



HAL
open science

Auto-adaptation dans les Systèmes Multi-Agents : de l'entité autonome au système organisé

Emmanuelle Grislin-Le Strugeon

► **To cite this version:**

Emmanuelle Grislin-Le Strugeon. Auto-adaptation dans les Systèmes Multi-Agents : de l'entité autonome au système organisé. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007. tel-01988599

HAL Id: tel-01988599

<https://uphf.hal.science/tel-01988599>

Submitted on 21 Jan 2019

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

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

*Auto-adaptation dans les Systèmes Multi-Agents :
de l'entité autonome au système organisé*

Mémoire présenté à

l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité Informatique

par

Emmanuelle Grislin-Le Strugeon
Maître de Conférences en Informatique

soutenue le 12 décembre 2007 devant le jury composé de

Rapporteurs :

Prof. Amal	EL FALLAH SEGHROUCHNI
Prof. Abder	KOUKAM
Prof. Joël	QUINQUETON

Examineur :

Prof. Philippe	MATHIEU
----------------	---------

Promoteurs :

Prof. Christophe	KOLSKI
Prof. René	MANDIAU

Table des matières

Introduction	5
Contexte organisationnel et thématique des recherches	5
Contexte thématique et motivations	5
Thématiques des contributions	7
Contenu du document	7
1 Chapitre 1 - Curriculum Vitae	9
1.1 Etat Civil	9
1.2 Titres et diplômes	10
1.3 Emplois et Statuts	10
1.4 Activités d'enseignement	11
1.4.1 Synthèse des activités d'enseignement	11
1.4.2 Responsabilités pédagogiques	13
1.5 Activités de recherche, encadrement et animation	15
1.5.1 Adaptation organisationnelle et individuelle dans les Systèmes Multi-Agents	15
1.5.2 Conception de systèmes interactifs à base de Systèmes Multi-Agents	19
1.5.3 Perspectives	20
1.5.4 Encadrement	23
1.5.5 Animation de la recherche	24
1.6 Publications	29
1.6.1 Bilan quantitatif	29
1.6.2 Détail des publications	29
2 Chapitre 2 - Organisations multi-agents	37
2.1 Introduction	37
2.2 Contribution à la modélisation des organisations multi-agents	38
2.2.1 Modèle orienté structure	39
2.2.2 Modèle orienté interaction	42
2.2.3 Modèle orienté composante	46
2.3 Contribution aux modèles et méthodes d'adaptation organisationnelle .	49
2.3.1 Détection	50
2.3.2 Décision	50

2.3.3	Action	53
2.3.4	Adaptation par changement de modèle organisationnel	54
2.3.5	Adaptation des composantes organisationnelles	57
2.4	Conclusion	61
3	Chapitre 3 - Sélection d'action et adaptation individuelle	63
3.1	Introduction	63
3.2	Contribution à l'adaptation du comportement	64
3.2.1	Approche par combinaison linéaire	65
3.2.2	Approche par mécanisme de vote	69
3.2.3	Approche hybride	74
3.3	Conclusion	76
4	Chapitre 4 - Conception de systèmes interactifs	79
4.1	Contribution à la conception de systèmes interactifs selon un paradigme multi-agents	79
4.2	Contribution à l'étude de l'interaction Humain-SMA	80
4.2.1	Autonomie du SMA vis-à-vis de l'utilisateur	81
4.2.2	Intégration du caractère multiple du système	84
4.2.3	Conception de SMA avec IHM	85
4.3	Systèmes Multi-Agents d'Information	87
4.3.1	Proposition d'une architecture et d'une méthode de personnalisation de l'information	89
4.3.2	Proposition d'une méthode de développement de SMA d'information	97
4.3.3	Application	101
4.4	Conclusion	105
	Conclusion générale et Perspectives	107
	Références	113

