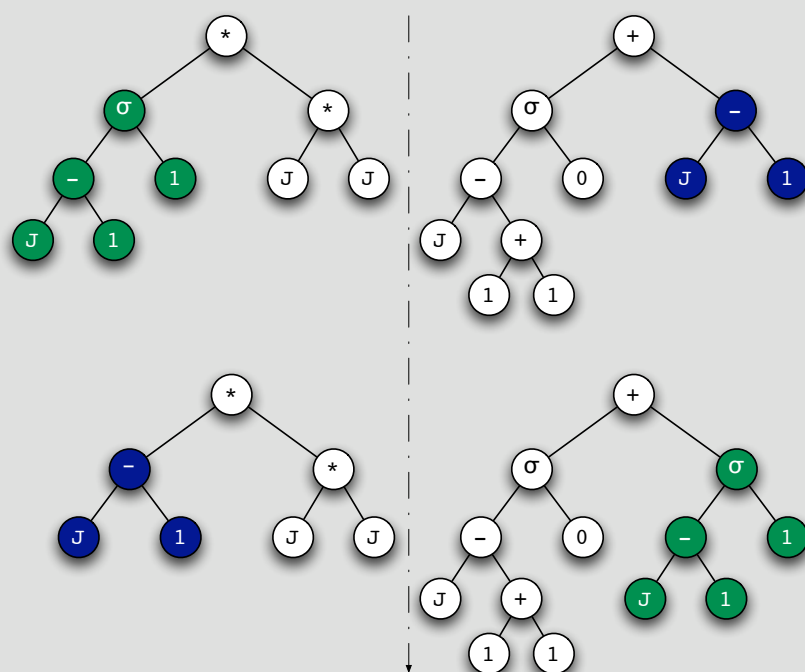
Les algorithmes évolutionnistes sont des algorithmes d'apprentissage notamment utilisés dans le cas où d'autres algorithmes se révèlent inefficaces. Ils tirent leur nom d'une analogie avec la théorie de l'évolution de Darwin et ils ont été popularisés par John H. Holland avec un article dans *Scientific American* où il écrit : "Des programmes informatique qui "évoluent" de manière similaire à la sélection naturelle peuvent résoudre des problèmes complexes que même leurs créateurs ne peuvent pas comprendre" [Holland, 1992, 1975].

Indépendamment de ton prométhéen de cette idée, les algorithmes évolutionnistes sont effectivement à l'origine d'une série de résultats significatifs. John R. Koza, l'inventeur de la programmation génétique, présente des systèmes artificiels (comme des circuits électriques ou des algorithmes) conçus par ordinateur qui sont aussi sinon plus efficaces que ceux conçus par l'homme [Koza *et al.*, 1999]. De la même manière, David Filliat, Jérôme Kodjabachian et Jean-Arcady Meyer ont créé un système capable de mettre au point un algorithme de marche pour un robot à six pattes [Filliat *et al.*, 1999]. Ce type de résultats encourage certains chercheurs à rêver de la découverte par l'ordinateur de la solution de problèmes ouverts de l'informatique théorique, tels $P = NP$.

Pourtant, le fonctionnement de ces algorithmes et les conditions pour qu'ils convergent vers une solution, sont connus et commencent à être théorisés [Luke, 2000a]. Les algorithmes évolutionnistes consistent à explorer un espace de recherche et à déterminer une ou plusieurs solutions qui maximisent une fonction d'évaluation donnée. Les éléments de l'espace de recherche, appelés individus, ont tous la même structure. Par exemple, ces individus peuvent être des règles de décision ou de classement représentées par une chaîne de 0 et de 1.

L'algorithme dépend d'opérateurs génétiques. On peut se contenter de deux opérateurs : la mutation (modification aléatoire d'un individu) et le croisement (créa-

tion d'un individu à partir de deux individus, aussi appelés parents). La méthode commence par la création aléatoire d'un ensemble d'individu, la population. À chaque itération, les individus de la population sont évalués avec la fonction d'évaluation. Quelques solutions sont choisies parmi celles qui ont la meilleure évaluation et, à partir de ces solutions, on crée de nouvelles solutions par mutation ou par croisement. Les nouvelles solutions ainsi créées remplacent les solutions les moins efficaces de l'ensemble de départ. Au bout de plusieurs itérations, appelées générations par les auteurs pour coller au vocabulaire de la sélection naturelle, l'ensemble des solutions comporte des solutions relativement efficaces.



Croisement dans la programmation génétique (d'après Koza [1989])

La programmation génétique est une variante des algorithmes évolutionnistes [Koza, 1992]. Les solutions ont la forme de programmes dans un langage fonctionnel (LISP). Elles sont représentées par des arbres. Les nœuds des arbres sont des symboles LISP, par exemple des constantes pour les feuilles ou des opérations comme (+), (and), (cdr), (car), etc. L'opérateur de croisement consiste à échanger une branche de l'arbre avec une autre; celui de mutation fonctionne par remplacement d'une branche par une nouvelle branche créée aléatoirement. Dans la figure ci-dessus, les deux arbres du bas sont obtenus en croisant les deux arbres

du haut. L'arbre en bas à droite correspond à un programme LISP qui calcule la suite de Fibonacci.

Dans le modèle proposé par John R. Koza, les programmes créés effectuent parfois des opérations impossibles telles la division d'une liste par un booléen. La fonction d'évaluation sanctionne ces programmes inconsistants en leur attribuant la valeur minimale [Koza, 1989]. En 1993, David J. Montana a proposé une variante, la programmation génétique fortement typée, où les nœuds sont typés (la division ne peut se faire qu'avec des nombres) et les opérateurs respectent les types (la mutation ne remplace pas un nœud d'un certain type par un nœud d'un autre type) [Montana, 1993]. Cette variante permet de réduire la taille de l'espace des solutions aux programmes consistants.

Différenciation évolutionniste

Le modèle du bar El Farol a également été l'objet de recherches évolutionnistes. Ces recherches reprennent en fait une remarque de Brian Arthur dans son article où il émet l'hypothèse que ses résultats puissent se retrouver avec des agents créés par programmation génétique.

Dans un article de 1999, Bruce Edmonds détaille les résultats de simulations qu'il a effectuées [Edmonds, 1999b]. Il a étendu le modèle en permettant aux agents de communiquer. Chaque semaine, les agents annoncent de manière synchrone aux autres agents s'ils vont ou non au bar. Le lendemain, les agents prennent leur décision de manière synchrone.

Les agents possèdent différentes stratégies créées par programmation génétique fortement typée [Montana, 1993]. Ils choisissent de communiquer et d'agir en suivant la stratégie qui prédit le mieux la fréquentation du bar sur les cinq dernières semaines. Les stratégies sont composées de deux arbres. Le premier arbre est une expression déterminant ce que l'agent dit aux autres agents et le second arbre détermine l'action de l'agent. L'alphabet du premier arbre, c'est-à-dire les nœuds disponibles pour le créer, reprend les fonctions de prédiction de Brian Arthur (moyenne sur les n dernières semaines, tendance sur les n dernières semaines, etc.). Cet alphabet comprend

également des primitives sur ce que les autres agents ont dit lors de la semaine précédente. Outre les constantes, l'alphabet du second arbre comprend quatre types de nœuds : l'annonce faite aux autres agents cette semaine ou la semaine dernière, la décision de la semaine dernière, l'annonce de chacun des autres agents et un tirage aléatoire.

Bruce Edmonds observe une différenciation des comportements des agents. Dans une seconde série de simulations, il retire des alphabets les références aux autres agents (tels "ce qu'a dit l'agent 1" ou "ce qu'a dit l'agent 2", etc.). La différenciation se produit également dans ce cas, même si le phénomène est moindre. Le résultat s'explique analytiquement : il existe un grand nombre de solutions simples dans son modèle qui font référence aux autres agents, mais la différenciation des comportements est possible sans.

Bruce Edmonds n'hésite pas à faire un parallèle avec des comportements sociaux en évoquant l'imitation, l'amitié ou l'écoute [Edmonds, 1999a]. Pourtant, la différenciation n'est qu'un résultat mécanique de l'utilisation de la programmation génétique. L'algorithme d'apprentissage favorise les solutions qui maximisent la fonction d'évaluation. Or la fonction d'évaluation dépend de l'utilité de l'agent, c'est-à-dire du nombre de fois où il est allé au bar et que celui-ci n'était pas trop plein. En d'autres termes, l'utilité de l'agent est maximale lorsque son comportement diffère de celui des autres agents. L'algorithme évolutionniste ne peut converger que vers un équilibre où l'utilité est maximale, c'est-à-dire où les comportements sont différenciés.

Jeu de la minorité

Outre les informaticiens et les économistes, le bar El Farol est aussi à l'origine de simulations informatiques en physique théorique. Damien Challet et Yi-Cheng Zhang ont imaginé un problème dérivé, appelé le jeu de la minorité [Challet et Zhang, 1997]. Ce jeu est souvent considéré comme une généralisation du bar El Farol. En réalité, il s'agit d'une version extrêmement simplifiée. Les joueurs sont en nombre impair (N) et ils choisissent à chaque tour le camp A ou le camp B . Les joueurs faisant partie de la minorité gagnent un point tandis que ceux qui font partie

de la majorité n'en gagnent aucun.

Dans leurs simulations, ces auteurs considèrent des agents ayant plusieurs stratégies. Ils choisissent A ou B en suivant la stratégie qui prédit mieux le camp majoritaire sur un certain nombre M de tours précédents. À l'inverse du modèle de Brian Arthur, ces stratégies ne sont pas fondées sur des raisonnements primitifs, mais sont des tableaux associant une prédiction à l'historique des M tours précédents. Ces auteurs représentent l'historique sous la forme de M bits, un zéro représentant la majorité dans le camp B , et un 1 la majorité dans le camp A . La série des M bits est appelé "signal". La prédiction est également représentée par un bit.

signal (M bits)	prédiction
000	1
001	0
010	0
011	1
100	1
101	0
110	1
111	0

Exemple de stratégie au jeu de la minorité (d'après Challet et Zhang [1997])

Ces simulations informatiques sont cohérentes avec les résultats de Brian Arthur : le nombre d'agents dans chaque camp oscille autour de $N/2$. Dans un second temps, les auteurs utilisent un algorithme évolutionniste avec uniquement des mutations. Le nombre d'agents dans chaque camp converge alors vers 50%.

Les auteurs interprètent le résultat différemment des économistes. Ils insistent sur le fait que les agents n'ont pas besoin d'être rationnels. Ils n'hésitent pas à parler de "taille de cerveau" pour le paramètre M qui décrit la longueur du signal utilisé pour la prédiction, ni à écrire :

On peut même parler de l'émergence de l'intelligence. [Challet et Zhang, 1997, TdA]

Comme la différenciation observée par Bruce Edmonds, la convergence est surtout un effet prévisible de l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage qui n'est pas sensible aux maxima locaux.

L'apprentissage par algorithme évolutionniste développé par ces auteurs consiste à cloner le meilleur agent pour remplacer celui qui a le moins bien réussi et à modifier le clone de temps en temps de manière aléatoire (par mutation). Les

paramètres exacts (probabilité de mutation, type de la mutation, fréquence des copies par clonage) ne sont pas décrits. L'absence de croisement et la reproduction du meilleur agent permet de converger vers un grand nombre de solutions simples. Les agents prédisant le mieux le camp de la majorité sont dupliqués jusqu'à ce qu'ils deviennent majoritaires et qu'un autre agent soit plus efficace. Celui-ci est alors dupliqué à son tour. L'article de Damien Challet et Yi-Cheng Zhang s'appuie sur un graphique représentant une légère convergence de la taille du camp A pour une population de 1001 agents après un très grand nombre d'itérations (100 000).

5.2.3 Expériences SimBar I et II

Les expériences SimBar I et SimBar II ont été menées au Laboratoire d'Informatique de Paris VI en juin 2004 avec des chercheurs et des étudiants (figure 5.3). L'objectif était d'étudier les conditions de l'émergence d'une stratégie collective, et en particulier de déterminer si une telle stratégie peut apparaître lorsque les communications sont réduites comme le propose l'économie expérimentale.



FIG. 5.3: Joueurs à SimBar I

Le modèle de SimBar est inspiré du problème du bar El Farol et du modèle de Bruce Edmonds. Les joueurs peuvent communiquer avant de prendre leur décision. La communication se fait de manière asynchrone et continue mais elle est très limitée, à l'instar de la communication dans les expériences d'économie expérimentale. Chaque joueur peut demander à un autre joueur s'il va au bar. La réponse peut être "oui", "non" ou "ne se prononce pas".

Comme pour SimCafé, le modèle a été adapté pour incorporer des éléments favorisant la robustesse de l'ensemble et pour le rendre jouable. La taille du bar dépend du nombre de participants et évolue au cours du jeu si des participants quittent ou rejoignent la partie. La longueur du tour de jeu n'est pas fixée à l'avance. Au début de chaque tour, l'interface de chaque joueur indique "Non décidé". Les joueurs peuvent changer la valeur en "Aller au bar" ou "Rester à la maison". Lorsque tous les joueurs ont pris leur décision, l'agent qui s'occupe du bar calcule les points et le jeu passe à la semaine suivante. Dans SimBar II, les joueurs peuvent rester indécis pendant un temps limité à partir du moment où les autres joueurs ont pris leur décision. Ceci permet d'éviter que le jeu ne soit bloqué par des erreurs dans le code, des problèmes réseau ou l'inattention d'un joueur.

Les dix joueurs sont représentés par des figures héritées de SimCafé, et avec des noms anglophones dont les initiales suivent l'alphabet de A à J. Dans SimBar I, les maisons des joueurs étaient placées sur une carte de Santa Fe centrée sur le bar El Farol. Les noms des joueurs s'affichent en passant le curseur sur les maisons. Dans cette interface, les interactions avec un joueur se faisaient en sélectionnant sa maison. Lors de la séance de verbalisation qui a suivi l'expérience SimBar I, les joueurs se sont plaints de difficultés à identifier les autres joueurs. Cette discussion m'a conduit à modifier cette interface : l'interface de SimBar II présente les avatars des autres joueurs dans un tableau avec leur nom et leur visage.

Les jeux SimBar I et SimBar II ont été organisés en sessions. À chaque changement de session, les noms des avatars des joueurs ayant marqué le plus de points étaient communiqués aux joueurs et les scores étaient ré-initialisés.

Les enregistrements et les discussions révèlent qu'aucune stratégie collective n'a

été mise en œuvre. Dans SimBar I, le bar a été trop plein onze semaines sur les douze. Surtout, il a semblé difficile aux joueurs de se coordonner sans pouvoir discuter, et l'anonymat les a empêché de se comporter en fonction d'affinités extérieures au jeu.

5.2.4 Expérience SimBar III

L'expérience SimBar III a été menée au National Institute of Informatics en avril 2006 avec des étudiants du Honiden Laboratory (figure 5.4). Le jeu a été conçu et organisé en collaboration avec Éric Platon. Les joueurs étaient tous de langue maternelle japonaise et l'interface était traduite en japonais. Cette nouvelle expérience a été organisée pour vérifier que les joueurs peuvent exhiber des pratiques collectives lorsqu'ils peuvent communiquer à l'aide de messages instantanés.



FIG. 5.4: Session de SimBar III

Le modèle de cette expérience est dérivé du modèle de SimBar I & II. Les joueurs étaient situés sur une carte subdivisée en cases. Ils pouvaient discuter avec les autres joueurs qui se trouvent sur la même case de la carte. Ils se déplaçaient au bar et, à la fin de la semaine, les points étaient distribués aux joueurs dans le bar et hors du bar en suivant les mêmes règles que dans les précédentes expériences.

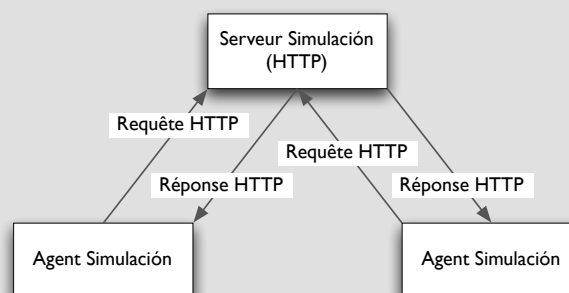
L'enregistrement de l'expérience SimBar III révèle qu'à l'inverse de SimBar I et II, les joueurs ont cherché à établir des stratégies collectives. Par exemple le joueur qui contrôlait Edward a proposé à Henry et à Frank de se coordonner. D'autres comportements collectifs ont émergés. Par exemple, il s'est formée une ligue des chauves (*hage dōmeigumi*, ハゲ同盟組). L'usage que l'on peut faire de l'émergence de ces comportements collectifs sera décrit plus en détail au chapitre 7.

Les expériences SimBar montrent que la communication entre les joueurs est une condition suffisante pour qu'émergent des groupes et des comportements collectifs, phénomène qui n'apparaît pas lorsque la communication est extrêmement limitée.

Seconde architecture réseau de Simulación

La première architecture réseau de la plate-forme Simulación a bien fonctionné pour les expériences SimCafé. En revanche, elle a posé des problèmes pour l'expérience SimBar I. Un certain nombre de joueurs ont participé à ces expériences à travers un réseau sans fil connecté à Internet via un point d'accès qui faisait de la traduction d'adresses (NAT). Or les paquets UDP multicast traversent ce point d'accès mais les requêtes XML-RPC ne peuvent pas entrer sur le réseau sans fil. Par conséquent, les agents sur le réseau filaire pouvaient trouver les agents sur le réseau sans fil, mais ne pouvaient pas les contacter.

Du fait de ces difficultés, j'ai mis en place une autre architecture réseau pour l'expérience SimBar II. Cette nouvelle architecture était conçue pour fonctionner sur n'importe quel réseau, en dépit des limitations d'accès mises en place sur les réseaux universitaires les plus protégés. Dans cette architecture, la communication passe désormais par un serveur central.



Architecture réseau avec serveur central

Avec le protocole HTTP, le serveur ne peut pas envoyer de messages aux agents. Cette contrainte technique est contournée par l'utilisation de "requêtes d'attente" que les agents envoient au serveur. Le serveur ne répond pas immédiatement, attendant d'avoir une information à transmettre. Lorsqu'un agent *A* veut envoyer un message à un agent *B*, l'agent *A* transmet ce message dans une requête au serveur. Celui-ci répond alors à la requête d'attente de l'agent *B* avec le contenu du message. Si le message exige une réponse, l'agent *B* répond par une nouvelle requête XML-RPC au serveur. Le serveur répond alors à la requête de l'agent *A*. Si un agent ne reçoit aucun message pendant un temps donné (10 secondes), le serveur répond à la requête d'attente en indiquant qu'il n'y a aucun message et l'agent envoie une nouvelle requête d'attente.

Un tel mécanisme est fondé sur l'attente active (*polling*), ce qui est généralement une très mauvaise façon de procéder. Cependant, du fait de la longueur du délai (plusieurs secondes), l'attente est très peu coûteuse en ressources (réseau et calcul). Cette architecture a été utilisée pour toutes les expériences suivantes.

5.3 Pouvoir et ontologies

Les expériences SimCommod-Tokyo ont été menées au National Institute of Informatics à Tokyo en septembre 2005 (figure 5.5). Le modèle SimCommod a été présenté en détail au chapitre 4. L'objectif, lors de ces expériences, était de déterminer ce qui peut émerger des simulations multi-agents participatives lorsqu'on applique les préceptes de l'économie expérimentale, exception faite des restrictions de la communication entre les joueurs qui est une condition, comme l'ont montré les expériences SimBar, pour que des comportements collectifs apparaissent.

En suivant la plupart des indications méthodologiques de l'économie expérimentale, les expériences SimCommod-Tokyo ont révélé l'inadéquation du concept de pouvoir dans les systèmes multi-agents. Elles ont également montré que les protocoles de négociation entre les agents doivent faire une place suffisante à l'*alignement des ontologies* pour éviter de biaiser les négociations.

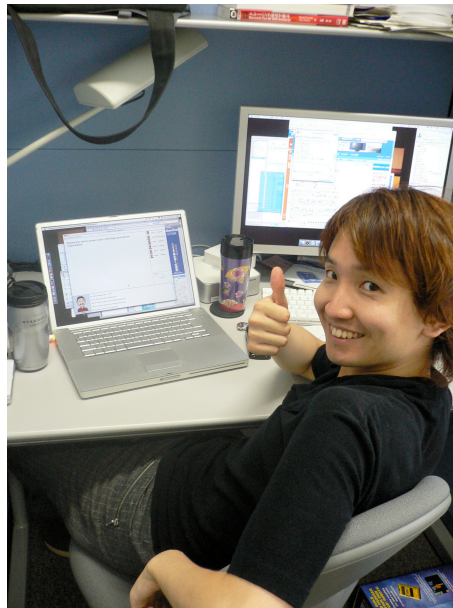


FIG. 5.5: Participant de SimCommod-Tokyo (Septembre 2005)

5.3.1 Négociation et pouvoir dans les systèmes multi-agents

Protocoles de négociation

La négociation peut être définie comme une discussion dont le but est de parvenir à un accord. Traduit dans le vocabulaire des systèmes multi-agents, la négociation est l'ensemble des interactions entre des agents visant à un comportement coopératif. Ces interactions peuvent prendre la forme de conclusions de contrats, ou se limiter au simple partage de croyances ou d'informations. Un groupe de travail au colloque IWMAS98 a essayé de caractériser les négociations entre les agents [Parunak, 1998]. Sa conclusion est que la négociation est une notion très large qui englobe la plupart des interactions entre agents. Les agents interagissent habituellement pour coopérer ou pour partager des informations.