Table des figures

1.1	Répartition du service en 2006-07	12
2.1	Synthèse du modèle organisationnel orienté structure	41
2.2	Synthèse du modèle organisationnel orienté interaction	44
2.3	Gain moyen en coopération obtenu par rapport au système de référence, par type de regroupement et selon le nombre d'agents [Mandiau <i>et al.</i> , 1999]	45
2.4	Synthèse du modèle organisationnel orienté composante [Grislin–Le Strugeon, 2007]	47
2.5	Protocoles principaux régissant les interactions au sein de MAPIS [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006]	60
3.1	Composants d'un agent selon un modèle basé comportements [Hanon, 2002]	64
3.2	Exemple de vues issues du logiciel RESPECT	67
3.3	Architecture de l'agent-piéton de RESPECT	67
3.4	Exemple de réseau de comportements appliqué à la commande d'un piéton virtuel	68
3.5	Exemple de croisement de deux agents en présence d'un obstacle.	72
3.6	points de vue propres à chacun des agents dans la situation présentée en figure 3.5 [Hanon <i>et al.</i> , 2006]	72
3.7	Variation moyenne de direction en fonction du nombre d'agents présents [Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007].	73
3.8	Nombre moyen (en gris) et maximal (en noir) d'options évaluées par un agent à chaque pas de la simulation [Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007].	74
3.9	Principes d'auto-observation et de contrôle appliqués à une architecture multi-niveaux [Grislin–Le Strugeon <i>et al.</i> , 2005].	75
4.1	Exemple d'agent assistant selon le modèle ARCH [Kolski et Grislin–Le Strugeon, 1998].	80
4.2	architecture de MAPIS (Multi-Agent Personalized Information System) [Petit-Rozé, 2003]	91
4.3	architecture de PerSyst (<i>Personalized information system</i>) [Anli, 2006] .	92

4.4	Personnalisation des réponses fournies sur la base des modèles d'utilisateurs [Petit-Roze <i>et al.</i> , 2003c]	93
4.5	Principe général de la méthodologie <i>PerMet</i> de conception de SMAI [Grislin–Le Strugeon <i>et al.</i> , 2006a].	98
4.6	Proposition de solution adaptée aux besoins et préférences de l'utilisateur	102
4.7	Exemple d'ajout d'un événement dans l'agenda MOUVER	103
4.8	Représentation générale de l'activité de personnalisation d'itinéraire des agents de gestion de profil dans MOUVER.	104

Introduction

Ce mémoire présente une synthèse de mes activités d'enseignant-chercheur, d'abord en tant que doctorante, puis Assistante Temporaire d'Enseignement et de Recherche, et enfin Maître de Conférences, à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Contexte organisationnel et thématique des recherches

Mes activités de recherche se déroulent au sein du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique, Industrielles et Humaines (LAMIH, anciennement LAIH), UMR CNRS 8530, à Valenciennes, et dont les thématiques d'origine possèdent un point commun essentiel au sein du laboratoire, qui consiste à prendre en considération l'humain en interaction avec des systèmes automatisés : coopération Homme-Machine ; systèmes d'aide à la décision ; systèmes interactifs. De plus, le laboratoire possède un axe applicatif transversal concernant le domaine des transports.

Depuis 1998, je fais partie du groupe Raisonnement Automatique et Interaction Homme-Machine (**RAIHM**) dirigé par le Pr. C. Kolski. Ce groupe se compose de deux thèmes principaux : le Raisonnement Automatique et l'Interaction Homme-Machine. Le thème **Raisonnement Automatique** regroupe les recherches appartenant aux domaines de l'IA (Intelligence Artificielle) et des Systèmes Multi-Agents (SMA). Dans ce thème, les recherches animées par le Pr. R. Mandiau concernent la planification, l'organisation et la coordination multi-agents. Mes contributions s'inscrivent principalement dans la composante SMA du groupe, auxquelles s'ajoutent quelques études transversales à celui-ci.

Contexte thématique et motivations

Les *Systèmes Multi-Agents* (SMA) sont l'expression moderne de l'Intelligence Artificielle Distribuée apparue dans les années 70. Ce domaine étudie les systèmes composés d'agents en interaction. Un *agent* est une entité qui perçoit, au moins partiellement, son environnement, et agit sur celui-ci en fonction de ses objectifs.

Tout comme les modèles et langages objet ont fait évoluer les systèmes informatiques vers plus de modularité, une des attentes liées aux agents est qu'ils permettent de faire évoluer les systèmes vers plus d'autonomie. Il existe différentes formes d'autonomie (voir la classification qu'en ont fait [Carabelea *et al.*, 2003]), dont le principe commun est la

capacité à se comporter de façon indépendante d'un élément externe (l'utilisateur, les autres agents, etc.).

L'autonomie est une caractéristique cruciale des systèmes dont le concepteur ne peut connaître complètement l'environnement d'exécution, en raison de sa dynamique (l'environnement est susceptible de changer) et/ou de son ouverture (l'environnement subit des influences externes). La motivation pour des systèmes plus autonomes provient ainsi du besoin de maintenir certaines propriétés, en particulier certaines fonctionnalités, malgré des données environnementales changeantes. La panne d'une application dont les services étaient auparavant disponibles sur le réseau, le dysfonctionnement d'une machine dans un atelier de production, l'entrée d'un nouveau joueur dans un jeu vidéo, sont des exemples de situations susceptibles de nécessiter des adaptations de la part du système et sur son initiative, en vue de continuer à poursuivre ses buts malgré les changements intervenus dans son environnement.

Le contexte informatique qui est en cours d'apparition actuellement fait de plus en plus usage de systèmes composés d'entités autonomes, par exemple par :

- la mise en connexion de multiples éléments informatiques (applications logicielles diverses, unités de calculs, bases de données, ...) au sein d'un réseau ouvert et dynamique ;
- la coordination de programmes ou d'équipements autonomes spécialisés, par exemple, les divers systèmes d'aide dans les avions et voitures, ou en domotique ;
- la réalisation de tâches par des équipes de robots autonomes, de façon déconnectée d'un contrôle humain, par exemple en milieu sous-marin ou en exploration spatiale,
- etc.

Or, l'étude de ces nouveaux types de systèmes s'avère particulièrement importante car ils génèrent des problèmes dus à l'absence de linéarité entre les comportements individuels et les comportements collectifs. En effet, le comportement collectif ne se résume pas à la juxtaposition des comportements individuels : les interactions produisent des influences inter-individuelles qui modifient les comportements de chacun. Même si les individus s'ignorent mutuellement, les actions que chacun réalise sur l'environnement partagé a des conséquences sur les comportements des autres. Ceci peut résulter en des comportements inconnus au niveau individuel, et donc qualifiés d'"émergents". Lorsque les entités connaissent l'existence les uns des autres, il s'agit de communiquer, de négocier, de se coordonner, etc. Tous ces éléments forment ce "plus" qui n'existe pas au niveau individuel et qui rend de fait le système partiellement imprévisible. Tout comme le développement de logiciel requiert des tests d'intégration en plus des tests unitaires, la fiabilité et la robustesse d'entités autonomes ne présentent pas des qualités du système qui les rassemblera.

Le domaine des *systèmes multi-agents* étudie précisément ces thématiques, centrées autour du rapport existant entre le comportement global du système étudié et les comportements individuels qui sont le fait d'*agents* autonomes, selon deux axes principaux :

1. la conception de systèmes informatiques sur la base d'entités distribuées,

2. et l'analyse de phénomènes globaux qui émergent de l'action de multiples entités en interaction.

Ces alternatives ne sont pas réellement distinctes, car la conception de systèmes nécessite de prévoir et donc d'analyser quel sera le résultat de l'interaction des éléments développés, et inversement, l'analyse de phénomènes émergents à l'aide d'un SMA est réalisée expérimentalement, à l'aide d'une modélisation informatique qui requiert une phase de conception.