Les modalités de la négociation entre agents ont évolué avec l'apparition des systèmes ouverts. Auparavant, dans les systèmes multi-agents dits "fermés", les agents étaient conçus par un seul programmeur et négociaient en suivant un protocole fixe qui n'avait pas forcément besoin d'être spécifié. Ce protocole pouvait éventuellement

être très simple. Les articles scientifiques de la communauté incluent le vote dans les formes de négociation.

Les langages de communication entre agents ont par la suite été standardisés pour permettre aux systèmes multi-agents d'être hétérogènes, c'est-à-dire pour permettre à des agents d'interagir avec d'autres agents conçus par d'autres programmeurs [Labrou *et al.*, 1999; FIPA, 2002]. Pour qu'ils négocient, ces agents doivent, outre recourir à des protocoles communs de négociation, se mettre d'accord sur l'objet de la négociation, c'est-à-dire sur la signification des termes qu'ils emploient. Ce à quoi les termes font référence constitue ce qui s'appelle l'ontologie¹³, et le processus de négociation pour se mettre d'accord sur le vocabulaire s'appelle l'*alignement des ontologies* [Wang et Gasser, 2002].

Les protocoles de négociation entre agents sont très éloignés des situations réelles où les négociations peuvent s'inscrire dans des relations de pouvoir. Les agents sont conçus pour coopérer, et la notion de pouvoir est à peu près inexistante dans leurs négociations.

Le pouvoir comme dépendance

La notion de pouvoir a été introduite dans les systèmes multi-agents par Cristiano Castelfranchi avec pour objectif de construire une théorie du pouvoir social [Castelfranchi, 1990]. Jaime Sichman a créé un système multi-agents pour illustrer cette théorie, en définissant le pouvoir comme une relation de dépendance entre des agents capables de raisonner à propos des autres [Sichman *et al.*, 1994; Sichman, 1995]. Un agent *A* a du pouvoir sur un agent *B* lorsque l'agent *B* se rend compte qu'il dépend de *A* pour atteindre son but. La théorie des relations de dépendance a été améliorée pour traiter les cas de dépendances entre plus de deux agents et pour mieux s'adapter aux changements des stratégies des autres agents [Brainov et Sandholm, 1999].

¹³La signification de ce terme en informatique recouvre exactement la notion d'*interprétation* en logique, mais sans doute parce que l'interprétation a un autre sens en informatique, les chercheurs ont préféré emprunter un terme à la métaphysique en le dénaturant de son sens original [Guarino, 1998].

La limite essentielle de cette notion de pouvoir fondée sur la dépendance est qu'elle part du postulat que les agents sont coopératifs. Elle est beaucoup plus restreinte qu'une définition générale du pouvoir, comme celle de Robert Dahl : le pouvoir est le fait d'obtenir de quelqu'un de faire quelque chose qu'il ne ferait pas sinon [Dahl, 1957, 1961]. La plupart des relations de pouvoir dans les négociations, en particulier dans les simulations participatives, ne sont pas uniquement fondées sur des relations de dépendance.

5.3.2 Pouvoir et négociation dans les simulations participatives

La négociation, qui s'effectue au moyen de protocoles spécifiés dans les systèmes multi-agents, prend une autre dimension dans de nombreuses simulations participatives. Elle est au cœur de ces expériences et en constitue souvent l'objectif.

L'objectif explicite de certains jeux de rôles est de servir de support à la négociation entre des acteurs qui dépendent les uns des autres. Par exemple, *SylvoPastJeu* de Michel Étienne est conçu pour favoriser la coopération entre bergers et forestiers [Etienne, 2003]. Les bergers dépendent des forestiers. Ils doivent réussir à les convaincre d'effectuer des aménagements forestiers favorables au pâturage. Officiellement, les forestiers sont indépendants et peuvent ignorer les demandes des bergers. Mais en réalité, *SylvoPastJeu* est conçu pour favoriser la prise de conscience du rôle bénéfique des troupeaux. Le jeu modélise le principe du sylvopastoralisme : en pâturant, les troupeaux nettoient les buissons et font décroître le risque d'incendie. Afin de renforcer cette dépendance des forestiers, si les bergers sont éliminés parce que les aménagements ne leur permettent pas de faire suffisamment pâturer leur troupeau, la forêt prend feu.

Dans *ButorStar*, la négociation est utilisée pour favoriser la prise de conscience des enjeux du système écologique des roselières [Mathevet *et al.*, 2005]. Les rôles des joueurs représentent différents acteurs de ce système : chasseurs, pêcheurs, éleveurs, exploitants et naturalistes. Ces rôles sont conçus pour avoir des intérêts divergents. En particulier, l'objectif du naturaliste, qui est de préserver de l'habitat du butor étoilé,

s'oppose aux intérêts économiques des autres joueurs. Dans ce jeu de rôles, les joueurs doivent coopérer pour choisir un niveau d'irrigation qui affecte les revenus de tous. La discussion se fait autour d'une table. Le maître du jeu saisit la décision collective. En cas d'absence d'accord, le niveau d'irrigation calculé par l'ordinateur correspond à la situation la pire pour l'ensemble des joueurs.

Dans ces deux modèles, les joueurs qui ne parviennent pas à un accord lors de la négociation sont punis. La phase de négociation se fait en langage naturel, sans la médiation de l'ordinateur. Les nombreux facteurs qui influencent le résultat de la négociation ne sont pas enregistrés. Il n'est donc pas possible d'étudier les relations de pouvoir dans ces jeux de manière systématique dans l'objectif de les reproduire dans des systèmes multi-agents. En fait, les concepteurs introduisent des relations de pouvoir *a priori* entre les rôles qu'ils définissent en créant des relations de dépendance. De plus, leurs expériences montrent que le nombre de joueurs qui assument un rôle donné affecte l'équilibre des négociations. Par exemple dans ButorStar, deux environmentalistes arriveront mieux à préserver l'habitat du butor étoilé qu'un seul, parce qu'ils seront plus convaincants lors des négociations.

5.3.3 Négociation dans les expériences SimCommod-Tokyo

Pour les expériences SimCommod-Tokyo, j'ai suivi la plupart des indications méthodologiques de l'économie expérimentale afin de déterminer si des stratégies collectives peuvent émerger avec ces contraintes. En particulier, l'ensemble du jeu a été présenté avec des symboles abstraits et les joueurs étaient anonymes, afin d'éviter d'introduire un biais. En revanche, l'interface du jeu permettait aux joueurs de discuter librement. Les discussions étaient enregistrées.

Le jeu a été organisé en trois sessions. Deux sessions ont été menées en parallèle puis, après une séance de verbalisation, la plupart des joueurs ont participé à une troisième session. Malgré la possibilité de discuter librement, l'anonymat a été respecté par les joueurs. Lors des entretiens pendant le jeu, un des joueurs m'a indiqué reconnaître un collègue à travers un avatar, mais, après vérification, il se trompait.

Durant les deux parties jouées en parallèle, les cases bannies par le gouvernement étaient choisies aléatoirement et donc la position des jetons et les négociations dans leur ensemble n'avaient strictement aucun impact sur l'évolution de la ressource. J'avais annoncé aux joueurs que l'agent logiciel, conformément aux spécifications du jeu, sanctionnaient l'absence de concertation en choisissant la solution la pire pour tous si les joueurs n'arrivaient pas à se mettre d'accord. Comme il y a toujours eu des divergences entre les propositions de l'environnementaliste et les propositions des exploitants, l'aspect aléatoire de l'agent logiciel assumant le rôle du gouvernement n'était pas détectable.

Durant ces deux parties où le rôle du gouvernement était assumé par un agent logiciel, les environnementalistes ont eu deux comportements très différents. Dans une des parties, l'environnementaliste a cherché à convaincre les exploitants du bien fondé d'une stratégie collective en leur indiquant à quel endroit ils devraient exploiter. Ce joueur a tenté de s'engager dans une négociation rationnelle en essayant d'obtenir un accord raisonnable servant les intérêts de l'ensemble des joueurs. Un seul exploitant a écouté ses conseils et il a effectivement récolté la plus grande quantité de ressource. Les autres ont indiqué qu'ils avaient tout simplement ignoré l'environnementaliste.

Dans l'autre partie, l'environnementaliste a plutôt indiqué aux joueurs de ne pas exploiter certaines cases qu'elle cherchait à préserver :

“J'ai essayé de protéger cette zone en disant aux joueurs : 'c'est une zone très importante, allez-vous en'. Plusieurs joueurs m'ont cru très facilement, mais certains s'y sont opposés.”

La ressource a été mieux préservée dans la seconde stratégie. En se fondant sur les explications données pendant les séances de verbalisation, on pourrait formuler l'hypothèse qu'interdire l'exploitation de certaines cellules est plus efficace que prescrire l'exploitation de certaines cases. Cette hypothèse est contraire à l'intuition. Proposer un accord qui satisfait ses contraintes tout en maximisant l'intérêt des autres joueurs semble plus efficace que se limiter à chercher à atteindre son objectif en interdisant aux autres joueurs de gêner ce plan. Cette hypothèse va aussi à l'encontre de l'ana-

lyse du pouvoir comme relation de dépendance puisque la stratégie la plus efficace ne nécessite pas de prendre en compte l'intérêt des autres joueurs.

En fait, il est probable que la meilleure préservation de l'environnement dans la deuxième partie ait une autre cause. L'analyse des enregistrements¹⁴ révèle une autre différence, fondamentale, entre les stratégies des deux environmentalistes. L'environnementaliste qui a le mieux préservé la ressource a introduit des notions concrètes dans la discussion. Elle a parlé d'espèces en voie de disparition, de forêts et d'arbres. Pourtant, lors de la présentation du modèle, fidèle aux recommandations des économistes, je n'avais utilisé que des termes abstraits comme "la ressource". Certes, les cases sont vertes, mais l'interface du jeu ne mentionne ni la présence d'arbres, ni l'existence d'une espèce en voie de disparition.

Pendant la troisième session, le rôle de l'environnementaliste a été assumé par la même joueuse. Elle a réussi à convaincre des exploitants d'exploiter les cases blanches, sans ressource, afin de permettre aux autres cases de se régénérer. Le succès de cette nouvelle stratégie dérive aussi de l'usage de notions concrètes. Pendant cette troisième session, l'environnementaliste a dit aux joueurs qu'ils pourraient trouver de l'or sur les cases blanches ! Elle était parfaitement consciente du fait qu'exploiter les cases blanches était la pire des stratégies pour les exploitants, et elle a été surprise de l'efficacité de ses injonctions. Durant la dernière séance de verbalisation, plusieurs joueurs ont admis, avec réticence, avoir cru l'environnementaliste et les enregistrements montrent qu'effectivement les cases blanches ont été exploitées, ce qui a eu pour effet de diminuer la pression sur la ressource.

5.3.4 Analyse

Les expériences SimCommod-Tokyo montrent que l'usage de notions abstraites dans une expérience où la discussion est libre peut conduire à l'introduction de nou-

¹⁴L'expérience SimCommod-Tokyo est encore un exemple de la nécessité d'enregistrer la totalité des interactions pour analyser les stratégies individuelles, ce qui est un des avantages fondamentaux des simulations multi-agents participatives par rapport aux jeux de rôles.

velles notions qui jouent un rôle considérable dans les négociations. Il est sans doute préférable de bien spécifier les notions en jeu, et de ne pas utiliser de symboles abstraits lorsqu'on permet aux joueurs de communiquer.

Les relations de pouvoir dans ces simulations multi-agents participatives ne sont pas du tout liées à des relations de dépendance. Elles sont le résultat des arguments mis en avant par l'environnementaliste lors de la discussion. Au cours du jeu, après chaque phase de négociation, les exploitants étaient libres de choisir où exploiter et n'étaient contraints que par le choix des trois cases bannies par le gouvernement.

Enfin, le pouvoir conféré par l'introduction de notions concrètes suggère que les protocoles de négociation entre agents ne devraient pas séparer les phases d'alignement des ontologies et de négociation proprement dite.

5.4 Conclusion : l'importance des interactions

L'économie expérimentale constitue une longue tradition d'expériences en laboratoire pour étudier les comportements. Pour se rapprocher de la physique, cette discipline a élaboré un cadre théorique et méthodologique très développé.

Deux résultats sont apparus lorsque les méthodes de l'économie expérimentale ont été appliquées aux simulations multi-agents participatives. Les expériences SimBar ont montré que l'interdiction faite aux joueurs de communiquer librement est une entrave à la formation de comportements collectifs. Les expériences SimCommod-Tokyo ont montré que l'usage de symboles abstraits, combinés à la possibilité de communiquer librement, conduit à la formation de relations de pouvoir entre les agents.

Le premier résultat s'explique par le cadre méthodologique de l'économie expérimentale. L'agrégation des comportements individuels se fait uniquement au travers des institutions pré-définies et contrôlées par les expérimentateurs. En d'autres termes, l'économie expérimentale permet d'étudier des comportements individuels mais ne permet pas d'étudier des comportements collectifs, et elle n'a pas ce but.

Le second résultat implique qu'adopter un conseil méthodologique étranger au domaine des systèmes multi-agents peut révéler la faiblesse de certains protocoles et

de certaines méthodes de notre domaine : dans tout processus de négociation entre agents, les agents nomment de manière identique les enjeux de la négociation, ou commencent par décider des termes à employer. L'économie expérimentale suggère de ne présenter les notions en jeu que de manière abstraite, ce qui ne correspond pas à la tradition des systèmes multi-agents. L'emploi exclusif de notions abstraites dans le cadre d'expériences de simulations multi-agents participatives a révélé que les approches classiques de conception de systèmes multi-agents empêchent de modéliser l'ensemble des relations de pouvoir qui existent dans les groupes sociaux. Ces approches classiques ne permettent pas de reproduire les mécanismes de résolution collective de problèmes qui sont fondés sur de telles relations de pouvoir.

Puisque l'économie expérimentale ne permet pas d'étudier des comportements collectifs dans le cas où ces comportements ne sont pas régulés par des institutions mais créés par des participants, il est nécessaire de trouver une autre méthode pour modéliser et formaliser les interactions entre les joueurs dans les simulations multi-agents participatives. Cette modélisation doit permettre de créer des agents capables de reproduire les stratégies individuelles au sein de comportements collectifs.

6 Modélisation informatique des interactions

La modélisation des comportements collectifs est un préalable à leur reproduction dans des systèmes multi-agents. Les formalisations de l'économie ne permettent pas de modéliser l'ensemble des comportements collectifs susceptibles d'apparaître dans les simulations multi-agents participatives.

Ce chapitre explore les formes informatiques permettant de modéliser les interactions du point de vue de chaque agent contrôlé par un humain. En particulier, il détermine quels modèles, ou quelle classe de modèles, permettent d'une part de décrire les interactions de chaque joueur avec les autres participants, et d'autre part de concevoir des agents capables d'interagir avec des humains au sein de simulations hybrides. Les modèles recherchés devront en outre satisfaire deux contraintes : les séquences ou motifs d'interaction doivent être validés par des experts non informaticiens, et ces motifs doivent pouvoir être extraits de manière automatique ou semi-automatique.

Des expériences participatives ont montré la pertinence de l'extraction automatique des motifs d'interaction : lorsque les joueurs modélisent eux-mêmes leur comportement, les modèles qu'ils construisent ne correspondent pas aux comportements observés mais à des comportements idéaux [Grosz *et al.*, 2004; Sempé *et al.*, 2006]. Pourtant, les expériences de Barbara Grosz ont montré que les modèles idéaux construits par les participants sont moins efficaces que des modèles plus proches de leurs comportements réels.

La première partie du chapitre définit la classe des automates à états finis qui per-

mettent de décrire formellement les comportements des joueurs dans les simulations multi-agents participatives. La seconde partie présente une méthode pour extraire automatiquement des motifs d'interaction à partir des enregistrements des simulations. Ces motifs sont exprimés dans le langage *Q* développé par Toru Ishida pour permettre à des experts non informaticiens de concevoir des agents logiciels [Ishida et Fukumoto, 2002; Ishida, 2002]. Enfin, la troisième partie propose une extension du langage *Q* qui permettrait de mieux modéliser le comportement des joueurs et de plus facilement concevoir des agents logiciels capables de collaborer avec des humains dans des activités de groupe au sein de simulations hybrides.

6.1 Automates à états finis

6.1.1 Modèles d'interaction

Le problème posé est de déterminer la forme que peut prendre un modèle informatique qui décrirait et qui reproduirait les interactions d'un joueur avec les autres. Cette question est motivée par deux objectifs distincts.

Le premier objectif est de faire valider par un expert du domaine le réalisme des comportements collectifs qui apparaissent pendant les expériences. Comme les interactions entre les joueurs prennent exclusivement la forme d'envoi de messages informatiques, les modèles de ces interactions sont nécessairement des modèles informatiques. Pour qu'un expert puisse valider un modèle d'interaction, il faut que ce modèle ait certaines propriétés, en particulier qu'il soit lisible par un non informaticien.

Le second objectif est de concevoir, à partir d'un modèle du domaine, des agents artificiels qui participent aux simulations aux côtés des joueurs humains. Pour que ces agents soient capables de participer avec des joueurs humains à des activités de groupe, il faut qu'ils reproduisent un certain modèle d'interaction. Ce modèle prend nécessairement la forme d'un modèle informatique puisqu'il est interprété par un agent logiciel. Comme pour le premier objectif, ce modèle doit être lisible pour pouvoir être vérifié par l'expert du domaine.

Le problème est extrêmement simple dans le cas des expériences de marché des économistes. Dans ces expériences, les agents économiques, humains ou artificiels, n'interagissent que par le biais d'offres d'achat. La simplicité des interactions entre les différents participants, et donc des algorithmes, est due à l'absence de comportements collectifs. Par exemple, dans les expériences de John Duffy, les agents logiciels suivent des algorithmes comme "toujours accepter l'échange" ou "accepter l'échange avec une probabilité qui dépend du succès de ce type d'échanges par le passé" [Duffy et Ochs, 1999].

En revanche, lorsque les joueurs peuvent communiquer verbalement, comme c'est le cas lors des expériences SimCafé (section §3.3), SimCommod (section §4.2) et SimBar III (section §5.2.4), les stratégies adoptées sont beaucoup plus complexes et peuvent mener à la formation de véritables comportements collectifs, comme la formation de coalitions ou l'émergence de groupes. Les interactions sont alors beaucoup plus difficiles à modéliser.

Les modèles d'agents cognitifs, comme le modèle BDI (*Beliefs, Desires and Intentions*, [Rao et Georgeff, 1991]), pourraient être utilisés pour modéliser les comportements des joueurs. Ces modèles de raisonnement ne sont pas spécifiques aux interactions; il faut leur greffer des protocoles d'interaction pour concevoir des agents qui interagissent. Dans la mesure où le présent objectif est de modéliser des interactions entre les joueurs, de tels modèles d'agents n'apportent rien. De plus, ils correspondent à des notions qui sont complètement étrangères à une partie, sinon à la totalité, des experts impliqués. En effet, ils reposent sur des théories (la psychologie naïve dans le cas de BDI) qui sont rarement compatibles avec les différents domaines des experts.

Un certain nombre de modèles d'interaction pour les systèmes multi-agents, fondés sur des actes de langage, ont été proposés et standardisés. C'est le cas des langages de communication KQML et FIPA-ACL [Finin *et al.*, 1994; FIPA, 2002]. Ces modèles n'ont pas été créés pour décrire des interactions mais pour concevoir des systèmes multi-agents ouverts. En se concentrant sur les messages, ils font trop abstraction des comportements des agents pour permettre de modéliser les interactions d'un joueur avec les autres. La logique entre les différents messages dans ces langages de com-

munication repose sur un comportement modélisé par une architecture réactive ou cognitive (BDI), ou sur des protocoles d'interaction fixes. Dans le premier cas, ces langages ne servent qu'à spécifier la forme des messages, et ne donnent pas assez d'informations sur leur séquençement. Dans le second cas, les protocoles d'interaction standardisés sont beaucoup trop limités pour décrire la totalité des comportements que les participants peuvent choisir d'adopter lors des expériences.

6.1.2 Utiliser les traces

Un des avantages des simulations multi-agents participatives réside dans la possibilité d'enregistrer l'ensemble des interactions. L'enregistrement distingue deux types d'objets : les actions et les événements.

Une *action* est un message envoyé par l'agent contrôlé par un joueur à un autre agent ou à l'environnement (tout ce qui n'est pas les agents). Dans SimCafé, les actions incluent l'envoi de café, l'acceptation d'une offre de l'acheteur et le démarrage de la production de café pergamino. Toutes les actions enregistrées sont le résultat d'une ou de plusieurs actions du joueur sur l'interface graphique (clics, frappe clavier, etc.).

Un *événement* est un message reçu. Il peut s'agir d'un message provenant d'un autre agent ou encore de l'environnement. Par exemple, dans SimCafé, les agents reçoivent un message indiquant la fin de la production du café pergamino. Cet événement se traduit visuellement pour le joueur par l'arrêt de l'animation représentant la production du café, à droite de son écran. Tous les événements sont traduits visuellement ou de manière sonore. Par exemple, suite à une demande des joueurs de SimBar I, les applications SimBar II et III ont doublé le signal visuel de changement de semaine par un signal sonore.

La série chronologique de ces actions et événements constitue ce qui s'appelle une *trace* [Champin *et al.*, 2003]. Un objet informatique peut être un modèle des actions d'un joueur si cet objet *reconnaît* la trace, c'est-à-dire si, suivant l'enregistrement des événements, il réplique les actions de la trace exactement dans le même ordre.

6.1.3 Trois hypothèses de travail

Avant d'en venir à la modélisation proprement dite, il me faut décrire trois hypothèses qui ont notamment permis de restreindre la diversité des objets informatiques qui peuvent modéliser les interactions d'un joueur, dans une expérience comme SimCafé.

La première hypothèse est que certains événements n'ont pas d'influence sur les actions des agents. Le comportement d'un joueur peut ne pas être affecté par un message reçu d'un autre joueur. En d'autres termes, le joueur ne réagit pas à tous les événements. Tout modèle fondé sur la réaction des agents à des événements doit inclure la possibilité de ne pas réagir.

La seconde hypothèse est que la durée écoulée entre les éléments de la trace n'importe pas. Seul compte l'ordre des éléments : les actions dépendent des événements et des actions passés, mais pas du temps écoulé entre chaque élément de la trace. Cette hypothèse simplifie grandement les modèles informatiques qui peuvent reproduire les comportements des joueurs parce qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte le temps.

La troisième hypothèse est que si les systèmes informatiques recherchés reçoivent d'autres événements que ceux enregistrés dans la trace, ils réagiront (le plus souvent) de façon différente. Cette hypothèse exclut les systèmes informatiques qui se limitent à reproduire la série des actions du joueur, indépendamment des événements.

6.1.4 Machines de Mealy et forme des interactions

Les modèles informatiques possibles des comportements des joueurs peuvent être classés en fonction de leur complexité. Il existe une hiérarchie des classes d'automates qui correspond à la hiérarchie des classes de grammaires formelles de Chomsky [Chomsky, 1956]. La catégorie la plus large de cette hiérarchie correspond aux machines de Turing. Plus précisément, les grammaires non spécifiées qui appartiennent à ce que Noam Chomsky appelle le type-0, génèrent exactement l'ensemble des langages qui peuvent être reconnus par les machines de Turing. Les machines de Turing

appartiennent à la classe la plus large des automates imaginables. Ces machines sont bien sûr capables de reproduire la trace des agents des simulations multi-agents participatives.

Les machines de Mealy, ou plutôt les machines de Mealy qui incluent le symbole vide (ϵ) dans leur alphabet, sont des automates à états finis beaucoup plus simples que les machines de Turing. Ces automates sont également capables de reconnaître la trace des agents. Cette propriété se démontre formellement dans l'encadré ci-dessous.

Ce résultat permet d'affirmer que l'ensemble des modèles des interactions des joueurs comprend des automates qui ont au moins les propriétés des machines de Mealy. La plupart de ces automates ne fournissent aucune information sur la forme des interactions. Cependant, une solution simple au problème de la modélisation des interactions à des fins de validation, consiste à construire une machine de Mealy dans laquelle les interactions sont regroupées en fonction de leur sens dans différentes sous-parties de l'automate.

Le langage Q , décrit dans la section suivante, est fondé sur le classement des opérations en fonction de leur contexte et de leur sens. La structure des programmes écrits dans ce langage s'apparente aux machines de Mealy.

ϵ -Machines de Mealy

Définition 1 Soit une trace T comprenant des actions A et des événements E .

$$T = \{t_1, t_1, \dots, t_{|T|}\}, t_i \in ((A \cup \{\epsilon\}) \times (E \cup \{\epsilon\}))$$

Définition 2 On appelle ϵ -Machine de Mealy une machine de Mealy déterministe avec le symbole vide (noté ϵ). La machine se représente par le sextuplet $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, \lambda, q_I)$ avec :

- $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{|Q|}\}$ un ensemble fini d'états ;
- $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{|\Sigma|-1}\} \cup \{\epsilon\}$ un alphabet d'entrée ;
- $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{|\Gamma|-1}\} \cup \{\epsilon\}$ un alphabet de sortie ;

- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ une fonction de transition qui détermine l'état suivant, telle que la machine dans l'état q_i , après la lecture du symbole $\sigma \in \Sigma$, arrive dans l'état $\delta(q_i, \sigma) \in Q$;
- $\lambda : Q \times \Sigma \rightarrow \Gamma$ une fonction de transition qui détermine le symbole de sortie, telle que la machine dans l'état q_i , après la lecture du symbole $\sigma \in \Sigma$ génère le symbole $\lambda(q_i, \sigma) \in \Gamma$; on a $\forall i \lambda(q_i, \epsilon) \neq \epsilon$; et
- $q_I \in Q$ l'état initial de la machine avant la lecture du premier symbole d'entrée.

Théorème I Pour toute trace T , il existe une ϵ -machine de Mealy qui reconnaît T .

Démonstration (on exhibe une telle machine) :

- Soit $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n\}, t_i \in ((A \cup \{\epsilon\}) \times (E \cup \{\epsilon\}))$
 - $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$
 - $q_I = q_0$
 - $\Sigma = E \cup \{\epsilon\}$
 - $\Gamma = A \cup \{\epsilon\}$
 - $\delta(q_i, \sigma) = q_{i+1}$
 - Soient $\delta_i, \sigma_i/t_i = (\delta_i, \sigma_i), \lambda(q_i, \sigma_i) = \delta_i$
- Cette machine a n états et reconnaît T .

6.2 Extraction automatique de motifs d'interaction

Le langage Q , originellement créé pour concevoir des agents assistants autour du concept de "cartes d'interaction", possède des propriétés intéressantes qui permettent de l'utiliser comme langage cible pour l'extraction automatique de motifs d'interaction (*interaction patterns*) [Ishida et Fukumoto, 2002; Ishida, 2002]. Cette extraction doit permettre de reproduire les interactions d'un joueur avec les autres. L'utilisation du langage Q , particulièrement lisible, pour décrire les motifs d'interaction ainsi générés, permet également aux experts de les valider.

6.2.1 Le langage Q

Le langage Q est à l'origine un langage de description d'agents réactifs. J'ai choisi d'utiliser Q parce que c'est d'abord un langage à destination de concepteurs d'agents non informaticiens. Son utilisation est également justifiée parce qu'il est un dialecte de LISP, ce qui permet d'avoir recours à certaines techniques d'apprentissage pour l'extraction automatique de motifs d'interaction.

Conception d'agents avec le langage Q

Le langage Q s'inscrit dans un processus de conception d'agents assistants. Il permet en théorie à un expert du domaine de concevoir des agents assistants sans avoir véritablement besoin de programmer. L'expert définit des actions et des *cues* qui sont les stimuli ou les conditions de l'action. L'expert décrit ensuite les réactions des agents sous la forme de tableaux, appelés cartes d'interaction, dressés dans un tableur comme Excel (figure 6.1). Un ensemble de tableaux forme un scénario ou programme Q.

Card ID	I4	Card Name	Visiting Kimono Web site	Card Type	User initiative
Opening	Action				
	Hm-hum, you are so enthusiastic. Then, how about this page? http://www.kimono.com/index.htm				
Reactions to Users' Mouse Click (Repeat)	Mouse Click	Cue		Action	
		http://kimono.com/type.htm	There are many types of obi. Can you tell the difference?		
		http://kimono.com/fukuro.htm	(GestureLeft) Fukuro obi is for a ceremonial dress. Use it at a dress-up party!		
	No Reaction	http://kimono.com/maru.htm	(Evaluate Card42)		
		Seconds		Action	
		20		(End of Repeat)	
Closing	Action				
	Did you enjoy Japanese Kimono? OK, let's move on to the next subject.				

FIG. 6.1: Carte d'interaction (d'après [Ishida, 2002])

Les scénarios Q pilotent des moteurs d'agents qui fournissent l'implémentation pour les "cues" et pour les "actions". La figure 6.2 représente la totalité du processus tel que le conçoit Toru Ishida. Son équipe a créé plusieurs moteurs : l'un est fondé sur les agents Microsoft, un autre est connecté à un outil de visualisation 3D appelée FreeWalk pour simuler les interactions en situations de crise (incendie, évacuation du métro de Kyoto) [Ishida et al., 2002; Ishida et Nakanishi, 2003].

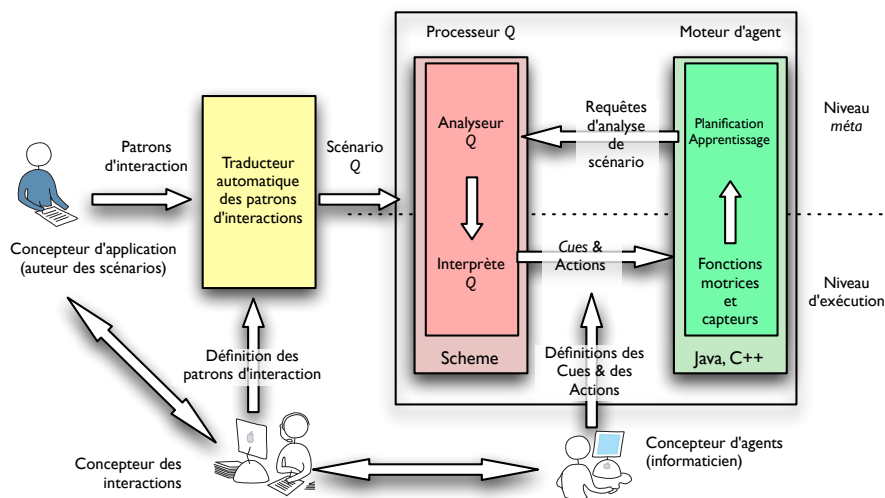


FIG. 6.2: Conception d'agents Q (d'après [Ishida et Nakanishi, 2003])

Structure des programmes Q

Le langage Q s'apparente au langage LISP : c'est un langage dérivé de Scheme, lui-même un dialecte de LISP [Sussman et Steele, 1975].

Les actions sont de deux types : synchrone et asynchrone. Les actions synchrones sont représentées par des fonctions Scheme commençant par un point d'exclamation. Les actions asynchrones commencent par deux points d'exclamation. Seul le moteur d'agents accorde une sémantique différente aux deux types d'actions, elles sont traitées indifféremment par l'interprète Q . Les *cues* sont des fonctions Scheme commençant par un point d'interrogation.

Les actions peuvent être `!walk` pour marcher le long d'une route, `!face` pour

tourner la tête vers un autre agent ou `!ask` pour poser une question. Les *cues* peuvent être `?position` qui indique la position et l'orientation de l'agent, `?see` pour indiquer que l'agent voit un objet ou `?hear` pour indiquer que l'agent entend une voix. Des mots clefs préfixés par ":" introduisent les paramètres des actions et des *cues*.

```
(guard
  ((?hear "Hello" :from Jerry)
   (!speak "Hello" :to Jerry) ... )
  ((?see railway_station :direction "south")
   (!walk :from bus_terminal :to railway_station) ... )
  (otherwise
   (!send "I am still waiting" :to Tom) ... ))
```

FIG. 6.3: Extrait d'un programme *Q* (d'après [Ishida, 2002])

La figure 6.3 représente un extrait d'un programme *Q*. Cet exemple illustre l'usage de la commande `guard`. Cette commande associe les stimuli aux actions. Dans l'exemple, si l'une des *cues* se déclenche (par exemple l'agent entend Jerry dire "Hello"), la clause correspondante est exécutée (l'agent dit "Hello" à Jerry). Si aucune *cue* n'est déclenchée, la commande `guard` exécute la clause `otherwise`.

Les programmes *Q* sont composés de scénarios et chaque scénario est subdivisé en scènes. Les scènes correspondent à des états de l'agent et sont définies comme des commandes `guard`. Les clauses des commandes `guard` peuvent comprendre un appel à la commande `go` qui déclenche un changement d'état. Par exemple (`go scene3`) provoquera une transition vers la scène 3. La figure 6.4 représente un scénario *Q* composé de 3 scènes. Chaque scène est représentée par une carte d'interaction. Il existe un isomorphisme entre les cartes et les scénarios *Q*, et la traduction d'un ensemble de cartes en un scénario peut se faire de manière automatique.

Programmes *Q* et automates

Les programmes *Q* représentent des automates à états finis dont les transitions sont définies par les *cues*. La figure 6.5 représente l'automate correspondant au scénario de la figure 6.4.

```
(defscenario chat (message)
  (let (($x #f))
    (scene1 ((?hear "Hi!" :from $x) (go scene2))
            ((?hear "Bye") (go scene3)))
    (scene2 ((equal $x Taro) (!say message))
            (otherwise (!say "Hello")))
    (scene3 (#t (!say "Bye")))))
```

FIG. 6.4: Scénario Q (d'après [Ishida et Fukumoto, 2002])

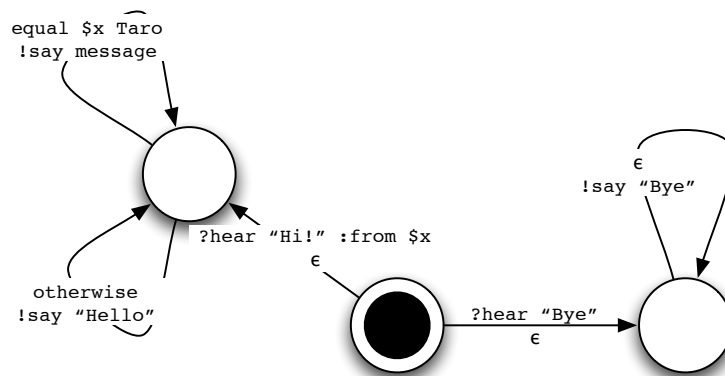


FIG. 6.5: Automate correspondant au scénario Q de la figure 6.4

Les scénarios Q sont en fait des machines de Mealy avec paramètres (`message` dans l'exemple) et variables (`$x`). Ces automates peuvent représenter les interactions d'un agent lors d'une expérience de simulation multi-agents participative.

Q comme langage de description

Le langage Q est un langage de description du comportement des agents et de leurs interactions qui ne repose pas sur les algorithmes de l'agent à l'inverse de SOAR [Laird et Rosenbloom, 1996]. Q n'est pas un langage de communication d'agents. Par rapport à ces langages, comme FIPA-ACL ou KQML, Q décrit plus qu'une succession d'actes de langage, sans pour autant spécifier des protocoles d'interaction a priori, ni les *ontologies* auxquelles la conversation fait référence [Labrou *et al.*, 1999; Finin *et al.*, 1994]. Cette particularité en fait un bien meilleur langage de description des interactions entre les

participants d'une simulation parce qu'il ne nécessite pas de décrire les motivations et les stratégies des joueurs. Il se contente de décrire ce qui est extérieur aux joueurs : leurs actions, les événements qu'ils observent et les messages qu'ils reçoivent. Cette restriction correspond à ce qui est enregistré lors des simulations : la trace ne conserve pas les motivations des joueurs ni leurs stratégies, lesquels sont l'objet des séances de verbalisation.

En revanche, en tant que langage de conception, le projet de Toru Ishida décrit figure 6.2 demeure un objectif non réalisé. En particulier, la sémantique des scénarios *Q* dépend énormément de l'implémentation du processeur *Q* et du moteur d'agents. Par exemple, le processeur *Q* gère les commandes *guard* en faisant de l'attente active, c'est-à-dire qu'il interroge séquentiellement le moteur d'agents pour chacune des *clauses* pour savoir si elle est vérifiée. Cette implémentation introduit un biais dans l'interprétation des clauses des commandes *guard* qui sont présentées comme simultanées dans la spécification du langage, alors qu'elles sont en réalité séquentielles et que l'ordre peut influencer sur le comportement de l'agent. Ce genre de détails ne permet pas à un expert d'écrire un scénario sans interagir avec l'informaticien. C'est sans doute pour cette raison que le traducteur automatique de tableaux en scénarios a été abandonné avec la version 2 de *Q*¹.

6.2.2 Extraction automatique

Programmation génétique et *Q*

Les scénarios *Q* sont des programmes LISP. La programmation génétique est la technique la plus naturelle pour créer des scénarios significatifs à partir de la trace enregistrée pendant les expériences de simulations multi-agents participatives. Cette technique permet de dégager des motifs d'interaction qui peuvent être validés par les experts. L'objectif est de pouvoir capturer des interactions aussi simples qu'un échange de café pergamino contre des pesos. Un tel motif pourrait être celui présenté figure 6.6.

¹Discussion en août 2005 à Kyoto avec l'équipe de Toru Ishida.

- envoyer le message "te compro 30 sacos a 25" à l'agent X
- recevoir le message "Sale, mandame 750 pesos y te los envio" de l'agent X
- envoyer 750 pesos à l'agent X
- recevoir 30 sacs de l'agent X

FIG. 6.6: Exemple de motif d'interaction pour SimCafé

J'ai utilisé comme fonction d'évaluation une mesure de l'adéquation d'un scénario avec la trace enregistrée. La mesure s'effectue en déroulant le scénario Q à partir des événements de la trace et en remarquant les actions qui ne correspondent pas. Par exemple, le scénario de la figure 6.4 correspond aux traces 1 et 2 mais pas à la trace 3 de la figure 6.7. Donc, si on est dans le cas de la trace 3, ce scénario sera éliminé par l'algorithme génétique.

Trace 1	Trace 2	Trace 3
?hear "Hi" :from Hanako	?hear "Bye"	?hear "Hi" :from Kazutaka
!say "Hello"	!say "Bye"	!say "Hi Kazutaka-san"

FIG. 6.7: Traces de discussion entre agents Q

La mesure utilisée est le triplet formé par le nombre d'actions qui correspondent à la trace, le nombre d'actions qui ne correspondent pas à la trace et le nombre de violations des règles (par exemple envoyer plus de café que ce qui est disponible en stock). L'ordre défini par la fonction d'évaluation est l'ordre lexicographique sur ce triplet : les meilleurs automates sont ceux qui effectuent un maximum d'actions correspondant à la trace, puis un minimum d'actions qui ne correspondent pas, et enfin un minimum de violations des règles.

La programmation génétique fortement typée permet de réduire l'espace de recherche, de l'ensemble des programmes LISP aux seuls programmes Q . Pour ce faire, j'ai défini un type pour chacun des nœuds spécifiques au langage Q . Par exemple, les scénarios sont des nœuds de type `scenario`, et leurs sous-arbres sont de type `scene`. L'alphabet utilisé pour la programmation génétique comprend de tels nœuds avec un nombre variable de sous-nœuds. Par exemple, les scénarios générés peuvent

avoir 3, 4 ou 5 scènes différentes.

Variables

Le langage Q permet de définir des scénarios avec des variables. Ces variables sont soit des paramètres des scénarios, soit des valeurs qui dépendent d'une *cue* ($\$x$ dans recevoir un message de $\$x$). Cette particularité du langage permet de définir des scènes et des cartes d'interaction génériques qui peuvent s'adapter aux interactions avec différents agents. Pour pouvoir extraire des motifs d'interaction à l'aide de la programmation génétique, il faut inclure de telles variables.

Il existe deux formes de variables utilisées pour la programmation génétique. La première forme représente des variables globales qui sont utilisées avec deux nœuds particuliers, $Set-X<1>$ et $Get-X$ [Koza, 1992]. Une variante permet d'avoir un nombre quelconque de variables. Le problème de ces variables est que le nœud $Set-X<1>$ doit être invoqué avant de pouvoir utiliser le nœud $Get-X$. En d'autres termes, ces variables ne sont utilisables que si la valeur est fixée avant que le programme y accède.

Evan Kirshenbaum a proposé de remplacer les variables définies par John Koza par des variables ayant une portée limitée et définie par la fonction let de LISP [Kirshenbaum, 2000]. Cette fonction prend deux arguments. Le premier argument est une liste de couples définissant les valeurs des différentes variables. Le second argument est une expression qui contient les variables définies par le premier argument. La valeur de la fonction est la valeur de la deuxième expression dans laquelle les noms des variables sont remplacés par leurs valeurs. Comme ces variables ont une valeur fixe, elles ne peuvent pas convenir aux motifs d'interaction.

Les variables dans Q sont des références LISP. Les références sont des variables définies par let mais dont la valeur peut être modifiée lors de l'évaluation de la seconde clause du let . Dans le cas de Q , les valeurs sont exclusivement modifiées par les *cues*. Par exemple, la valeur de $\$x$ est modifiée par le nœud $?hear$ dans l'exemple figure 6.4.

Pour extraire des motifs d'interaction, il est possible de fixer la valeur des variables en fonction des événements, un peu comme le fait l'interprète Q avec les *cues*. Pour ce faire, j'ai introduit un autre type de variables dans l'algorithme génétique, en m'inspirant des variables de la programmation logique. Ces variables sont unifiées en fonction des événements de la trace. Par exemple, si la trace comporte l'événement "Réception de 30 sacs de Pergamino de Clemente" et que le sous-arbre de l'automate est $(?receive_pergamino :qty \$X :from \$Y)$, la valeur de $\$X$ est fixée à 30 et la valeur de $\$Y$ est fixée à Clemente. Si les variables avaient d'autres valeurs, la *cue* ne serait pas validée et les valeurs ne seraient pas modifiées. Par ailleurs, ces variables peuvent être définies par intervalle. Par exemple le sous-arbre $(?have_less_pergamino :than \$X)$ ajoute une contrainte sur la variable $\$X$ en fonction du stock actuel de pergamino.

Ces variables libres améliorent sensiblement l'extraction des motifs en diminuant la taille de l'espace de recherche. La figure 6.8 compare l'efficacité moyenne et l'efficacité du meilleur arbre avec ces variables, et avec les variables classiques de la programmation génétique telles que définies par John Koza [Koza, 1992].