Thématiques des contributions

Malgré la relative interdépendance des deux axes de recherche cités, nos travaux s'inscrivent toutefois plus particulièrement dans le premier axe, à savoir la conception de systèmes. Dans ce contexte, notre approche de l'autonomie consiste à doter le système de capacités d'*adaptation* lui permettant de poursuivre ses buts malgré certains changements affectant son environnement ou ses propres éléments. L'objectif général peut s'exprimer comme étant la conception de *systèmes adaptatifs* (capables de s'adapter) basés sur des SMA, ensembles d'agents autonomes en interaction.

Notre contribution au domaine réside en la recherche de solutions à appliquer afin de doter le système de la capacité de détecter son propre besoin d'adaptation (perception du besoin), et de la capacité de choisir en quoi il doit s'adapter (décision). Cet objectif vaut pour les deux niveaux auquel l'étude s'adresse, tant au niveau social ou macro, dans lequel le système est un ensemble organisé d'agents, qu'au niveau individuel ou micro, dans lequel le système est un agent. Au niveau social, nous nous sommes intéressés aux méthodes d'adaptation de l'organisation d'un SMA. Au niveau individuel, l'objet d'étude a été l'adaptation du comportement d'un agent dans un environnement à forte dynamisme.

De plus, dans le contexte d'un objectif général de conception, nous nous sommes intéressés à divers aspects des systèmes interactifs à base d'agents, en particulier par l'étude de l'interaction entre agents humains et agents artificiels, et l'adaptation à l'utilisateur.

Contenu du document

Ce document commence par un Curriculum Vitae étendu, comprenant une synthèse des activités de recherches ainsi que la présentation des activités d'enseignement et d'encadrement.

La suite développe les trois thématiques évoquées, qui font successivement l'objet des trois chapitres suivants :

1. l'adaptation organisationnelle d'un SMA ;
2. l'adaptation comportementale d'un agent ;
3. la conception de systèmes interactifs basés sur un SMA.

Le dernier chapitre conclut sur la synthèse du travail réalisé et reprend les principales perspectives de recherche proposées.

Enfin, le lecteur notera que le pronom *nous* abondamment utilisé dans ce document reflète mal toutes les nuances de mon implication au sein des divers travaux décrits. En particulier, l'exercice de rédaction de ce document nécessite de décrire les travaux de thèse encadrés. Leurs auteurs prennent alors bien évidemment la part principale dans la réalisation de *notre* travail évoqué.

Chapitre 1

Curriculum Vitae

1.1 Etat Civil

Nom marital : **Grislin**
Prénom : **Emmanuelle**
Nom de jeune fille : **Le Strugeon**

Date et lieu de naissance : 08 septembre 1968 à Roubaix
Nationalité : Française
Situation familiale : mariée, 2 enfants

Adresse personnelle : 16b rue de la Fontaine
59990 Maresches
Tél. personnel : +33 03 27 41 63 22

Adresse professionnelle : LAMIH - UMR CNRS 8530
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
(UVHC)
Le Mont Houy
F-59313 Valenciennes Cedex 9
Tél. : +33 03 27 51 14 99 - Fax. +33 03 27 51 13 16

E-mail : Emmanuelle.Grislin@univ-valenciennes.fr
http://www.univ-valenciennes.fr/LAMIH/?perso=grislin-lestrugeon_emmanuelle

Statut actuel : Maître de conférences en Informatique à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

1.2 Titres et diplômes

1995 : **Doctorat en Automatique Industrielle et Humaine**, mention très honorable.