La portée des variables est limitée aux cartes d'interaction. Cette portée permet de regrouper les interactions en fonction de leur sens. Par exemple la réception d'un message d'un joueur $\$x$ et la réponse à ce même joueur seront traitées dans la même carte d'interaction.

La courbe asymptotique de la figure 6.8 s'explique d'abord par la plus faible probabilité de trouver un programme prédisant correctement une action de plus lorsque les programmes peuvent déjà prédire correctement un certain nombre d'actions. En particulier, avec la structure du langage Q , il est facile de tomber dans un maximum local². C'est pourquoi j'ai obtenu de meilleurs résultats avec un fort taux de mutations

²Les algorithmes d'apprentissage fonctionnent par approximations successives en se rapprochant d'un objectif, par exemple la maximisation d'une fonction d'évaluation. Les maxima locaux sont des voisinages de l'espace des solutions où la valeur de la fonction d'évaluation est maximale localement. On parle également de minima locaux lorsqu'on cherche à minimiser une fonction. Les algorithmes d'apprentissage se rapprochent de manière plus ou moins grossière du maximum. Une approche trop rapide risque

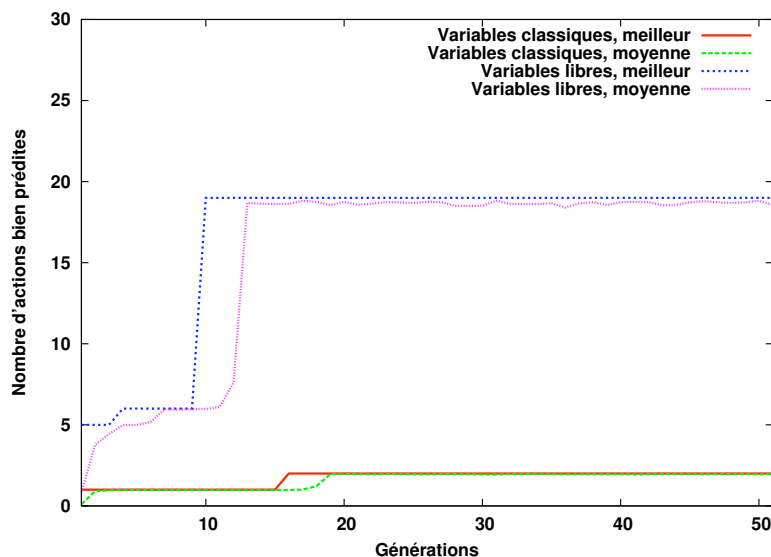


FIG. 6.8: Efficacité de la programmation génétique avec et sans les variables libres (première expérience, trace d'Abelardo)

(15%).

Résultats et limites

La figure 6.9 représente un extrait de scène Q où Hector accepte un contrat dès qu'il a reçu du pergamin d'un autre joueur. Cette scène correspond à la deuxième coalition menée par Hector au cours de la troisième expérience SimCafé. Après avoir terminé la transformation du cereza en pergamin et avoir reçu du pergamin d'Ignacio, Hector a accepté le contrat.

Les programmes obtenus par programmation génétique comprennent une grande quantité de code inutile et non exécuté, les *introns*, qui sont essentiels à la programmation génétique mais qui doivent être supprimés avant de faire valider le motif d'in-

d'osciller autour du maximum global. Une approche trop lente risque de se focaliser sur un maximum local, bien inférieur au maximum global.


```

(guard
  (#f (...))
  ((?receive_pergamino :qty $Int-X :from $Agent-Z)
  (do
    (!accept_offer :contract
      (if
        (?have_less_pergamino :than
          get_cereza_bags_count)
        (if
          (?transformation_process_completed)
            $Contract-1
            $Contract-2)
          (if #t $Contract-2 $Contract-2)))
    (do
      (!send_message :to $Agent-X)
      (do
        (!transform_cereza :amount
          (if #t $Int-Y (get_budget)))
        (!send_message :to $Agent-Y))))
    (#f (...))
    (otherwise (go (if #f 3 1))))

```

FIG. 6.9: Scène extraite automatiquement de la trace des actions d'Hector lors de la troisième expérience

teraction par les experts du domaine. C'est le cas des clauses commençant par des conditions fausses (`#f`) et représentées ici par des points de suspension.

La programmation génétique avec variables libres permet d'extraire automatiquement des motifs simples sous la forme de scènes Q comme celle présentée en figure 6.9. En revanche, elle ne permet pas d'extraire des motifs plus longs, correspondant à des interactions plus étendues dans le temps. L'utilisation du chaînage arrière (comme dans Prolog) pour déterminer la valeur des variables libres n'a pas permis d'améliorer l'extraction de manière significative.

On pourrait croire que la limite de ces résultats est d'abord due à la trop faible quantité de données disponibles lors des expériences de simulations multi-agents participatives. En fait, l'analyse des enregistrements montre que le modèle du langage Q crée des maxima locaux en compilant les automates qui reconnaissent la trace.

6.3 Modèles d'agents pour les comportements collectifs

L'analyse d'enregistrements de comportements collectifs, tels que la formation de coalitions sur le marché du café, montre que les machines de Mealy, et par conséquent les programmes Q , ne sont pas les modèles les plus simples des interactions. Les programmes Q qui reproduisent certains types d'interactions sont inutilement compliqués.

6.3.1 Machines de Mealy en parallèle

Le modèle des *cues*, qui est un modèle fondé sur la réaction à un stimulus, correspond bien aux interactions. Le problème se situe dans la gestion de plusieurs stimuli en parallèle. Lorsqu'un joueur tente de former une coalition, il va négocier avec plusieurs autres joueurs en même temps. Cette négociation prend la forme de plusieurs interactions menées en parallèle.



FIG. 6.10: Paillason "irasshaimase" de *combi*

Le langage Q et les machines de Mealy ne permettent pas de décrire un comportement pourtant plus simple que celui de l'initiateur de coalitions : le comportement de l'employé du *combi*. Les *combi* (dérivé de l'anglais *convenience store*) sont des

magasins japonais ouverts 24h/24 qui vendent toutes sortes de biens et de services, de l'épicerie à la teinturerie. Comme dans la plupart des magasins au Japon, les employés des *combinis* souhaitent la bienvenue aux clients qui entrent avec une formule consacrée, parfois inscrite jusque sur le paillason : *irasshaimase* (いらっしゃいませ, figure 6.10). La formule est prononcée quelle que soit l'activité de l'employé lorsque le client entre : encaissement, réassort, relations avec les fournisseurs, etc. Dans mon quartier, un des *combinis* est tenu par une famille qui finit par avoir une relation particulière avec le voisinage. Lorsque le client est un habitué, la formule consacrée, qui est accompagnée d'un regard pour voir qui entre dans le magasin, est suivie d'un bonjour ou bonsoir cordial et souriant.

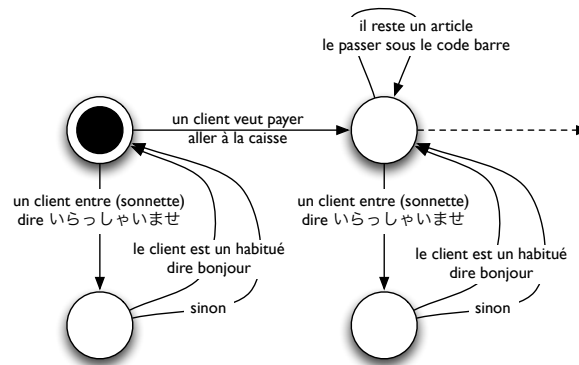


FIG. 6.11 : Modélisation "Mealy" des interactions de l'employé du *combinis*

Ces interactions se modélisent assez difficilement avec une machine de Mealy. Pour les modéliser, il faut doubler chaque état et ajouter une transition supplémentaire. La figure 6.11 représente une telle machine de Mealy. En revanche, ces interactions peuvent se modéliser beaucoup plus simplement si on a recourt à plusieurs machines de Mealy fonctionnant en parallèle (figure 6.12).

L'exemple très simple de l'employé du *combinis* donne un aperçu de certaines propriétés qui manquent au langage Q pour qui souhaite modéliser les interactions dans le cas des simulations multi-agents participatives. De la même manière que l'employé du *combinis* réagit de manière spécifique à des stimuli tels que remarquer qu'un client veut payer ou entendre la sonnette de la porte, les agents impliqués dans des compor-

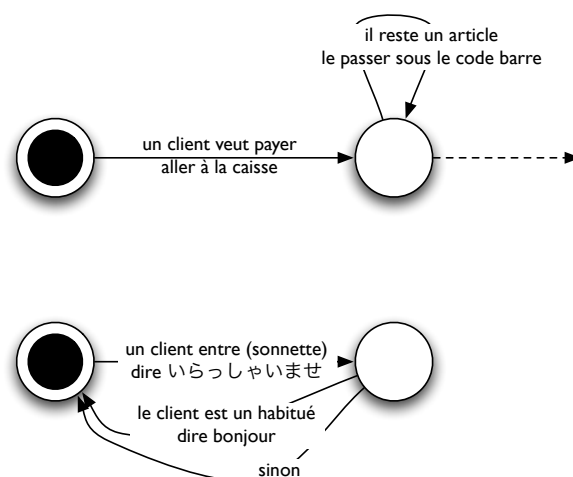


FIG. 6.12: Plusieurs machines de Mealy pour modéliser les interactions de l'employé du *comбини*

tements collectifs ont des réactions spécifiques à certains messages. Dans SimCafé, les joueurs, tout en poursuivant leurs négociations, redémarraient la production de café à chaque fois que l'interface graphique leur indiquait qu'une production venait de se terminer.

Les réactions sont parfois conditionnées par l'état de l'agent. Par exemple, l'employé du *comбини* ne dira pas *irasshaimase* lorsqu'il est au téléphone. De la même manière, un joueur ne relancera pas la production de café s'il n'a plus de café cereza à transformer en café pergamino.

6.3.2 Extension de Q

Le langage Q a plusieurs propriétés qui en font le candidat idéal pour décrire les interactions entre les joueurs des simulations multi-agents participatives [Ishida et Fukumoto, 2002; Ishida, 2002]. Par exemple, le fait de ne pas se fonder sur les motivations ou les stratégies des joueurs permet de ne pas interpréter ce que font les joueurs à partir d'un modèle informatique inadapté. Il n'est pas question avec Q de prêter aux joueurs des motivations ou des objectifs ni même un modèle calculable *a priori* de leur comportement. Un autre avantage est l'extrême lisibilité des cartes d'interaction qui

regroupent, sous forme de scènes, les interactions en fonction de leurs contextes.

L'exemple du *combin* ainsi que l'analyse des enregistrements des simulations multi-agents participatives montrent qu'il faut ajouter à *Q* la possibilité de gérer plusieurs actions en parallèle. Pour créer des scénarios qui peuvent être interprétés de manière déterministe, le langage pourrait par exemple inclure des nœuds `activate` qui reprennent le principe des nœuds `go`. Ces nœuds activeraient des réactions qui se feraient en parallèle d'un autre comportement. Ces réactions devraient pouvoir être inhibées avec des nœuds `deactivate`.

L'idée d'une telle extension a été discutée avec les membres de l'équipe de Toru Ishida qui travaillent sur l'interprète *Q*. Sa mise en œuvre requiert de complètement ré-écrire une large part de l'interprète. Pour ajouter la possibilité de réactions en parallèle, il faut modifier le cœur du processeur *Q*. Il faut également que le nœud `guard` soit conforme à la spécification du langage, et ne procède pas par attente active et interrogation séquentielle des *cues* comme c'est actuellement le cas.

À l'heure actuelle, l'ajout de ces extensions à *Q* est toujours en discussion.

6.4 Conclusion : trois propriétés de la modélisation informatique des interactions

Pour qu'un langage de description permette de modéliser les interactions des joueurs et de concevoir des agents logiciels capables de participer avec des humains à des activités de groupe, il faut que ce langage ait trois propriétés :

- Il doit présenter les actions comme des réactions à des stimuli, c'est-à-dire à des changements dans l'environnement, ou à des actions des autres joueurs. La capacité d'initiative peut s'interpréter comme une réaction à l'absence de stimuli pendant une certaine période.
- Il doit faire abstraction des mécanismes internes en dissociant l'implémentation de la structure, comme le fait *Q*. L'implémentation ne sert que pour la conception des agents. Les modèles des interactions entre les joueurs doivent laisser une place à des comportements dont les détails ne sont pas déterminés à

l'avance.

- Enfin, il doit pouvoir représenter des activités parallèles qui peuvent être inhibées.

Le parallélisme fait défaut au langage *Q* mais, utilisé comme langage de description des actions des joueurs, il a comme avantage de permettre de proposer aux experts des cartes d'interaction lisibles. Ce sont des tableaux synthétiques qui regroupent les actions des participants en fonction de leur sens et du contexte. Il est possible de créer ces tableaux de manière semi-automatique à partir des enregistrements des expériences de simulations.

Le seul enregistrement des simulations multi-agents participatives ne permet pas d'inférer les raisonnements et les motivations des joueurs (cf. chapitre 3). Leurs stratégies peuvent être révélées par le contenu des messages échangés et par les séances de verbalisation (cf. chapitre 4). Si des stratégies émergent, c'est-à-dire s'il apparaît des stratégies qui ne sont pas envisagées dans le modèle initial, le cadre des simulations multi-agents participatives permet de construire un modèle informatique des agents utilisant ces stratégies, et de mesurer l'efficacité du système multi-agents ainsi constitué par rapport au modèle a priori.

7 Emergence et résolution collective de problèmes

Les quatre chapitres précédents reposent sur l'idée, et sur des expériences qui la confirment, que des comportements collectifs apparaissent ou émergent lors des simulations multi-agents participatives. Le chapitre 3 a montré qu'elles permettent de valider des modèles de résolution collective de problèmes construits *a priori*, le chapitre 4 qu'elles permettent de mieux expliciter les stratégies individuelles afin de reproduire les mécanismes de résolution collective, le chapitre 5 que le canal de communication entre les joueurs doit être suffisamment large pour que des résolutions collectives émergent, et le chapitre 6 a présenté les propriétés nécessaires pour qu'un langage permette de décrire les comportements individuels et les interactions dans ces simulations.

La question traitée dans ce chapitre est de déterminer pourquoi des comportements collectifs qui permettent de résoudre des problèmes, émergent lors des simulations multi-agents participatives. En d'autres termes, à partir d'une analyse de la notion d'émergence et d'un exemple concret de l'émergence d'un rôle qui permet de concevoir un système multi-agents plus efficace, ce chapitre explique pourquoi les simulations multi-agents participatives "marchent".

La première partie propose une définition épistémique de l'émergence qui permet d'analyser ce qui se produit dans les systèmes complexes réels, et ce que cherchent à reproduire les concepteurs de systèmes multi-agents lorsqu'ils veulent faire émerger des solutions collectives aux problèmes. La seconde partie du chapitre montre, par un exemple, que les simulations multi-agents participatives permettent de faire émerger

des comportements collectifs qui améliorent l'efficacité du modèle a priori.

7.1 Définition épistémique de l'émergence

7.1.1 Notion d'émergence en philosophie

L'émergence est à l'origine un concept philosophique. Le terme provient de l'*émergentisme britannique*, courant lancé par John Stuart Mill et à son apogée au début du XX^{ème} siècle avec Samuel Alexander et Charlie Dunbar Broad. Ces auteurs définissent une hiérarchie des propriétés : physiques, chimiques, biologiques et psychologiques. Ils définissent l'émergence comme l'apparition, à travers l'évolution du monde, de propriétés d'un certain niveau à partir de propriétés du niveau précédent. Par exemple, les propriétés chimiques émergent des propriétés physiques.

Le concept d'émergence a été repris par l'intelligence artificielle distribuée [Demazeau, 1993; Jean *et al.*, 1997]. De la même manière que l'intelligence artificielle ne propose pas une définition unique de la notion d'intelligence, et que les chercheurs travaillant sur les agents ne s'accordent pas sur une définition précise des agents, il existe plusieurs définitions de l'émergence [Deguet *et al.*, 2005].

Je propose ici une définition épistémique de l'émergence qui se fonde sur notre rapport au système en tant que système étudié. Elle explique dans quels cas nous pouvons dire qu'un système est émergent ou qu'une propriété émerge. Une telle définition est fondée sur le problème que pose aux scientifiques l'idée même d'émergence.

7.1.2 L'émergence comme problème scientifique

Emergence et complexité

L'émergence est tellement liée aux systèmes complexes qu'elle est souvent considérée comme la caractéristique de ces systèmes [Standish, 2001]. Ils sont parfois définis formellement comme des systèmes composés, de manière non linéaire, de nombreuses parties. Ces systèmes peuvent également être définis comme des systèmes où le tout est plus que la somme des parties. Cette propriété, qui est historiquement un

énoncé de la théorie de la *Gestalt* [Wertheimer, 1925], est cohérente avec la définition formelle au sens où, mathématiquement, un système linéaire est littéralement la somme de ses parties.

Le plus souvent, la complexité est définie par extension, c'est-à-dire en énumérant des exemples de systèmes complexes. Les colonies de fourmis sont un des exemples les plus cités par les chercheurs travaillant sur les systèmes multi-agents [Parunak, 1997].

Parfois, il est également fait référence aux liquides. La liquidité de l'eau à température ambiante n'est pas une propriété individuelle des molécules mais une propriété de l'ensemble. Ce type d'émergence peut être qualifié d'ontique : l'émergence ontique désigne des systèmes qui ont des propriétés qui ne sont pas des propriétés de leurs constituants, au sens où ces propriétés ne peuvent s'appliquer qu'au système. On ne peut pas dire qu'une molécule d'eau soit liquide mais un ensemble de telles molécules, dans des conditions de pression et de température précises, est liquide. Les conditions d'apparition de la liquidité ne posent pas de réel problème à la science : l'émergence qui intéresse les chercheurs est plutôt l'émergence diachronique de propriétés de l'ensemble.

Une nouvelle science ?

Une étude systématique des définitions du concept d'émergence par Joris Deguet, Yves Demazeau et Laurent Magnin, révèle que plusieurs milliers d'articles scientifiques mentionnent le mot clef "*emergence*" [Deguet *et al.*, 2005]. L'essentiel de ces travaux portant sur l'émergence se concentrent sur les systèmes complexes.

Les travaux sur les systèmes complexes constituent désormais un champ disciplinaire à part entière avec, par exemple, la conférence européenne ECCS dédiée à l'étude de ces systèmes (*European Conference on Complex Systems*). Les chercheurs spécialisés dans l'étude de ces systèmes n'hésitent pas à prôner la formation d'une nouvelle science. Ils font écho à l'ouvrage de Stephen Wolfram, publié par *Wolfram Media, Inc.* et intitulé "Un nouveau genre de science" [Wolfram, 2002]. Cet ouvrage, à l'origine d'une polémique [Mitchell, 2002, 2003], décrit longuement l'émergence de

formes dans la représentation de l'évolution d'automates cellulaires unidimensionnels. En se fondant sur une classification des automates cellulaires, Stephen Wolfram fait le lien entre la "Turing-complétude" des automates étudiés, et l'émergence des formes qu'il observe dans ces automates [Wolfram, 1984b]. Le nouveau genre de science qu'il propose permettrait d'analyser les processus physiques à l'aide de simulations informatiques [Wolfram, 1985].

L'idée d'une nouvelle science à partir des simulations de systèmes complexes est également présente chez les chercheurs travaillant sur les systèmes et des simulations multi-agents. Par exemple, Hiroshi Deguchi propose de créer une science des systèmes multi-agents sociaux¹ [Deguchi, 2005]. La science qu'il cherche à fonder, à la jonction de seize domaines scientifiques tels la philosophie des sciences, la sociologie et l'étude des relations internationales, permettrait selon lui d'aborder des problèmes sociaux, organisationnels et économiques en termes de processus de décision collective par un grand nombre d'agents autonomes ou hétérogènes (i.e. semi-contrôlés par des humains).

En cherchant à explorer, modéliser et reproduire les comportements collectifs, les simulations multi-agents participatives ont été conçues pour viser les objectifs scientifiques qui ont inspirés ces propositions pour fonder de nouvelles sciences, mais à une échelle modeste.

7.1.3 Émergence et complexité dans les systèmes multi-agents

Le concept d'émergence est central dans la communauté des systèmes multi-agents et de la vie artificielle [Müller, 2003; Drogoul *et al.*, 2004]. Il suscite un grand intérêt chez les chercheurs francophones depuis les années 1990². Ce concept a été l'objet

¹ *Eijento beisu shakai shisutemu kagaku no sōshutsu* (エージェントベース社会システム科学の創出), où *kagaku* (科学) signifie la ou les sciences, comme dans "histoire des sciences" ou "sciences sociales".

² Voir notamment Jean *et al.* [1997]; Bonabeau *et al.* [1994]; Bonabeau [1994]; Deneubourg *et al.* [1991a,b, 1992]; Drogoul et Ferber [1991]; Drogoul *et al.* [1992a,b]; Drogoul et Ferber [1994]; Demazeau [1993]; Ferber [1995]; Ferrand *et al.* [1998]; Magnin [1996]; Marcenac [1996]; Müller et Pecchiarri [1996a,b]; Marcelpoil *et al.* [1994]; Steels [1990, 1991]

d'une session entière de la conférence internationale AAMAS (*Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*) en 2005.

Quels que soient les critères de définition retenus, les systèmes multi-agents sont des systèmes complexes. Ils sont composés de manière non linéaire de plusieurs agents et l'ensemble a des propriétés que n'ont pas les agents pris individuellement.

Émergence et ingénierie

Il existe un débat sur l'existence même de l'émergence. Pour des auteurs comme Daniel Memmi, l'émergence ne serait qu'une manière d'expliquer un phénomène, un niveau d'explication [Memmi, 1996]. L'émergence traduirait presque un échec de l'analyse.

Cette critique est très perturbante dès lors qu'il s'agit de concevoir des systèmes dans lesquels émergent des solutions collectives. La réponse apportée par Jean-Pierre Müller est que les fourmis n'ont pas attendu que nous les observions pour avoir des comportements émergents [Müller, 2003].

Une définition épistémique de l'émergence dissout le problème posé par Daniel Memmi [Guyot, 2003a]. Il est posé que l'émergence est bien un échec de l'analyse : c'est l'impossibilité de prédire l'évolution d'un système de manière analytique, c'est-à-dire de dériver analytiquement les propriétés de l'ensemble à partir des propriétés des composants. Un système est complexe si son évolution échappe à nos capacités d'analyse. Pour prédire cette évolution, il faut le simuler, c'est-à-dire qu'il faut déployer un système aussi complexe que le système lui-même [Wolfram, 1984a].

Cette définition lie émergence et simulations informatiques [Darley, 1994]. Elle n'est cependant pas négative, à l'inverse de la proposition de Daniel Memmi : elle postule la réalité objective de l'émergence. Nous ne connaissons les causes et les détails de l'évolution de certains phénomènes, tels les phénomènes de turbulence, la transmission d'information à l'intérieur des cellules [Weng *et al.*, 1999] ou la recherche de nourriture par les fourmis, qu'en les simulant. Certes, un chercheur en intelligence artificielle, en voyant le diagramme d'états d'un agent simulant une fourmi et son marquage aux

phéromones, pourra dire qu'une population de tels agents est capable de trouver des sources de nourriture et de collectivement les exploiter. Mais cette connaissance est directement issue de la simulation, c'est-à-dire de l'opération qui consiste à dérouler l'évolution de chaque agent fourmi. C'est une connaissance *synthétique a posteriori* (au sens kantien), acquise par l'expérience de la simulation.

De plus, cette définition épistémique de l'émergence est compatible avec l'objectif d'ingénierie de systèmes complexes dans lesquels émergent des propriétés. Les concepteurs de systèmes multi-agents ne peuvent savoir que des propriétés émergent que par la simulation de leurs systèmes. Cette définition correspond à la réalité du processus de conception de systèmes multi-agents, et de tout système complexe en général. Il s'agit d'un processus itératif qui comporte un énorme travail d'ajustements.

En dépit de la structure narrative de leurs articles scientifiques, les économistes procèdent de la même manière avec leurs simulations. En interrogeant Gene Grossman et Elhanan Helpman, deux auteurs d'un article d'économie fondé sur un modèle économétrique [Grossman et Helpman, 1994], Daniel Breslau et Yuval Yonay ont révélé que le modèle mathématique présenté de manière définitive dans l'article est en fait le résultat de multiples expériences de simulations, et de nombreux ajustements des paramètres des équations [Breslau et Yonay, 1999]. Les modifications apportées au modèle lors de la phase de tâtonnement sont justifiées *a posteriori* par des observations empiriques supplémentaires.

Par rapport aux démarches de conception de systèmes ou de modèles fondées sur l'émergence, les simulations multi-agents participatives constituent deux apports. En faisant participer les acteurs, les simulations multi-agents participatives permettent de concevoir des systèmes complexes sans passer par une importante phase de tâtonnement avant qu'émerge une solution collective au problème posé. De plus, lorsque ces expériences sont utilisées pour valider et consolider des modèles de comportements sociaux, elles ne nécessitent pas de justifier les valeurs des paramètres *a posteriori*, par l'observation.

7.2 Observation et ingénierie

Depuis les expériences SimCafé, j'ai pu observer l'émergence de comportements imprévus dans les expériences de simulation multi-agents participatives. Dans le cas de SimCafé, le rôle qui a émergé a permis d'améliorer l'efficacité du système en tant que système multi-agents.

7.2.1 Deux faces de l'émergence

Deux principes pour favoriser l'émergence

L'émergence de comportements, prévus ou imprévus, est favorisée dans les simulations multi-agents participatives par deux principes.

Le premier principe est de diviser les interactions en primitives, afin d'éviter que les joueurs soient forcés de suivre un protocole d'interaction défini à l'avance. Par exemple dans SimCafé, l'achat de café se divise en transfert de café, transfert d'argent et envoi de messages instantanés. Les joueurs sont libres de ne s'envoyer que de l'argent, que du café ou que des messages, ou de choisir toute combinaison des trois. Ils peuvent également imaginer des protocoles d'interaction non prévus, comme l'achat à terme ou la vente d'information. De la même manière, la négociation dans SimCommod et dans SimBar III se fait sous la forme d'envois de messages instantanés. À l'inverse des protocoles des systèmes multi-agents ou des expériences de l'économie expérimentale, les simulations multi-agents participatives ne suivent pas des protocoles complexes comme Contract Net (cf. chapitre 3) ou les systèmes d'enchères (cf. chapitre 5).

Le second principe est de créer des situations qui laissent place à l'innovation des joueurs et à l'émergence de comportements collectifs. Dans SimCafé, une proportion importante des offres d'achat envoyées par l'acheteur ne pouvaient pas être satisfaites directement par les producteurs, et la durée de la validité de l'offre laisse suffisamment de temps aux joueurs pour élaborer des solutions collectives. Dans SimCommod, le nombre d'exploitants était tel que la quantité de ressource diminuait sous la pression de l'exploitation. SimBar était également construit sur une situation qui favorisait l'innovation parce qu'il n'existait pas de stratégie gagnante et que les joueurs majoritaires

gagnaient moins de points que les joueurs minoritaires.

Maîtrise ou surprise

Dans une certaine mesure, l'émergence peut être prévue et maîtrisée. Par exemple dans SimCafé, des coalitions se sont formées comme prévu. La formation de coalitions n'était pas une propriété des rôles individuels des joueurs mais une propriété émergente favorisée par les deux principes énoncés précédemment.

Des comportements imprévus peuvent également apparaître. Par exemple, dans l'expérience SimBar III menée en avril 2006 à Tokyo, un des joueurs a envoyé des messages répétitifs "n'allez pas au bar" de manière massive pour empêcher les autres joueurs de collaborer. Ses messages créaient ainsi des interférences dans les communications entre les joueurs. Il a aussi suggéré que les joueurs dont les avatars ont des moustaches n'aillent pas au bar. Comme il l'a expliqué après l'expérience, il y a trois ou quatre (en réalité quatre) avatars avec des moustaches et si ces joueurs ne vont pas au bar, le total des scores est maximal. En effet, comme sur les dix avatars, quatre portent la moustache, une solution du problème est que seuls ceux qui n'ont pas de moustache aillent au bar (figure 7.1). Dans cette partie, les joueurs ont aussi formé une Ligue des Chauves (*hage dōmeigumi*, ハゲ同盟組).

De la même manière, dans SimCommod-Tokyo (cf. section §5.3), je n'avais pas prévu qu'un des environmentalistes introduise des notions concrètes, ni que cette introduction lui donne du pouvoir sur les exploitants.

En divisant les actions des joueurs en primitives, l'émergence imprévue peut prendre la forme de nouveaux protocoles d'interaction qui correspondent à des rôles spécialisés, ou à des modèles d'interaction différents des modèles initiaux. Par exemple, lors des expériences SimCafé, le joueur contrôlant Ignacio a tenté de former des alliances à l'image des coopératives. Ce comportement est d'autant plus surprenant que les coopératives ont été volontairement écartées du modèle du jeu. En effet, le modèle du domaine indique que les coopératives servent essentiellement à partager les risques (transports, intempéries, etc.), lesquels étaient absents dans le

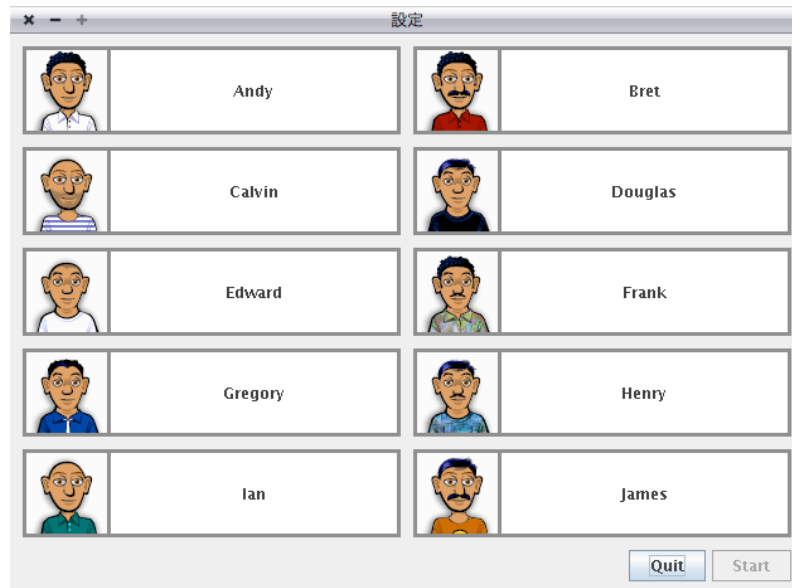


FIG. 7.1: Avatars de SimBar

modèle du jeu pour des raisons de simplification.

Le courtier de SimCafé

Un rôle encore plus surprenant est apparu lors de ces mêmes expériences. Le joueur contrôlant Abelardo a envoyé des messages à l'ensemble des producteurs en mentionnant qu'il achetait ou qu'il vendait de grandes quantités de sacs de café. Ce joueur a également proposé d'acheter du café et de ne payer que plus tard, une fois le café revendu à l'acheteur. Ce joueur s'est donc comporté en courtier, achetant et vendant du café en fonction des offres publiques de l'acheteur. Ce rôle est très différent du rôle de producteur de café dans le modèle du domaine.

A posteriori, l'émergence de ce rôle s'explique par le fait que les agents sont contrôlés par des humains qui sont beaucoup plus pro-actifs et inventifs que les agents du modèle initial. Dans le modèle initial des coalitions, les agents ne font que réagir aux offres de l'acheteur ou aux messages des autres producteurs.

L'ensemble des innovations mises en œuvre par les joueurs lors des expériences de simulations multi-agents participatives, et en particulier les rôles émergents, peuvent

être utilisés pour améliorer les capacités de résolution de problèmes d'un système multi-agents entièrement logiciel.

7.2.2 Conception participative des systèmes multi-agents

Le rôle de courtier pourrait être validé ou invalidé par des experts du domaine. Du point de vue informatique, cette validation n'a pas tellement d'importance. En effet, on peut considérer le modèle du marché du café comme un système multi-agents chargé de résoudre collectivement un problème : répondre de manière la plus efficace possible aux offres de l'acheteur qui ne sont pas négociables.

En tant que système multi-agents, l'ensemble des producteurs est plus efficace s'ils se coalisent que s'ils ont un comportement solipsiste, c'est-à-dire s'ils ne communiquent pas et n'acceptent les offres que lorsque leur stock permet de les satisfaire. Le système est également plus efficace si les producteurs ont la possibilité d'envoyer des messages par multi-diffusion que s'ils ne peuvent communiquer qu'avec un seul producteur à la fois.

À l'aide de la plate-forme Cormas [Bousquet *et al.*, 1998], j'ai construit des simulations multi-agents, CormasCafé, pour mesurer l'impact du rôle de courtier. Ces simulations considèrent cinq cas différents.

Solipsistes

Dix producteurs avec une stratégie solipsiste. Ils ne communiquent pas avec les autres producteurs.

Coalitions simples

Dix producteurs avec une stratégie de coalition simple. Si un producteur reçoit une offre d'un autre producteur, il l'accepte avec une probabilité égale au rapport entre la marge de l'offre (prix proposé moins le prix du cereza) et la marge de la dernière offre de l'acheteur. Si un producteur reçoit une offre de l'acheteur qu'il ne peut pas satisfaire seul, il envoie une offre pour ce qui manque avec un prix choisi aléatoirement selon une loi uniforme, entre le prix du cereza et le prix de l'offre de l'acheteur.

Coalitions avec multi-diffusion

Dix producteurs avec une stratégie de coalition utilisant la multi-diffusion. La stratégie est similaire à la stratégie de coalition simple mais les producteurs contactent tous les autres producteurs à la fois, pour leur envoyer une proposition.

Courtier

Neuf producteurs avec une stratégie de coalition simple et un producteur avec une stratégie de courtier. Les producteurs acceptent les offres d'achat du courtier exactement comme ils acceptent les offres des autres producteurs. Ils acceptent les offres de vente du courtier si elles leur permettent d'accepter l'offre courante de l'acheteur. Le courtier se comporte comme un producteur mais les offres qu'il envoie sont aléatoirement des offres de vente et des offres d'achat.

Courtier et multi-diffusion

Neuf producteurs avec une stratégie de coalition utilisant la multi-diffusion et un producteur avec une stratégie de courtier.

Dans ces cinq cas, l'acheteur ne peut avoir qu'une seule offre en cours. Il envoie une nouvelle offre dès que l'offre précédente est acceptée ou dès qu'elle a expiré. Les offres sont envoyées à tous les producteurs et le prix proposé est le double du prix du cereza. La quantité est choisie aléatoirement de façon à être supérieure au stock de chacun des producteurs, et inférieure au stock maximum qu'un producteur peut avoir après un cycle de production. La durée de l'offre est choisie aléatoirement entre un et deux cycles de production. Par conséquent, les producteurs ne peuvent pas accepter immédiatement une offre, mais ne sont pas forcés de négocier; ils peuvent se contenter de produire le café manquant.

Le cycle de production est de 12 pas de temps. Les agents n'effectuent qu'une action par pas de temps (démarrer la production, accepter une offre, envoyer une offre, etc.).

La figure 7.2 présente le nombre d'offres acceptées dans les cinq cas considérés. Comme prévu, le système est plus efficace lorsque les agents se coalisent que lorsqu'ils ont un comportement individualiste. Il est aussi plus efficace lorsque les agents envoient des messages par multi-diffusion, ce qui n'est pas surprenant parce que cela diminue le coût de la communication : un pas de temps suffit pour contacter les neuf autres

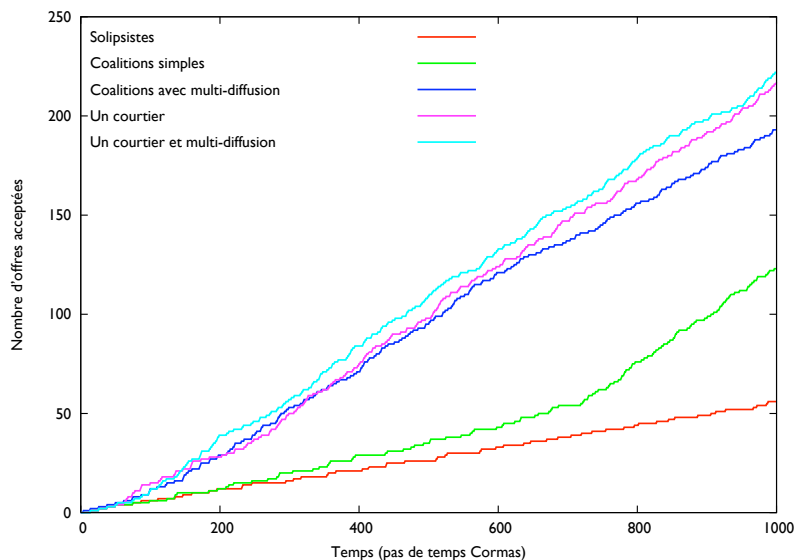


FIG. 7.2: Comparaison de l'efficacité des différentes stratégies (simulations Cormas)

producteurs.

La figure 7.2 révèle également que si l'un des producteurs adopte une stratégie de courtier, l'efficacité du système multi-agents est sensiblement supérieure. L'efficacité est maximale lorsque les autres producteurs utilisent la multi-diffusion.

A posteriori, ce résultat n'est pas plus surprenant que le rassemblement de jetons par une population virtuelle de termites. Le courtier améliore la flexibilité de ce marché virtuel, et les offres de vente qu'il propose sont acceptées dès qu'elles permettent de conclure l'offre de l'acheteur. Ce qui est particulièrement intéressant ici, c'est l'innovation des joueurs dans les simulations multi-agents participatives. Parce qu'ils sont réellement placés au cœur du système, les joueurs conçoivent des stratégies innovantes plus efficaces que celles imaginées par le concepteur qui, extérieur au jeu, n'a qu'une vue d'ensemble.

7.3 Conclusion

Les simulations multi-agents participatives permettent de faire émerger des méthodes innovantes de résolution collective de problèmes pour quatre raisons.

Premièrement, les entités individuelles ont toutes les propriétés désirables des agents : ce sont des agents contrôlés par des humains et donc doués de pro-activité, d'autonomie, de capacités d'adaptation et d'intelligence. Les problèmes résolus par les simulations multi-agents participatives sont ceux que peuvent résoudre les systèmes multi-agents.

Deuxièmement, les interactions sont découpées en primitives, ce qui permet aux joueurs d'inventer des rôles et des protocoles d'interaction pour résoudre le problème. L'observation des expériences de simulations multi-agents participatives montre qu'émergent, entre les joueurs, des rôles ou des formes d'organisation adaptés au problème posé.

Troisièmement, les modèles sont fondés sur des problèmes compliqués qui nécessitent de mettre en œuvre des stratégies collectives pour les résoudre. Le modèle du bar El Farol n'a pas de solution gagnante a priori. Les paramètres des différents modèles sont choisis pour confronter les joueurs au problème. Par exemple, l'environnement dans SimCommod devient très blanc après les deux ou trois premiers tours du jeu.

Quatrièmement, à l'inverse de l'économie expérimentale, la possibilité de pouvoir librement communiquer permet aux joueurs de se coordonner et d'élaborer des comportements collectifs.

L'ingénierie des systèmes multi-agents consiste à concevoir des stratégies individuelles pour faire émerger des solutions aux problèmes. La méthode de conception utilisée repose sur des modèles a priori et sur le tâtonnement pour fixer les valeurs des paramètres.

L'expérience montre que les simulations multi-agents participatives permettent de concevoir, de manière participative, des systèmes multi-agents capables de résoudre les problèmes de manière plus efficaces que des systèmes multi-agents fondés sur les modèles a priori. De la même manière, les simulations multi-agents participatives

7. EMERGENCE ET RÉOLUTION COLLECTIVE DE PROBLÈMES

pourraient être utilisées pour concevoir des protocoles d'interaction plus efficaces.

8 Conclusion

Les simulations multi-agents participatives permettent d'explorer, de modéliser et de reproduire, dans les systèmes multi-agents, les capacités d'innovation mises en œuvre par les groupes sociaux pour résoudre collectivement des problèmes.

La première partie de cette conclusion résume l'apport principal des simulations multi-agents participatives : la construction de systèmes multi-agents pour résoudre collectivement des problèmes en s'inspirant des comportements sociaux. Même si ces simulations sont avant tout des objets informatiques, elles s'inscrivent dans la continuité de recherches pluridisciplinaires ; la seconde partie présente des apports de ces simulations pour d'autres disciplines. Enfin, la troisième partie replace les simulations multi-agents participatives dans le contexte du problème posé par la conception de communautés mixtes et explique comment elles pourront permettre de concevoir des systèmes dans lesquels émergeront des comportements collectifs hybrides.

8.1 Construction de systèmes multi-agents

Les dix sessions d'expériences que j'ai menées illustrent différentes propriétés des simulations multi-agents participatives pour la construction de systèmes multi-agents. Elles ont permis de valider les modèles a priori qui sont utilisés pour construire des systèmes multi-agents (cf. chapitre 3). Elles ont permis d'aider les participants à expliciter leurs stratégies individuelles, avec l'objectif de coder les comportements individuels des agents (cf. chapitre 4). Elles ont également permis de déterminer deux conditions suffisantes pour qu'émergent des stratégies collectives : les participants doivent pou-

voir communiquer librement (cf. chapitre 5) et les interactions doivent être divisées en primitives (cf. chapitres 3 et 7). Enfin, ces expériences ont confirmé l'importance de la participation pour modéliser et reproduire les comportements sociaux. En faisant jouer des humains, des comportements non prévus dans le modèle a priori peuvent émerger, comme le rôle de courtier, et améliorer la résolution collective d'un problème particulier, ici la gestion d'offres d'achat à terme et non négociables (cf. chapitre 7).

Deux autres résultats ont été obtenus en travaillant sur les enregistrements des simulations (chapitre 6) : la mise au point d'une technique pour extraire des éléments des interactions enregistrées, et la détermination de trois propriétés nécessaires pour qu'un langage permette de décrire ces interactions. La technique d'extraction permet de générer des programmes pour construire des agents de manière semi-automatique à partir des expériences de simulations participatives. Un langage avec les propriétés retenues permettrait de mieux modéliser les interactions entre des agents qui participent à un phénomène collectif au sein d'un système multi-agents.

Enfin, les expériences de simulations multi-agents participatives ont révélé que la notion de pouvoir, très peu formalisée dans les systèmes et les simulations multi-agents, ne repose pas uniquement sur une relation de dépendance, et que les protocoles de négociation entre agents dans un système ouvert, qui reposent sur l'*alignement* préalable des *ontologies*, négligent souvent l'importance de la négociation des termes employés.