Titre : *Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs.*

Thèse soutenue le 17 janv. 1995, à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC),

co-direction de R. Mandiau (MdC), Pr. P. Millot, et Pr. G. Libert (Faculté Polytechnique de Mons)

rapporteurs : professeurs C. Sayettat et J. Ferber

1991 : **D.E.A. d'Automatique Industrielle et Humaine** (UVHC), mention Bien

Titre : *Contribution à la conception et à la réalisation d'une interface évoluée : le Module Décisionnel d'Imagerie.*

resp. : Pr. P. Millot et C. Kolski (MdC)

1990 : **Maîtrise d'informatique** (Lille I)

1988 : **D.E.U.G.** Sciences et Structures de la Matière (Lille I)

1.3 Emplois et Statuts

depuis sept. 1997 : **Maître de conférences** à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Précisions et autres statuts :

sept. 2003-août 05 : **Délégation** au CNRS effectuée au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique, industrielles et Humaines (LAMIH), à l'UVHC

oct. 2000-04 : obtention de la **PEDR**

sept. 1998 : Titularisation

sept. 1997 : Nomination en tant que **Maître de conférences** stagiaire à l'UVHC

sept. 1996-août 97 : **Consultante**, société Ariane II (Bruxelles)

Génie Logiciel : méthode de conception de Data Warehouse

oct. 1994-août 96 : **Assistante Temporaire d'Enseignement et de Recherche**

à l'I.U.T. de Valenciennes, département Génie Electrique et Informatique Industrielle

sept. 1991-sept. 94 : **Allocataire de recherche et monitrice** à l'UVHC.

1.4 Activités d'enseignement

Mes premières activités d'enseignement ont eu lieu à l'Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes (ISTV), en tant que monitrice durant ma thèse. En tant qu'ATER, je suis ensuite intervenue à l'IUT Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII) de Valenciennes.

Pendant l'année passée en tant que consultante dans une société privée (1996-97), j'ai eu l'occasion d'acquérir des connaissances dans le domaine des entrepôts de données (Data Warehouses) et de la fouille de données, sur la base desquelles j'ai mis en place un cours en formation interne dans la société. Ce cours a ensuite été adapté pour les DESS TNSI (Technologies Nouvelles des Systèmes d'Information) lors de mon retour à l'université.

J'enseigne désormais principalement à l'ISTV, dans la filière informatique, en formation initiale. A ceci s'ajoutent des interventions ponctuelles, telles que le Génie Logiciel orienté objet à l'IUT d'informatique de Maubeuge, une initiation à l'intelligence artificielle en formation continue à l'IUT MI (Maintenance Industrielle) ou aux bases de données à la FSMS (Faculté des Sciences et Métiers du Sport).

1.4.1 Synthèse des activités d'enseignement

- depuis sept. 1997 : **Maître de conférences** à l'UVHC
enseignements principaux à l'Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes (ISTV).
- sept. 1996-août 1997 : **Consultante**, société Ariane II (Bruxelles)
cours interne à la société : conception de Data Warehouse.
- oct. 1994-août 1996 : **ATER** à l'IUT de Valenciennes, dép. GEII
algorithmique et programmation, logique, réseaux locaux.
- sept. 1991-sept. 1994 : **Monitrice** à l'ISTV
TD et TP en 1er cycle, algorithmique et programmation.

Matières principalement enseignées actuellement

- **Génie Logiciel Orienté Objet**, en DUT Informatique 2 et Licence Pro. :
Notions fondamentales en OO, principes des méthodes OO, notation UML, outils supportant UML.
- **Analyse, algorithmique et programmation**, en DEUST IOSI 2 et Licence 3 :
structures de données (bases et avancées). Récursivité, recherches, tris. Programmation en langage C, pointeurs, structures et unions, paramétrage de programme, préprocesseur. Langage C++.

- **Bases de données**, en Licence 3 SMS (Sciences et Métiers du Sport) : conception, réalisation et interrogation de BD relationnelles, SQL.
- **Informatique décisionnelle**, en Master 2 Pro. : principes fondamentaux des Data Warehouses (conception, conduite de projet, utilisation) et techniques de Data Mining.
- **Intelligence Artificielle**, en Master 2 Recherche : interactions intelligentes à base d'agents.