En marge de l'ensemble de ces résultats, les simulations multi-agents participatives, parce qu'elles s'inscrivent dans une tradition pluridisciplinaire, apportent des résultats à des problèmes extérieurs à l'informatique.

8.2 Apports des simulations multi-agents participatives pour d'autres disciplines

Comme les simulations multi-agents, les simulations multi-agents participatives constituent une méthode qui peut être utilisée dans d'autres disciplines.

Les expériences SimCafé montrent qu'elles permettent d'explorer et d'étudier des comportements collectifs pour eux-mêmes (cf. chapitre 3). L'usage d'agents assistants maïeutiques, même s'ils ne sont dotés que de capacités d'apprentissage limitées, permet de faire expliciter les comportements individuels, et favorise la discussion après les expériences. Ce résultat repose sur l'usage des simulations multi-agents pour modéliser et étudier des comportements collectifs.

La possibilité d'étudier des comportements collectifs à l'aide des simulations multi-agents participatives doit néanmoins être relativisée. Comme les simulations multi-agents, ces simulations imposent le cadre des agents à l'étude des comportements. Dans le cas des expériences menées, cette contrainte signifie que les participants ne peuvent interagir que sous la forme d'interactions entre agents. Cette contrainte a énormément d'avantages, comme la possibilité d'enregistrer la totalité des interactions puis d'extraire automatiquement des séquences significatives des enregistrements. Mais elle introduit également un biais non négligeable. Pour que des chercheurs en sciences sociales adoptent les simulations multi-agents participatives, il faut qu'ils mesurent toute l'importance de ce biais.

Les différentes expériences montrent également que les simulations multi-agents participatives peuvent être perçues comme une fusion des jeux de rôles et des simulations multi-agents (cf. chapitre 4). En ce sens, ces simulations constituent une alternative crédible à l'approche MAS/RPG (*Multi-Agent Systems/Role Playing Games*), non seulement pour l'étude de comportements collectifs, mais également pour ses qualités pédagogiques et d'aide à la décision. Parce qu'il s'agit de construire des systèmes multi-agents, les simulations multi-agents participatives sont conçues pour expliciter et mieux formaliser les stratégies individuelles. Ces deux objectifs informatiques confèrent un avantage aux simulations multi-agents participatives sur la méthode MAS/RPG : elles permettent de mieux faire expliciter les stratégies individuelles à l'aide d'agents maïeutiques et elles imposent aux participants le mode d'interaction, rendant plus facile la formalisation des comportements pour mettre au point des simulations multi-agents.

Enfin, les expériences ont apporté deux résultats, quoique mineurs, à l'économie expérimentale (cf. chapitre 5). Le premier est le lien entre l'utilisation de symboles

8. CONCLUSION

abstrait et l'impossibilité de communiquer verbalement pendant les expériences. Ces deux préceptes méthodologiques sont justifiés indépendamment et pour eux-mêmes dans la littérature sur l'économie expérimentale [Friedman et Sunder, 1994; Camerer, 2003]. Les expériences ont montré que l'usage de symboles abstraits introduit un biais lorsque les joueurs peuvent communiquer. Le second résultat porte sur la nécessité de libérer quelque peu la communication entre les joueurs pour qu'émergent des comportements collectifs. Pour des auteurs comme Vernon Smith, l'économie expérimentale permet de tester l'impact de l'institution, c'est-à-dire des règles qui agrègent les préférences et les comportements individuels [Smith, 1989, 1994]. Leurs expériences permettent de vérifier certaines propriétés des institutions et ne portent pas sur les comportements collectifs eux-mêmes. En revanche, lorsque qu'un auteur comme John Duffy s'intéresse aux conditions de l'émergence de la monnaie, et interdit aux agents de communiquer, ses expériences ne sont pas nécessairement invalidées, mais il introduit un tel biais que les joueurs sont forcés de suivre le modèle a priori [Duffy et Ochs, 1999; Duffy, 2006]. Des expériences de simulations multi-agents participatives ont montré qu'il n'est pas possible d'avoir recours à l'ensemble des préceptes de l'économie expérimentale pour étudier des problèmes difficiles de la théorie des jeux, comme le Bar El Farol, dans lesquels il n'existe pas de modèles a priori de comportements collectifs.

L'ensemble de ces résultats confirme l'importance de l'informatique et du chercheur en informatique dans ces recherches pluridisciplinaires. Indépendamment des moyens logiciels fournis, les objectifs informatiques de ces recherches permettent de tester et de mettre en œuvre des méthodes qui bénéficient aux autres disciplines, et bousculent certains résultats et certaines approches. De plus, les organisateurs des simulations participatives doivent endosser trois rôles différents, et l'expérience a montré que le programmeur, rôle souvent assumé par le chercheur en informatique, doit être présent lors des expériences pour faire les ajustements nécessaires en temps réel (cf. section §4.1.3).

8.3 Émergence de comportements collectifs dans les communautés mixtes

Les systèmes hybrides évoluent vers les communautés mixtes : les agents et les humains ont, de plus en plus souvent, des rôles interchangeables. Un certain nombre de systèmes ont été créés pour résoudre des problèmes spécifiques avec des objectifs ludiques, pédagogiques ou d'entraînement [Bouzouane *et al.*, 1998; Rickel et Johnson, 2000; Rickel *et al.*, 2001].

La construction de communautés mixtes pose un problème de tolérance réciproque [Demazeau, 2000; Chicoisne, 2002]. Les recherches actuelles portant sur cette tolérance se fondent sur les problématiques de présentation de soi et se concentrent sur des relations binaires entre agent et humain [Goffman, 1959; Nakanishi *et al.*, 2003].

Pour rendre possible l'émergence de comportements collectifs hybrides au sein de communautés mixtes, il est nécessaire de résoudre au préalable le problème de la tolérance *collective*. Les agents autonomes doivent avoir des comportements suffisamment élaborés pour que les participants les considèrent comme membres de la communauté dans laquelle va émerger un comportement collectif. Le travail présenté ici constitue une première étape. J'espère que les simulations multi-agents participatives permettront de résoudre ce problème : pour créer des agents tolérés par les participants et capables de collaborer avec eux au sein de comportements sociaux, il est nécessaire d'explorer, de modéliser et de reproduire les mécanismes collectifs mis en œuvre par les groupes sociaux humains.

Les expériences ont montré que les communications entre les membres d'une communauté doivent être suffisamment élaborées pour qu'émergent des comportements collectifs ; il faut définir une communication potentiellement assez riche entre les agents et les humains. Les simulations multi-agents participatives pourront être utilisées pour déterminer les actes de langage des humains entre eux, afin de construire des agents autonomes qui seront tolérés au sein de comportements collectifs hybrides.

Bibliographie

- ADAMATTI Diana F., SICHTMAN Jaime S., RABAK Cesar, BOMMEL Pierre, DUCROT Raphaèle et CAMARGO Maria E. S. A. JogoMan : A Prototype Using Multi-Agent-Based Simulation and Role-Playing Games in Water Management. In *Proceedings of the SMAGET-CABM-HEMA Conference*, 2005.
- ANDO Yasushi, MASUTANI Osamu, FUKAZAWA Yoshiaki, IWASAKI Hirotohi et HONIDEN Shinichi. Performance of Pheromone Model for Predicting Traffic Congestion. In STONE Peter et WEISS Gerhard (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-06)*, pages 73–80. ACM Press, 2006.
- ANDREONI James. Warm-Glow versus Cold-Prickle : the Effects of Positive and Negative Framing on cooperation in Experiments. *Quarterly Journal of Economics*, 110 :1–22, 1995.
- ARTHUR W. Brian. Inductive Reasoning and Bounded Rationality. *American Economic Review*, 84 :406–411, 1994.
- ARTHUR W. Brian. Complexity and the Economy. *Science*, 284 :107–109, avril 1999.
- AXELROD Robert. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. In ROSARIO CONTE, RAINER HEGSELMANN Pietro Terna (sous la dir.), *Simulating Social Phenomena*, pages 21–40. Springer, Berlin, 1997.
- AXELROD Robert. *The Complexity of Cooperation : Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton University Press, 1997.
- AXTELL Robert, AXELROD Robert, EPSTEIN J. et COHEN M. D. Aligning Simulation Models : A Case Study and Results. *Computational and Mathematical Organization Theory (CMOT)*, 1(1) :123–141, 1996.
- BAARD Mark. AI Founder Blasts Modern Research. *Wired News*, May 2003.
- BALCI Osman. Verification, validation, and accreditation. In *WSC '98 : Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pages 41–44, Los Alamitos, CA, USA, 1998. IEEE Computer Society Press.
- BARRETEAU Oliver. *Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation*. Thèse de Doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 1998.
- BARRETEAU Oliver. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes : characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2), 2003.

BIBLIOGRAPHIE

- BARRETEAU Oliver. Our Companion Modelling Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2), 2003.
- BARRETEAU Olivier et BOUSQUET François. Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. In M-P Gleizes et P Marcenac (sous la dir.), *Ingénierie des systèmes multi-agents, actes des 7èmes JFIADSMA*, pages 67–80. Hermès, 1999.
- BARRETEAU Olivier et BOUSQUET François. SHADOC : a Multi-Agent Model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research*, 94 :139–162, 2000.
- BARRETEAU Oliver, BOUSQUET François et ATTONATY Jean-Marie. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems : method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(2), 2001.
- BECKER Howard. *Outsiders, études de sociologie de la déviance*. Métailié, 1985 [1963].
- BOISSAU Stanislas. Co-evolution of a research question and methodological development : an example of companion modeling in northern Vietnam. In *Proceedings of the International Workshop on Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resources Management, Chiang Mai, Thailand, 18-20 octobre 2003*, 2003.
- BOISSAU Stanislas, LAN ANH Hoang et CASTELLA Jean-Christophe. The SAMBA Role Play Game in Northern Vietnam : An Innovative Approach to Participatory Natural Resource Management. *Mountain Research and Development*, 24(2) :101–105, 2004.
- BONABEAU Eric, DESSALLES Jean-Louis et GRUMBACH Alain. Characterizing emergent phenomena (1) and (2) : A critical review. *Revue internationale de systémique*, 9(3) :327–371, 1994.
- BONABEAU, ERIC THERAULAZ Guy. *Intelligence collective*. Hermes, 1994.
- BOUSQUET François. Modélisation d'accompagnement - Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables. mars 2001. Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à diriger les recherches.
- BOUSQUET François, BAKAM Innocent, PROTON Hubert et LE PAGE Christophe. Comas : Common-Pool Resources and Multi-agent Systems. In DEL POBIL Angel P., MIRA José et ALI Moonis (sous la dir.), *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence, 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE-98, Castellón, Spain, June 1-4, 1998, Proceedings, Volume II*, volume 1416 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 826–837. Springer-Verlag, 1998.
- BOUSQUET François, BARRETEAU Olivier, D'AQUINO Patrick, ETIENNE Michel, BOISSAU Stanislas, AUBERT Sigried, LE PAGE Christophe, BABIN Didier et CASTELLA J.-C. Multi-Agent Systems and Role Games : Collective Learning Processes For Ecosystem Management. In JANSSEN M. (sous la dir.), *Complexity and Ecosystem Management : The Theory and Practice of Multi-agent Approaches*, pages 248–285. Edward Elgar Publishers, 2002.
- BOUSQUET François, DAVIDSSON Paul et SICHMAN Jaime Simão. Report on the Multi-Agent Based Simulation (MABS) 2002 workshop, Bologna, Italy, July 2002. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2), 2003.

-
- BOUSQUET François, TRÉBUIL Guy, BOISSAU Stanislas, BARON C., D'AQUINO Patrick et CASTELLA J.-C. Knowledge Integration for Participatory Land Management : The Use of Multi-Agent Simulations and a Companion Modelling Approach. juin 2001. Workshop on "Participatory technology development and local knowledge for sustainable land use in Southeast Asia", Chiang Mai.
- BOUZOUANE Abdenour, DIONNE Carl, STIHARU-ALEXE Illie et GAGNÉ Denis. Jeu de rôle virtuel à base d'Agents Intelligents. In *JFIADSMA'98. Systèmes Multi-Agents, de l'interaction à la Socialité*, pages 147–161, Paris, 1998. Hermes.
- BRAINOV Sviatoslav et SANDHOLM Tuomas. Power, Dependence and Stability in Multiagent Plans. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'99)*, Orlando, pages 11–16. AAAI Press, 1999.
- BRESLAU Daniel et YONAY Yuval. Beyond Metaphor : Mathematical Models in Economics as Empirical Research. *Science In Context*, 2(12) :317–332, 1999.
- BROOKS Rodney A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1) :14–23, mars 1986.
- CACCIAGUERRA Stefano et ROFFILLI Matteo. Agent-based participatory simulation activities for the emergence of complex social behaviours. In *Proceedings of Social Inspired Computing '05*, 2005.
- CAMERER Colin F. *Behavioral Game Theory*. New York/Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2003.
- CAMERER Colin F. et FEHR Ernst. Measuring social norms and preferences using experimental games : A guide for social scientists. In HENRICH Joseph, BOYD Robert, BOWLES Samuel, CAMERER Colin, FEHR Ernst et GINTIS Herbert (sous la dir.), *Foundations of Human Sociality - Experimental and Ethnographic Evidence from 15 Small-Scale Societies*. Oxford University Press, 2004 [2003].
- CAMERER Colin F. et TALLEY Eric. Experimental law and economics. In POLINSKY A. Mitchell et SHAVELL Steven (sous la dir.), *Handbook of Law and Economics*. Elsevier, novembre 2005.
- CAPRA C. Mónica, TANAKA Tomomi, CAMERER Colin F., MUNYAN Lauren, SOVERO Veronica, WANG Lisa et NOUSSAIR Charles. The Impact of Simple Institutions in Experimental Economics with Poverty Trap. Rapport Technique 0508, Department of Economics, Emory University (Atlanta), février 2005.
- CARABELEA Cosmin, BOISSIER Olivier et CASTELFRANCHI Cristiano. Using Social Power to Enable Agents to Reason About Being Part of a Group. In GLEIZES Marie Pierre, OMICINI Andrea et ZAMBONELLI Franco (sous la dir.), *Engineering Societies in the Agents World V, 5th International Workshop, ESAW 2004, Toulouse, France, October 20-22, 2004, Revised Selected and Invited Papers*, volume 3451 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 166–177. Springer, 2005.
- CARDON Alain. *La complexité organisée : systèmes adaptatifs et champs organisationnel*. Lavoisier, 2005.
- CARTWRIGHT Nancy. *How the Laws of Physics Lie*. Clarendon Press, Oxford, Oxford University Press, New York, 1983.

BIBLIOGRAPHIE

- CASARE Sara et SICHMAN Jaime Simão. Towards a functional ontology of reputation. In DIGNUM Frank, DIGNUM Virginia, KOENIG Sven, KRAUS Sarit, SINGH Munindar P. et WOOLDRIDGE Michael (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-05)*, pages 505–511, 2005.
- CASTELFRANCHI Cristiano. Social Power : A Point Missed in Multi-Agent, DAI, and HCI. In DEMAZEAU Yves et MÜLLER Jean-Pierre (sous la dir.), *Decentralized Artificial Intelligence : Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-89)*, pages 49–62, Amsterdam, 1990. Elsevier.
- CASTRO Barry et WEINGARTEN Kenneth. Towards Experimental Economics. *Journal of Political Economy*, 78(3) :598–607, 1970.
- CHAIGNAUD Nathalie, EL FALLAH-SEGHROUCHNI Amal et PAUCHET Alexandre. Résolution coopérative de problèmes intégrant planification et interaction. *Technique et Science Informatiques*, 22(4) :309–313, 2003.
- CHALLET Damien et ZHANG Yi-Cheng. Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game. *Physica A*, 246(3-4) :407–418, 1997.
- CHAMPIN Pierre-Antoine, PRIÉ Yannick et ALAIN Mille. Musette : Modeling USEs and Tasks for Tracing Experience. In *Workshop 5 'From Structured Cases to Unstructured Problem Solving Episodes For Experience-Based Assistance', ICCBR'03*, pages 279–286, Trondheim, NO, 2003.
- CHESNEY Amelia A. et LOCKE Edwin A. Relationships Among Goal Difficulty, Business Strategies, and Performance on a Complex Management Simulation Task. *Academy of Management Journal*, 34(2) :400–424, 1991.
- CHICOISNE Guillaume. *Dialogue entre agents naturels et agents artificiels : une application aux communautés virtuelles*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- CHOMSKY Noam. Three models for the description of language. *IRE Transactions on Information Theory*, 2 :113–124, 1956.
- COLELLA Vanessa. Participatory Simulations : Building Collaborative Understanding through Immersive Dynamic Modeling. Mémoire de DEA, MIT, 1998.
- COLELLA Vanessa, BOROVYOV Richard et RESNICK Mitchel. Participatory Simulations : Using Computational Objects to Learn about Dynamic Systems. In *Proceedings of the Computer Human Interface (CHI) '98 conference*, Los Angeles, avril 1998.
- COQUILLARD Patrick et HILL David R. C. *Modélisation et Simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson, 1997.
- DAHL Robert. The Concept of Power. *Behavioral Science*, 2(3) :201–215, juillet 1957.
- DAHL Robert. *Who Governs? : Democracy and Power in the American City*. Yale Studies in Political Science. Yale University Press, 1989 [1961].
- D'AQUINO Patrick, LE PAGE Christophe, BOUSQUET François et BAH Alassane. Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management : The SelfComas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3), 2003.

-
- DARLEY Vince. Emergent Phenomena and Complexity. In BROOKS Rodney et MAES Pattie (sous la dir.), *Artificial Life IV, Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 411–416, Cambridge, MA, 1994. MIT Press.
- DAVIDSSON Paul, LOGAN Brian et TAKADAMA Keiki (sous la dir.). *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, Joint Workshop MABS 2004, New York, NY, USA, July 19, 2004, Revised Selected Papers*, volume 3415 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- DEGUCHI Hiroshi. Creation of Agent-Based Social Systems Sciences. In DEGUCHI Hiroshi, KIJIMA Kyoichi, TERANO Takao et KITA Hajime (sous la dir.), *Proceedings of The Fourth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS) 2005*, 2005.
- DEGUET Joris, DEMAIZEAU Yves et MAGNIN Laurent. Elements about the Emergence Issue, a survey of emergence definitions. In *European Conference on Complex Systems (ECCS), Paris, France, 14-18 November, 2005*.
- DEMAIZEAU Yves. La Plate-forme PACO et ses Applications. In *2èmes Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents, PRC-IA, Montpellier, France, 1993*.
- DEMAIZEAU Yves. Next Agents World. In *Proceedings of the Argentinian Symposium on Artificial Intelligence, ASAI'2000, Tandil, Argentine, septembre 2000*.
- DENEUBOURG Jean-Louis, GOSS S., FRANKS N., SENDOVA-FRANKS C., DETRAIN C. et CHRÉTIENTEN L. The Dynamics of Collective Sorting : Robot-Like Ants and Ant-Like Robots. In MEYER Jean-Arcady et WILSON S.W. (sous la dir.), *From Animals to Animats (SAB'91)*, pages 356–363, Cambridge, MA, 1991. MIT Press.
- DENEUBOURG Jean-Louis, THERAULAZ G. et BECKERS R. Task Differentiation in Polistes wasp colonies : a model for self-organizing groups of robots. In MEYER Jean-Arcady et WILSON S.W. (sous la dir.), *From Animals to Animats (SAB'91)*, pages 346–355, Cambridge, MA, 1991. MIT Press.
- DENEUBOURG Jean-Louis, THERAULAZ Guy et BECKERS R. Swarm-Made Architectures. In VARELA Francisco J. et BOURGINE Paul (sous la dir.), *Toward a practice of autonomous systems*, pages 123–133. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- DORIGO Marco, MANIEZZO Vittorio et COLORNI Alberto. Ant System : Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26(1) :29–41, 1996.
- DOWLING Deborah. Experimenting on Theories. *Science In Context*, 2(12) :261–273, 1999.
- DROGOUL Alexis. *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes, Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1993.
- DROGOUL Alexis, CORBARA Bruno et FRESNEAU Dominique. Applying EthoModelling to social organization in ants. In BILLEN Johan (sous la dir.), *Biology and Evolution of Social Insects*, pages 375–383. Leuven University Press, Belgium, 1992.
- DROGOUL Alexis et FERBER Jacques. A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures. In *European Conference on Artificial Life, Paris, 1991*.