Formations (depuis 1992)

- *formations générales* : DEUG (SPI, MP, MIAS, MASS) devenus Licence 1 et 2
- *formations spécialisées* : DUT GEII (Génie Electrique et Informatique Industrielle), DEUST MII (Micro-Informatique Industrielle) et IOSI (Informatique d'Organisation et Systèmes d'Information), Licence STAPS (devenue Science et Métiers du Sport), Licence et Maîtrise d'informatique (devenus Licence 3 et Master 1), Licence Pro. Informatique, IUP ELC et GMI, EIGIP, DESS CCI (Compétences Complémentaires en Informatique), DESS TNSI (devenu Master 2 Pro. TNSID), Master 2 Recherche AISIH.

Volumes horaires

Année	CM	TD	TP	total éq. TD	resp. péda- gogique	remarques
2007-08	73	97	43	248		<i>prévision</i>
2006-07	79	108	130	311		prise en charge tardive de groupes TP
2005-06	83	112	45	267	DEUST IOSI 2	
2004-05	10			15		délégation CNRS
2003-04	10			15		délégation CNRS
2002-03	59	61	71	197	DEUST IOSI 2	
2001-02	70	94	53	234	DEUST IOSI 2	
2000-01	61	103	25	211	DEUST IOSI 2	
1999-00	27	187	44	257	stages DESS CCI	
1998-99	11	182	88	257	stages DESS CCI	
1997-98	10	72	50	120		congé de maternité

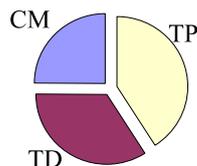


FIGURE 1.1 – Répartition du service en 2006-07

Supports pédagogiques

Des supports de cours ont été mis à la disposition des étudiants :

- *Introduction au langage C++ et aux concepts orientés objet*, DEUST IOSI 2e Année (34 p.)
- *Langage C*, DEUST IOSI 2e Année (16 p.)
- *Structures de Données*, IUP2/Licence 3 Informatique (66 p.)
- *Génie Logiciel Orienté Objet et UML*, (différentes versions en IUT Info., Licence Pro. et DESS/Master 2 TNSI)
- *Algorithmique et Langage C*, DESS/Master 2 CCI (20 p.)
- *Conception de Bases de Données*, Licence 3 SMS (34 p.)
- *Systèmes d'Information Décisionnelle*, DESS/Master 2 CCI et TNSID (27 p.)

1.4.2 Responsabilités pédagogiques

2000-03, 05-06 : **responsable pédagogique des DEUST IOSI 2ème année**
(Informatique d'Organisation et Systèmes d'Information) :

- rénovation du contenu
- passage au LMD
- articulation avec les licences Pro

Le DEUST IOSI est une formation en 2 ans post-bac ayant pour objectif originel de former des étudiants aux métiers de l'informatique de gestion. En septembre 2000 et en collaboration avec un collègue (M. Hamroun), nous en avons rénové le contenu afin de l'adapter aux nouvelles conditions du marché du travail. De plus, il a été nécessaire de préparer l'articulation de ces deux années avec les licences professionnelles, afin de permettre aux meilleurs étudiants sortants de poursuivre leurs études. Nous avons introduit au programme de nouvelles méthodes de génie logiciel (par l'orientation objet en particulier et UML), l'apprentissage de langages de programmation plus récents (C++, Java, programmation événementielle), ainsi qu'une spécialisation en deuxième année (soit informatique de gestion, soit NTIC).

J'ai repris la responsabilité de cette formation durant l'année 2005-06 après une délégation CNRS.

1998-2000 : **responsable des stages en DESS/Master 2 Pro. CCI**
(Compétences Complémentaires en Informatique)

La responsabilité des stages en DESS/ Master 2 CCI consistait en :

- la préparation du stage par le conseil aux étudiants dans leur recherche (CV, lettre de motivation, entretien), et par la mise à disposition d'adresses d'entreprises susceptibles de les intégrer et d'offres qui nous parviennent directement ;

- la gestion du suivi de stage par la répartition des responsabilités parmi les collègues enseignants ;
- la gestion de la fin de stage : préparation des envois de fiches d'évaluation aux parrains industriels et organisation des soutenances (plannings, salles et matériels).