BIBLIOGRAPHIE

- DROGOUL Alexis et FERBER Jacques. Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies. In GILBERT Nigel et DORAN Jim (sous la dir.), *Simulating Societies : the computer simulation of social phenomena*. North-Holland, 1994.
- DROGOUL Alexis, FERBER Jacques, CORBARA Bruno et FRESNEAU Dominique. A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures. In VARELA Francisco J. et BOURGINE Paul (sous la dir.), *Toward a practice of autonomous systems*, pages 161–170. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- DROGOUL Alexis, FERRAND Nils et MÜLLER Jean-Pierre. Émergence : l'articulation du local au global. In DEMAZEAU Yves (sous la dir.), *Systèmes multi-agents*, volume 29 de ARAGO. OFTA, Lavoisier, 2004.
- DROGOUL Alexis, MEURISSE Thomas et VANBERGUE Diane. Multi-agent Based Simulations : Where are the Agents? In SICHMAN Jaime Simão, BOUSQUET François et DAVIDSSON Paul (sous la dir.), *Multi-Agent-Based Simulation, Third International Workshop, MABS 2002, Bologna, Italy, July 15-16, 2002, Revised Papers*, volume 2581 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–15. Springer, 2002.
- DUBET François. *La galère : jeunes en survie*. Seuil, 1995 [1987].
- DUBET François. Plaidoyer pour l'intervention sociologique. In KUTY Olgierd et VRANCKEN Didier (sous la dir.), *La sociologie et l'intervention. Enjeux et perspectives*, pages 89–110. De Boeck, 2001.
- DUFFY John. Learning to Speculate : Experiments with Artificial and Real Agents. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3-4) :295–319, mars 2001.
- DUFFY John. Agent-Based Models and Human-Subject Experiments. In TESFATSION Leigh et JUDD Kenneth L. (sous la dir.), *Handbook of Computational Economics, Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, Handbooks in Economics Series. North-Holland/Elsevier, Amsterdam, 2006.
- DUFFY John et OCHS Jack. Emergence of Money as a Medium of Exchange : An Experimental Study. *American Economic Review*, 89(4) :847–877, septembre 1999.
- DUPUY Jean-Pierre. *Introduction aux sciences sociales. Logique des phénomènes collectifs*. Ellipses, Paris, 1992.
- EARLEY P. Christopher, NORTHCRAFT Gregory B., LEE Cynthia et LITUCHY Terri R. Impact of Process and Outcome Feedback on the Relation of Goal Setting to Task Performance. *Academy of Management Journal*, 33(1) :87–195, 1990.
- EDMONDS Bruce. Capturing Social Embeddedness : a constructivist approach. *Adaptive Behavior*, 7(3/4), 1999.
- EDMONDS Bruce. Gossip, Sexual Recombination and the El Farol bar : modelling the emergence of heterogeneity. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(3), 1999.
- EDMONDS Bruce. *Syntactic Measures of Complexity*. Thèse de Doctorat, University of Manchester, 1999.
- ETIENNE Michel. Pine trees - invaders or forerunners in Mediterranean-type ecosystems : a controversial point of view. *Journal of Mediterranean Ecology*, 2(3-4) :221–232, 2001.

-
- ETIENNE Michel. SYLVOPAST : a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2), 2003.
- ETIENNE Michel, LE PAGE Christophe et COHEN Mathilde. A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2), 2003.
- ETIENNE Michel, LE PAGE Christophe, WEBER Jacques, LAURENT-THOMAS Nathalie, BARRETEAU Olivier, MATHEVET Raphaël, ARRAULT Sandra et DARÉ William's. Usage des jeux de rôles en modélisation d'accompagnement : Mettre des acteurs en situation pour partager des représentations et simuler des dynamiques. 2004. Formation Ecole-Chercheurs, INRA, Département SAD.
- EVANS Robert. Economic Models and Policy Advice : Theory Choice or Moral Choice? *Science In Context*, 2(12) :351–376, 1999.
- FARAGO Julie, GREENWALD Amy et HALL Keith. Fair and Efficient Solutions to the Santa Fe Bar Problem. In *Proceedings of the Grace Hopper Celebration of Women in Computing*, 2002.
- FERBER Jacques. *Les Systemes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- FERRAND Nils, DEMAZEYU Yves et BAEIJS C. Systèmes multi-agents réactifs et résolution de problèmes spatialisés. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 12(1), janvier 1998.
- FILLIAT David, KODJABACHIAN Jérôme et MEYER Jean-Arcady. Evolution of Neural Controllers for Locomotion and Obstacle-Avoidance in a 6-Legged Robot. *Connection Science*, 11 :223–240, 1999.
- FININ Tim, FRITZSON Richard, MCKAY Don et MCENTIRE Robin. KQML as an Agent Communication Language. In ADAM Nabil R., BHARGAVA Bharat K. et YESHA Yelena (sous la dir.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'94)*, pages 456–463, Gaithersburg, Maryland, 1994. ACM Press.
- FIPA The Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA ACL Message Structure Specification. 2002.
- FISHWICK Paul. Computer Simulation : Growth Through Extension. In *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'94)*, pages 3–17, 1994.
- FISHWICK Paul. A Taxonomy for Simulation Modeling Based on Programming Language Principles. *IIE Transactions*, 30(9), septembre 1998.
- FOLLEY Duncan. The strange history of the economic agent. 2002. Communication au General Seminar of the Graduate Faculty of New School University.
- FORD Kimberley-Anne. Application de la recherche-action participative (RAP) à l'évaluation de la qualité de la vie des membres des FC et de leurs proches. Note de recherche, Direction de la qualité de la vie du Ministère de la Défense Nationale du Canada, 2001.
- FRIEDMAN Daniel et SUNDER Shyam. *Experimental Methods - A Primer For Economists*. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- GARFINKEL Harold. *Studies in Ethnomethodology*. Blackwell Publishing, 1984 [1967].

BIBLIOGRAPHIE

- GILBERT Nigel. Emergence in Social Simulation. In GILBERT Nigel et CONTE Rosaria (sous la dir.), *Artificial societies : The computer simulation of social life*, pages 144–156. UCL Press, London, 1995.
- GILBERT Nigel, SCHUSTER Stephan, BESTEN Matthijs den et YANG Lu. Environment design for emerging artificial societies. In *Proceedings of Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents '05*, 2005.
- GILBERT Nigel et TROITZSCH Klaus G. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, 1999.
- GOFFMAN Erving. *The Presentation of Self in Everyday Life*. Anchor, 1959.
- GOFFMAN Erving. *Asiles, études sur la condition sociale des malades mentaux*. Editions de Minuit, Paris, 1968 [1961].
- GOLDENFELD Nigel et KADANOFF Leo P. Simple Lessons from Complexity. *Science*, 284 :87–89, avril 1999.
- GOULD Stephen Jay. *Full House : The Spread of Excellence from Plato to Darwin*. Harmony Books, New York, 1996.
- GREENWALD Amy, MISHRA Bud et PARIKH Rohit. The Santa Fe Bar Problem Revisited : Theoretical and Practical Implications. In *Proceedings of the Summer Festival on Game Theory : International Conference*, 1998.
- GROSSKLAGS Jens et SCHMIDT Carsten. Artificial Software Agents on Thin Double Auction Markets : A Human Trader Experiment. In *Proceedings of the IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-2003), Halifax, Canada, October 13-17, 2003*, 2003.
- GROSSMAN Gene M. et HELPMAN Elhanan. Protection for Sale. *American Economic Review*, 84(4) :833–850, 1994.
- GROSZ Barbara J., KRAUS Sarit, TALMAN Shavit, STOSSEL Boaz et HAVLIN Moti. The Influence of Social Dependencies on Decision-Making : Initial Investigations with a New Game. In *3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2004), 19-23 August 2004, New York, NY, USA*, pages 782–789. IEEE Computer Society, 2004.
- GUARINO Nicola. Formal Ontology and Information Systems. In *Proceedings of Formal Ontology in Information Systems*, juin 1998.
- GUYOT Paul. *Épistémologie et Émergence de la Complexité*. Mémoire de DEA, UFR de Philosophie, Université Panthéon Sorbonne, 2003. DEA Histoire et Philosophie des Sciences.
- GUYOT Paul. *Simulations multi-agents participatives : Vers une méthode de validation et de consolidation des modèles de pratiques collectives*. Mémoire de DEA, UFR d'Informatique, Université Pierre et Marie Curie, 2003. DEA Intelligence Artificielle, Reconnaissance de Formes et Applications.
- GUYOT Paul. *Simulations Multi-Agents Participatives*. Mémoire de pré-soutenance, Laboratoire d'Informatique de Paris VI, 2005.
- GUYOT Paul et DROGOUL Alexis. Designing Multi-Agent Based Participatory Simulations. In COELHO Helder et ESPINASSE Bernard (sous la dir.), *Proceedings of 5th Workshop on Agent Based Simulations*, pages 32–37, Erlangen, San Diego, mai 2004. SCS Publishing House.

-
- GUYOT Paul et DROGOUL Alexis. Maîtrise ou Surprise : Émergence et Participation. In *Proceedings of CABM-HEMA-SMAGET 2005 Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management*, 2005.
- GUYOT Paul et DROGOUL Alexis. Multi-Agent Based Participatory Simulations on Various Scales. In ISHIDA Toru, GASSER Les et NAKASHIMA Hideyuki (sous la dir.), *Proceedings of International Workshop on Massively Multi-agent Systems*, volume 3446 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 149–160, Berlin Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.
- GUYOT Paul et DROGOUL Alexis. Two Sides of Emergence in Participatory Simulations. In *Proceedings of Socially Inspired Computing '05*, 2005.
- GUYOT Paul, DROGOUL Alexis et HONIDEN Shinichi. Multi-Agent Participatory Simulations Between Experimental Economics and Role-Playing Games. In DEGUCHI Hiroshi, KIJIMA Kyoichi, TERANO Takao et KITA Hajime (sous la dir.), *Proceedings of The Fourth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS) 2005*, pages 74–82, 2005.
- GUYOT Paul, DROGOUL Alexis et HONIDEN Shinichi. Power and Negotiation : Lessons from Agent-Based Participatory Simulations. In STONE Peter et WEISS Gerhard (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-06)*, pages 27–33. ACM Press, 2006.
- GUYOT Paul, DROGOUL Alexis et LEMAITRE Christian. Using emergence in participatory simulations to design multi-agent systems. In DIGNUM Frank, DIGNUM Virginia, KOENIG Sven, KRAUS Sarit, SINGH Munindar P. et WOOLDRIDGE Michael (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-05)*, pages 199–203, 2005.
- HALES David, EDMONDS Bruce, NORLING Emma et ROUCHIER Juliette (sous la dir.). *Multi-Agent-Based Simulation III, 4th International Workshop, MABS 2003, Melbourne, Australia, July 14th, 2003, Revised Papers*, volume 2927 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2003.
- HAMEL Athmane. *Conception participative et coopérative de simulations multi-agents : Application à la filière avicole*. Thèse de Doctorat, Université Paris Dauphine, 2006.
- HARDIN Garrett. The tragedy of the commons. *Science*, 162 :1243–1248, 1968.
- HARRISON Glenn. Theory and Misbehavior of First-Price Auctions. *American Economic Review*, 79(4) :749–762, septembre 1989.
- HARRISON Glenn. Theory and Misbehavior of First-Price Auctions : Reply. *American Economic Review*, 82(5) :1426–1443, décembre 1992.
- HAYNES, THOMAS D. Dale A. Schoenefeld et WAINWRIGHT Roger L. Type Inheritance in Strongly Typed Genetic Programming. In ANGELINE Peter J. et KINNEAR, JR. K. E. (sous la dir.), *Advances in Genetic Programming 2*, pages 359–376. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- HENRICH Joseph, BOYD Robert, BOWLES Samuel, CAMERER Colin, FEHR Emst, HERBERT Gintis et MCELREATH Richard. In Search of Homo Economicus : Behavioral Experiments in 15 Small-Scale Societies. *American Economic Review*, 91 :73–78, 2001.
- HERNÁNDEZ NAVARRO Luis. *Morir un poco : Migración y café en México y Centroamérica*. Rapport technique, Interhemispheric Resource Center, Silver City, NM, novembre 2004.

BIBLIOGRAPHIE

- HEY John D. *Experiments in Economics*. Blackwell, Cambridge, MA, 1991.
- HILL Elizabeth L. et SALLY David. Dilemmas and Bargains : Theory-of-Mind, Cooperation, and Fairness. Working paper, University College London, 2002.
- HOLLAND John H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Harbor, 1975.
- HOLLAND John H. Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1) :44–50, juillet 1992.
- HOLLAND John H. The Effect of Labels (Tags) on Social Interactions. Working Paper 93-10-064, Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico, 1993.
- HOLLAND John H. *Hidden Order : How Adaptation Builds Complexity*. Addison Wesley, 1996.
- HUYNH Trung Dong, JENNINGS Nick et SHADBOLT Nigel R. Certified Reputation : How an Agent Can Trust a Stranger. In STONE Peter et WEISS Gerhard (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-06)*. ACM Press, 2006.
- ISHIDA Toru. Q : A Scenario Description Language for Interactive Agents. *IEEE Computer*, 35(11) :54–59, 2002.
- ISHIDA Toru et FUKUMOTO Masahito. インタラクション設計言語Qの提案 (interakushon sekkei gengo Q no teian). *人工知能学会論文誌 (jinkō chinō gakkai ronbun-shi)*, 17(2) :166–169, 2002.
- ISHIDA Toru et NAKANISHI Hideyuki. Designing Scenarios for Social Agents. In NING ZHONG Jiming Liu et YAO Yiyu (sous la dir.), *Web Intelligence*. Springer-Verlag, 2003.
- ISHIDA Toru, NAKANISHI Hideyuki et TAKATA Shiro. デジタルシティにおける危機管理シミュレーション (dejitaru shiti ni okeru kiki kanri shimyureishon). *システム制御情報学会誌 (shisutemu seigyō jōhō gakkai-shi)*, 46(9) :524–531, 2002.
- ITO Takayuki et PARKES David. Instantiating the Contigent Bids Model of Truthful Interdependent Value Auctions. In STONE Peter et WEISS Gerhard (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-06)*, pages 1151–1158. ACM Press, 2006.
- JEAN M. R., PESTY Sylvie, BATARD Eric, BRASSAC Christian, DELÉPINE Ludovic, GLEIZES Marie-Pierre, GLIZE Pierre, LABBANI Ouiddad, LENAY Charles, MARCENAC Pierre, MARGNIN Laurent, MÜLLER Jean-Pierre, QUINQUETON Joël et VIDAL Pascal. Émergence et SMA. In *Actes des 5ème Journées Francophones en Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'97)*. Hermès, 1997.
- KALISCH Gerhard K., MILNOR J. W., NASH John F. et NERING E. D. Some Experimental n-Person Games. In THRALL R. M., COOMBS C. H. et DAVIS R. L. (sous la dir.), *Decision Processes*, pages 301–327, New York, 1954. Wiley.
- KEYNES John M. *Théorie générale de l'emploi de l'intérêt et de la monnaie*. Payot, Paris, 1939 [1936]. trad. fr. Jean de Largentaye.
- KIM Won. Trends in the Uses of the Internet - 2006. *Journal of Object Technology*, 5(2) :55–60, mars 2006.

-
- KIRSHENBAUM Evan. Genetic Programming With Statically Scoped Local Variables. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) 2000*, pages 459–468. Morgan Kaufmann, 2000.
- KIYOTAKI Nobuhiro et WRIGHT Randall. On money as a medium of exchange. *Journal of Political Economy*, 97(4) :924–954, août 1989.
- KOLMOGOROV Andrey Nikolaevich. Three Approaches to the Quantitative Definition of Information. *Problems of Information Theory*, 1(1) :1–7, 1965.
- KOZA John R. Hierarchical genetic algorithms operating on populations of computer programs. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, volume 1, pages 768–774, San Mateo, CA, 1989. Morgan Kaufmann.
- KOZA John R. *Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- KOZA John R, BENNETT Forrest H. III, ANDRE David et KEANE Martin A. *Genetic Programming III : Darwinian Invention and Problem Solving*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1999.
- KOZIEROK Robyn et MAES Pattie. A learning interface agent for scheduling meetings. In *Intelligent User Interfaces*, pages 81–88, 1993.
- KUHN Thomas. *La structure des révolutions scientifiques*. Flammarion, Paris, 1972.
- LABROU Yannis, FININ Tim et PENG Yun. Agent Communication Languages : The Current Landscape. *IEEE Intelligent Systems*, 14(2) :45–52, 1999.
- LAIRD John E. et ROSENBLOOM Paul. The Evolution of the Soar Cognitive Architecture. In STEIER David M. et MITCHELL Tom M. (sous la dir.), *Mind Matters : A Tribute to Allen Newell*, pages 1–50. Lawrence Erlbaum Associates Inc, 1996.
- LANDAU Samuel, SIGAUD Olivier et SCHOENAUER Marc. ATNoSFERES revisited. In BEYER Hans-Georg et O'REILLY Una-May (sous la dir.), *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2005, Proceedings, Washington DC, USA, June 25-29, 2005*, pages 1867–1874. ACM Press, 2005.
- LECAVALIER Guy. Les jeux de simulations dans l'enseignement de la sociologie. *Sociologie et sociétés*, 3(2) :259–274, novembre 1971.
- LEDERMAN Linda Costigan. Debriefing : toward a systematic assessment of theory and practice. *Simulation & Gaming*, 23(2) :145–160, 1992.
- LERAY Philippe et GALLINARI Patrick. Feature Selection with Neural Networks. *Behaviormetrika*, 26(1), 1998.
- LÉVI-STRAUSS Claude. *Tristes Tropiques*. Plon, Paris, 1955.
- LEWIS David. *Convention : A Philosophical Study*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1969.
- LUKE Sean. Code Growth is Not Caused by Introns. In WHITLEY Darrell (sous la dir.), *Late Breaking Papers at the 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 228–235, Las Vegas, Nevada, USA, 2000.

- LUKE Sean. Two Fast Tree-Creation Algorithms for Genetic Programming. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4(3) :274–283, septembre 2000.
- LUKE Sean et PANAIT Liviu. A Survey and Comparison of Tree Generation Algorithms. In SPECTOR Lee, GOODMAN Erik D., WU Annie, LANGDON W. B., VOIGT Hans-Michael, GEN Mitsuo, SEN Sandip, DORIGO Marco, PEZESHK Shahram, GARZON Max H. et BURKE Edmund (sous la dir.), *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2001)*, pages 81–88, San Francisco, California, USA, juillet 2001. Morgan Kaufmann.
- MAGNIN Laurent. *Modélisation et simulation de l'environnement dans les systèmes multi-agents. Application aux robots footballeurs*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1996.
- MARCELPOIL Raphaël, BEAUREPAIRE Emmanuel et PESTY Sylvie. La sociologie cellulaire : modéliser et simuler une “société cellulaire” pour étudier le vivant. *Intellectica*, 19 :53–72, 1994.
- MARCENAC P. Emergence of Behaviors in Natural Phenomena Agent-Simulation. In STOCKER R., JELINEK H., DURNOTA B. et BOSSOMAIER T. (sous la dir.), *Complex Systems 96, From local interactions to global phenomena*, pages 284–289, Albury, Australie, 1996. IOS-Press.
- MARNEY, JOHN PAUL Heather F.E. Tarbert. Why do simulation? Towards a working epistemology for practitioners of the dark arts. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 3(4), 2000.
- MATHEVET Raphaël, LE PAGE Christophe, ETIENNE Michel, GIGOT G., LEFEBVRE G., POULIN B. et MAUCHAMP A. ButorStar : a role-playing game for collective awareness of reedbed wise use. In *Colloque UNESCO “Biodiversité Science et Gouvernance”, Paris, 24-28 janvier 2005*, 2005.
- MCCABE Kevin A., RASSENTI Stephen J. et SMITH Vernon L. Auction Institutional Design : Theory and Behavior of Simultaneous Multiple-Unit Generalizations of the Dutch and English Auctions. *The American Economic Review*, 80(5) :1276–1283, décembre 1990.
- MCLAUGHLIN Brian P. The rise and fall of British emergentism. In A. BECKERMANN, H. FLOHR J. Kim (sous la dir.), *Emergence or Reduction?* Walter de Gruyter, Berlin, 1992.
- MEMMI Daniel. Emergence et niveaux d'explication. In *Journées thématiques de l'ARC (émergence et explication)*, 1996.
- MÉTIVIER, MARC Claude Lattaud. Modélisation du comportement à base de systèmes de classifieurs durant un processus d'avatarisation. *Extraction des connaissances et apprentissage*, 1(3) :61–85, 2001.
- MEURISSE Thomas. Le contrôle de l'ordonnement dans les simulations multi-agents. Etude et Propositions. In *Atelier Méthodologie et Environnement pour les Systèmes Multi-Agents, Plateforme AFIA 2001*, Grenoble, France, 2001.
- MEURISSE Thomas et VANBERGUE Diane. Et maintenant à qui le tour? Aperçu de Problématiques de Conception de Simulations Multi-Agents. In *Actes de la conférence ALCAA 2001*, Bayonne, France, 2001.
- MIROWSKI Philip. *More Heat than Light*. Cambridge University Press, New York, 1989.

-
- MITCHELL Melanie. Is the Universe a Universal Computer. *Science*, 298, octobre 2002.
- MITCHELL, MELANIE trad. fr. Philippe Brenier. Quelques raisons de douter. *La Recherche*, 360 :38–43, 2003.
- MONTANA David J. Strongly Typed Genetic Programming. BBN Technical Report #7866, Bolt Beranek and Newman, Inc., 1993.
- MOORE Christopher. Computational complexity in physics. 2001.
- MORGAN, MARY Margaret Morrison (ed.). *Models as Mediators*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- MOSS Scott et DAVIDSSON Paul (sous la dir.). *Multi-Agent-Based Simulation, Second International Workshop, MABS 2000, Boston, MA, USA, July, 2000, Revised and Additional Papers*, volume 1979 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2001.
- MOSS Scott, DOWNING Tom et ROUCHIER Juliette. Demonstrating the Role of Stakeholder Participation : An Agent Based Social Simulation Model of Water Demand Policy and Response. CPM Report 00-76, Centre for Policy Modelling, Manchester Metropolitan University, 2000.
- MÜLLER Jean-Pierre. Emergence of Collective Behaviour and Problem Solving. In *Engineering Societies in the Agents World IV, 4th International Workshop, ESAW 2003, London, UK, October 29-31, 2003, Revised Selected and Invited Papers*, pages 1–21, 2003.
- MÜLLER Jean-Pierre et PECCHIARI Paolo. A model of autonomous situated multi-agent systems : application to automated deduction. In MÜLLER Jean-Pierre et QUINQUETON Joël (sous la dir.), *Proceedings of ICMAS'96*, Cambridge, MA, 1996. MIT Press.
- MÜLLER Jean-Pierre et PECCHIARI Paolo. Un modèle de systèmes d'agents autonomes situés : application à la déduction automatique. In MÜLLER Jean-Pierre et QUINQUETON Joël (sous la dir.), *Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents, JFIADSMA'96*. Hermes, 1996.
- MURAKAMI Yohei, ISHIDA Toru, KAWASOE Tomoyuki et HISHIYAMA Reiko. Scenario Description for Multi-Agent Simulation. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, pages 369–376, 2003.
- NAKANISHI Hideyuki, NAKAZAWA Satoshi, ISHIDA Toru, TAKANASHI Katsuya et ISBISTER Katherine. Can software agents influence human relations? : balance theory in agent-mediated communities. In *AAMAS '03 : Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 717–724, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- NAKANO Kenji, MATSUYAMA Shinako et TERANO Takao. Research on a Learning System toward Integration of Case Method and Business Gaming. In DEGUCHI Hiroshi, KIJIMA Kyoichi, TERANO Takao et KITA Hajime (sous la dir.), *Proceedings of The Fourth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS) 2005*, 2005.
- NASAR Sylvia. *A Beautiful Mind : A Biography of John Forbes Nash Jr.* Simon & Schuster, New York, 1998.
- NEWELL Allen et SIMON Herbert A. The logic theory machine : A complex information processing system. *IRE Transactions on Information Theory*, 2(3) :61–79, 1956.

BIBLIOGRAPHIE

- NGUYEN-DUC Minh. *Vers la conception participative de simulations sociales : Application à la gestion du trafic aérien*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 2005.
- NGUYEN-DUC Minh, BOUCHER Alain, DROGOUL Alexis et DUONG V. Towards Participatory Design of Agent-Based Simulations – An application in Air Traffic Management. In COELHO Helder et ESPINASSE Bernard (sous la dir.), *Proceedings of 5th Workshop on Agent Based Simulations*, Erlangen, San Diego, mai 2004. SCS Publishing House.
- NGUYEN-DUC Minh, SEMPÉ François, BOUCHER Alain et DROGOUL Alexis. Simulation sociale : Modélisation de comportements par le dialogue agent-acteur. In *Recherche Innovation & Vision du Futur (RIVF'05)*, Can Tho, 2005.
- ODELL James. Objects and Agents Compared. *Journal of Object Technology*, 1(1), mai 2002.
- PARK Peter, BRYDON-MILLER Mary, HALL Budd et JACKSON Ted. *Voices of Change : Participatory Research in the United States and in Canada*. Bergin and Garvey, Westport, Connecticut, 1993.
- PARUNAK H. Van Dyke. "Go to the Ant" : Engineering Principles from Natural Multi-Agent Systems. *Annals of Operations Research*, 75 :69–101, 1997.
- PARUNAK H. Van Dyke. Characterizing multi-agent negotiation, Working Group Summary. In *International Workshop on Multi-Agent Systems, IWMAS-98*, 1998.
- PERRIER Edith. Modélisation mathématique et informatique de structures naturelles complexes en interaction avec des dynamiques de flux. Applications hydro-pédologiques. 2002. Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à diriger les recherches.
- PETERS Vincent, VISSERS Geert et MEER Frans-Bauke van der. Debriefing depends on purpose. In GEURTS J. et JOLDERSMA F. (sous la dir.), *Gaming/Simulation for Policy Development and Organizational Change. Proceedings of the 28th Annual International Conference International Simulation and Gaming Association (ISAGA)*, pages 399–404, Tilburg, 1998. Tilburg University Press.
- PHELPS Steve, MARCINKIEWICZ Marek, PARSONS Simon et MCBURNEY Peter. A Novel Method for Automatic Strategy Acquisition in N-player Non-zero-sum Games. In STONE Peter et WEISS Gerhard (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-06)*, pages 705–712. ACM Press, 2006.
- PLATON Eric, SABOURET Nicolas et HONIDEN Shinichi. Overhearing and Direct Interactions : Point of View of an Active Environment, a Preliminary Study. In WEYNS D., PARUNAK H. Van Dyke et MICHEL F. (sous la dir.), *Proceedings of AAMAS workshop on Environment for Multi-Agent Systems (E4MAS 2005)*, 2005.
- PLOTT Charles R. et SMITH Vernon L. An Experimental Examination of Two Exchange Institutions. *Review of Economic Studies*, 45(1) :133–53, février 1978.
- POPPER Karl R. *Logik der Forschung*. J.C.B. Mohr, Tübingen, 1934.
- POSTEL Jonathan B. Simple Mail Transfer Protocol. RFC 821, Internet Engineering Task Force, 1982.
- POUR-EL Marian B. et RICHARDS J. Ian. *Computability in analysis and Physics, Perspectives in Mathematical Logic*. Springer, Berlin, 1989.

-
- RAO Anand S. et GEORGEFF Michael P. Modelling rational agents within a BDI architecture. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*, pages 473–484, San Mateo, CA, 1991. Morgan Kaufmann Publishers.
- REICH Yoram. Layered models of research methodologies. *Artificial Intelligence in Engineering Design Analysis and Manufacturing (AI EDAM)*, 8(4) :263–274, 1994.
- RESNICK Mitchel et WILENSKY Uri. Diving into Complexity : Developing Probabilistic Decentralized Thinking through Role-Playing Activities. *Journal of Learning Sciences*, 7(2), 1997.
- RICKEL Jeff, GRATCH Jonathan, HILL Randall, MARSELLA Stacy et SWARTOUT William. Steve goes to Bosnia : Towards a new generation of virtual humans for interactive experiences. In *AAAI Spring Symposium on Artificial Intelligence and Interactive Entertainment*, mars 2001.
- RICKEL Jeff et JOHNSON W. Lewis. Task-Oriented Collaboration with Embodied Agents in Virtual Worlds. In CASSELL Justine, SULLIVAN Joseph, PREVOST Scott et CHURCHILL Elizabeth (sous la dir.), *Embodied Conversational Agents*, pages 95–122. MIT Press, Cambridge, MA, 2000.
- RIPOCHE Gabriel. Extraction de traits sémantiques à partir d'interactions langagières dans le cadre de l'étude de Pratiques Collectives Distribuées. Mémoire de DEA, Université Paris XI, Orsay, 2002. DEA de Sciences Cognitives encadré par Jean-Paul Sansonnet.
- ROSENBLATT Frank. The Perceptron : A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6) :386–408, 1958.
- ROUCHIER Juliette. Multi-agent systems for the study of social complex systems (A way to represent social complexity - examples and validation. juin 2002. Presentation for the EUROAttractor 2002 School.
- ROUCHIER Juliette. Re-implementation of a multi-agent model aimed at sustaining experimental economic research : The case of simulations with emerging speculation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4), octobre 2003.
- ROUCHIER Juliette et ROBIN Stéphane. Double-auction for real and artificial agents Information perception and price dynamics. *Simulation and Gaming*, à paraître, 2006.
- RUSSELL Stuart et NORVIG Peter. *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Prentice Hall, 1995 [2005].
- SABAH Gérard, VIVIER Jean, VILNAT Anne, PIERREL Jean-Marie, ROMARY Laurent et NICOLLE Anne. *Machine, Langage et Dialogue*. L'Harmattan, 1997.
- SANDHOLM Tuomas W. et CRITES Robert H. Multiagent Reinforcement Learning in the Iterated Prisoner's Dilemma. *Biosystems*, janvier 1995.
- SCHULER David et NAMIOKA Aki. *Participatory Design : Principles and Practices*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1993.
- SEMPÉ François, NGUYEN-DUC Minh, BOISSAU Stanislas, BOUCHER Alain et DROGOUL Alexis. An Artificial Maieutic Approach for Eliciting Experts' Knowledge in Multi-agent Simulations. In SICHMAN Jaime Simão et ANTUNES Luis (sous la dir.), *Multi-Agent-Based Simulation VI, International Workshop, MABS 2005, Utrecht, The Netherlands, July 25, 2005, Revised and Invited Papers*, volume 3891 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 75–87. Springer, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- SEMPÉ François, NGUYEN-DUC Minh, BOUCHER Alain et DROGOUL Alexis. An artificial maieutic approach for eliciting experts' knowledge in multi-agent simulations. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-05)*, 2005.
- SERVAT David. *Modélisation des dynamiques de flux par agents - Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 2000.
- SHANNON Claude E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27 :623–656, octobre 1948.
- SICHTMAN Jaime Simão et ANTUNES Luis (sous la dir.). *Multi-Agent-Based Simulation VI, International Workshop, MABS 2005, Utrecht, The Netherlands, July 25, 2005, Revised and Invited Papers*, volume 3891 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2006.
- SICHTMAN Jaime Simão, BOUSQUET François et DAVIDSSON Paul (sous la dir.). *Multi-Agent-Based Simulation, Third International Workshop, MABS 2002, Bologna, Italy, July 15-16, 2002, Revised Papers*, volume 2581 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2003.
- SICHTMAN Jaime Simão, CONTE Rosaria et GILBERT Nigel (sous la dir.). *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, First International Workshop, MABS '98, Paris, France, July 4-6, 1998, Proceedings*, volume 1534 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 1998.
- SICHTMAN Jaime Simão. *Du raisonnement social chez les agents : une approche fondée sur la théorie de la dépendance*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1995.
- SICHTMAN Jaime Simão, DEMAZEAU Yves et BOISSIER Olivier. When can knowledge-based systems be called agents. In *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Inteligência Artificial (SBIA'92)*, pages 172–185, Rio de Janeiro, Brazil, 1992.
- SICHTMAN Jaime Simão, DEMAZEAU Yves, CONTE Rosaria et CASTELFRANCHI Cristiano. A Social Reasoning Mechanism Based On Dependence Networks. In *Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence*, pages 274–278. Wiley & Sons, 1994.
- SIERRA Carles et DEBENHAM John K. An information-based model for trust. In DIGNUM Frank, DIGNUM Virginia, KOENIG Sven, KRAUS Sarit, SINGH Munindar P. et WOOLDRIDGE Michael (sous la dir.), *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-05)*, pages 497–504, 2005.
- SIMONDO Sergio. Models, Simulations, and Their Objects. *Science In Context*, 2(12) :239–258, 1999.
- SMITH Reid G. The Contract Net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transaction on Computers*, C-29(12) :1104–1113, décembre 1980.
- SMITH Vernon L. An experimental study of competitive market behavior. *The Journal of Political Economy*, 70(2) :111–137, avril 1962.
- SMITH Vernon L. Microeconomic Systems as an Experimental Science. *American Economic Review*, 72(5) :923–955, 1982.
- SMITH Vernon L. Theory, Experiment and Economics. *The Journal of Economic Perspectives*, 3(1) :151–169, 1989.

-
- SMITH Vernon L. Economics in the Laboratory. *The Journal of Economic Perspectives*, 8(1) :113–131, 1994.
- SMITH Vernon L. et WALKER James M. Monetary Rewards and Decision Cost in Experimental Economics. *Economic Inquiry*, 31 :245–261, avril 1993.
- SOLOMONOFF Ray J. A Formal Theory of Inductive Inference. *Information and Control*, 7 :1–22, 1964.
- STANDISH Russell K. On complexity and emergence. *Complexity International*, 9, 2001.
- STEELS Luc. Cooperation between distributed agents through self-organisation. In DEMAZEAU Yves et MÜLLER Jean-Pierre (sous la dir.), *Decentralized A.I.* Elsevier Science Publishers B.V., 1990.
- STEELS Luc. Towards a Theory of Emergent Functionality. In MEYER Jean-Arcady et WILSON S.W. (sous la dir.), *From Animals to Animats (SAB'91)*, pages 451–461, Cambridge, MA, 1991. MIT Press.
- STEELS Luc. The Artificial life Roots of Artificial Intelligence. *Artificial Life*, 1/2 :75–110, 1993.
- STUBER Arnaud, HASSAS Salima et MILLE Alain. Tracing Experience as a potential support for Meaning Negotiation between human and computer agents. In *1st European Conference on Complex Systems*, 2005.
- SUNA Alexandru, LEMAITRE Christian et EL FALLAH-SEGHRUCHNI Amal. E-commerce using an agent oriented approach. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 9(25) :89–98, 2005.
- SUSSMAN Gerald et STEELE Guy. SCHEME : An Interpreter for Extended Lambda Calculus. AI Memo 349, MIT Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, Massachusetts, décembre 1975.
- TESFATSION Leigh. Agent-Based Computational Economics : A Brief Guide to the Literature. In MICHIE Jonathan (sous la dir.), *Reader's Guide to the Social Sciences, Volume 1*. Fitzroy-Dearborn, London, 2001.
- TOTH F. L. Policy exercises : objectives and design elements. *Simulation and games*, 19 :235–255, 1988.
- TREUIL Jean-Pierre, PERRIER Edith et CAMBIER Christophe. Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques spatialisés. In *Actes des 5ème Journées Francophones en Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (FIADMSA'97)*, pages 221–228. Hermès, 1997.
- TSUCHIYA Shigehisa. Simulation/gaming as an essential enabler of organizational change. *Simulation and Gaming*, 29(4) :400–408, décembre 1998.
- VANBERGUE Diane. *Conception de simulation multi-agents : application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, décembre 2003.
- VON NEUMANN John et MORGENSTERN Oskar. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 2004 [1944].

BIBLIOGRAPHIE

- WADSWORTH Yoland. What is Participatory Action Research? *Action Research International*, 2(1), 1998.
- WANG J. et GASSER Les. Mutual online ontology alignment. In *OAS'02 Ontologies in Agent Systems, Proceedings of the AAMAS 2002 Workshop*, volume 66 de *CEUR Workshop Proceedings*, 2002.
- WENG Gezhi, BHALLA Upinder S. et IYENGAR Ravi. Complexity in Biological Signaling Systems. *Science*, 284 :92–96, avril 1999.
- WERNER Eric. What Ants Cannot Do. In PERRAM John W. et MÜLLER Jean-Pierre (sous la dir.), *Distributed Software Agents and Applications, 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents, MAAMAW '94, Odense, Denmark, August 3-5, 1994, Proceedings*, volume 1069 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 19–39. Springer, 1996.
- WERTHEIMER Max. Über Gestalttheorie. *Philosophische Zeitschrift für Forschung und Aussprache*, 1 :39–60, 1925.
- WEYNS Danny, PARUNAK H. Van Dyke et MICHEL Fabien (sous la dir.). *Environments for Multi-Agent Systems, First International Workshop, E4MAS 2004, New York, NY, USA, July 19, 2004, Revised Selected Papers*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- WEYNS Danny, PARUNAK H. Van Dyke et MICHEL Fabien (sous la dir.). *Environments for Multi-Agent Systems II, Second International Workshop, E4MAS 2005, Utrecht, The Netherlands, July 25, 2005, Selected Revised and Invited Papers*, volume 3830 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2006.
- WHYTE William Foote. *Participatory Action Research*. Sage Publications, Newbury Park, California, 1991.
- WHYTE William Foote. *Street Corner Society, La structure sociale d'un quartier italo-américain*. Ed. La Découverte, Paris, 1996 [1943].
- WINSBERG Eric. Sanctioning Models : The Epistemology of Simulation. *Science In Context*, 2(12) :275–292, 1999.
- WINSBERG Eric. Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World. *Philosophy of Science*, 70 :105–125, janvier 2003.
- WOLFRAM Stephen. Computer Software in Science and Mathematics. *Scientific American*, 251 :188–203, septembre 1984.
- WOLFRAM Stephen. University and Complexity in Cellular Automata. *Physica D*, 10 :1–35, 1984.
- WOLFRAM Stephen. Undecidability and Intractability in Theoretical Physics. *Physical Review Letters*, 54 :735–738, 1985.
- WOLFRAM Stephen. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc, Champaign, Illinois, 2002.
- WOOLDRIDGE Michael et JENNINGS Nicholas R. Intelligent Agents : Theory and Practice. *Knowledge Engineering Review*, 10(2) :115–152, 1995.

Liste des expériences

SIMCAFÉ, LANIA, Xalapa

Interface en espagnol, en français et en anglais.

- 26 mai 2003 : 9 participants, 3 expériences

SIMBAR I, LIP6, Paris

Interface en français et en anglais.

- 14 juin 2004 : 10 participants

SIMBAR II, LIP6, Paris & Internet

Interface en français et en anglais.

- 21 juin 2004 : 10 participants

SIMCOMMOD-TOKYO, NII, Tokyo

Interface en anglais et en français.

- 6 septembre 2005 : 15 participants, 3 expériences

SIMCOMMOD-BANGKOK, Chulalongkorn University, Bangkok

Interface en thaï et en anglais.

- 9 novembre 2005 : 14 participants
- 10 novembre 2005 : 7 participants
- 11 novembre 2005 : 7 participants
- 15 novembre 2005 : 7 participants
- 16 novembre 2005 : 7 participants

SIMBAR III, NII, Tokyo

Interface en anglais et en japonais.

- 28 avril 2006 : 10 participants

Résumé

Ce travail répond à un intérêt des concepteurs de systèmes multi-agents pour la validation de modèles de comportements collectifs, la modélisation des stratégies individuelles, la traduction informatique des interactions entre agents et les conditions d'émergence de solutions collectives. Les simulations multi-agents participatives sont des expériences construites pour explorer, modéliser et reproduire dans les systèmes multi-agents les capacités d'innovation mises en œuvre par les groupes sociaux pour résoudre collectivement des problèmes, et dans lesquelles des participants humains accèdent à la simulation comme des agents logiciels. Toutes les interactions prennent la forme d'interactions entre agents et sont enregistrées. Ces simulations permettent de valider des modèles de résolution collective de problèmes, de faire expliciter les stratégies des participants et de déterminer des conditions suffisantes pour qu'émergent des stratégies collectives. Les enregistrements ont permis de mettre au point une technique d'extraction automatique de motifs d'interaction et d'isoler trois propriétés nécessaires d'un langage qui décrirait ces interactions. Des simulations multi-agents ont par la suite vérifié que les comportements qui émergent lors des expériences peuvent se révéler plus efficaces que les comportements du modèle initial.

Mots-clés : simulations participatives, systèmes multi-agents, résolution collective de problèmes, validation, comportements collectifs, motifs d'interaction.

Abstract

The present work is intended as a response to multi-agent systems designers' needs to validate models of collective behavior, to model individual strategies, to implement agents interactions and to determine the conditions of emergence of collective solutions. The agent-based participatory simulations are experiments conducted to explore, model and reproduce, within agent-based systems, the innovation capabilities exhibited by social groups when collectively solving problems. In these experiments, human participants access the simulation like software agents. All interactions are agent-based interactions and they are recorded. Such simulations can be used to validate models of collective problem solving, to elicit participants' strategies and to determine necessary conditions for the emergence of collective strategies. Using the experiment logs, a technique to automatically extract interaction patterns was developed, and three properties a language requires to describe these interactions were isolated. Further agent-based simulations confirmed that the emergent behaviors that appear in experiments can prove more efficient than behaviors from the original model.

Keywords : participatory simulations, multi-agent systems, collective problem solving, validation, collective behavior, interaction patterns.

要約

本研究は、集合行動モデルの検証、個人戦略のモデル化、エージェント間のインタラクション作成技術、集合問題解決の出現する必要条件、などマルチエージェントシステム設計の問題に解を提示する。参加型シミュレーションは集合的に問題を解決するための社会集団によるイノベーション能力を探究し、モデルとしてマルチエージェントシステムで再現するという実験である。実験の参加者はソフトウェアエージェントのようにシミュレーションに参加する。実験における全てのインタラクションはエージェントベースのインタラクションであり、その情報は記録される。参加型シミュレーションにより、集合問題解決モデルの検証、集合的戦略の誘導、集合的戦略の出現する必要条件の発見、という三つの要素が実現される。また、シミュレーションの記録を使ってインタラクション・パターンを自動的に抽出する技術を考案した。エージェントベース・シミュレーションの結果出現した行動のほうが実験以前のモデルの行動より効率的であるということを立証した。

キーワード：参加型シミュレーション、マルチエージェントシステム、集合問題解決、検証、集団行動、インタラクションパターン。

Extracto

La intención de este trabajo es responder a las necesidades de los diseñadores de sistemas multiagentes en validar modelos de comportamiento colectivo, modelizar estrategias individuales, la traducción informática de las interacciones entre agentes y en determinar las condiciones de aparición de soluciones colectivas. Las simulaciones participativas multiagentes son experiencias construidas para explorar, modelar y reproducir en los sistemas multiagentes las capacidades de innovación exhibidas por grupos sociales para resolver problemas colectivamente. En las simulaciones participativas multiagentes, participantes humanos acceden a la simulación como agentes, y todas las interacciones son registradas. Estas simulaciones permiten validar modelos de resolución colectiva de problemas, analizar las estrategias de los participantes, y determinar las condiciones de aparición de estrategias colectivas. Con los registros, se puso a punto una técnica que permitió extraer automáticamente patrones de interacción, y aislar tres propiedades necesarias en un lenguaje que describiría estas interacciones. Simulaciones multiagentes confirmaron que los comportamientos emergentes que aparecen en los experimentos pueden ser más eficientes que los comportamientos del modelo original.

Palabras claves : simulaciones participativas, sistemas multiagentes, resolución colectiva de problemas, validación, comportamientos colectivos, patrones de interacción.