Enfin, il est à noter qu'ayant une responsabilité pédagogique à l'ISTV, j'étais membre de droit du Conseil d'Administration de cet institut. Ceci a été l'occasion de participer au passage de l'institut au LMD européen, des premières réunions de découverte des textes afférents, aux décisions de réorganisation des formations en filières par discipline, jusqu'aux discussions relatives au contenu de ces formations dans une articulation globale afin d'autoriser certaines réorientations de la part des étudiants.

1.5 Activités de recherche, encadrement et animation

Mes activités de recherche se déroulent au sein du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (**LAMIH**) de l'université de Valenciennes. J'ai effectué ma thèse dans l'équipe qui était dirigée par Pr. P. Millot. Suite à la réorganisation du laboratoire en 1997, j'ai intégré le groupe Raisonnement Automatique et Interaction Homme-Machine (**RAIHM**) dirigé par le Pr. C. Kolski, dans le sous-thème *Raisonnement distribué*, animé par le Pr. R. Mandiau.

Le domaine de recherche qui nous intéresse est l'intelligence artificielle distribuée (IAD), et plus spécifiquement, les **systèmes multi-agents** (SMA). Les SMA sont constitués de plusieurs entités autonomes réelles ou virtuelles en interaction, capables de percevoir (au moins partiellement) et d'agir sur leur environnement. Tout comme les modèles et langages objet ont fait évoluer les systèmes informatiques vers plus de modularité, une des attentes liées aux modèles Multi-Agents est l'évolution des systèmes vers plus d'autonomie. L'autonomie d'un système est ici définie comme étant sa capacité à prendre des décisions quant à la méthode à employer pour poursuivre ses buts, sans intervention d'autres systèmes (y compris l'intervention humaine). La recherche d'autonomie provient du besoin de maintenir certaines propriétés, notamment les fonctionnalités du système, lorsque les données environnementales changent.

Notre approche de l'autonomie consiste à doter le système de capacités d'*adaptation* lui permettant de s'affranchir de certaines influences externes. L'objectif général peut s'exprimer comme étant la conception de systèmes adaptatifs (capables de s'adapter) basés sur des SMA, ensembles d'agents autonomes en interaction. Au niveau social, nous nous sommes intéressés aux méthodes d'*adaptation de l'organisation d'un SMA*. Au niveau individuel, l'objet d'étude a été l'*adaptation du comportement d'un agent* dans un environnement à forte dynamique. De plus, dans le contexte d'un objectif général de conception, nous nous sommes intéressés à divers aspects des *systèmes interactifs à base de SMA*, en particulier par l'étude de l'interaction entre agents humains et agents artificiels, et l'adaptation à l'utilisateur.

1.5.1 Adaptation organisationnelle et individuelle dans les Systèmes Multi-Agents

L'étude de l'adaptation organisationnelle des agents concerne essentiellement la dynamique du système. Nous avons toutefois basé celle-ci sur un modèle statique décrivant les composants de l'organisation et leurs relations.

Modélisation des organisations d'agents

mots clés : SMA, organisation, rôle, structure, tâche

Les systèmes multi-agents sont principalement utilisés selon les deux objectifs que sont la conception de systèmes informatiques sur la base d'éléments distribués, et l'analyse de phénomènes qui émergent de l'interaction d'entités multiples. Ces objectifs ne sont généralement pas des alternatives bien distinctes, car la conception de systèmes nécessite de prévoir et donc d'analyser quel sera le résultat de l'interaction des éléments développés, et inversement, l'analyse de phénomènes émergents par SMA est réalisée expérimentalement, à l'aide d'une modélisation informatique qui requiert une phase de conception.

Ces deux objectifs correspondent à deux points de vue sur l'organisation d'agents. De la part du concepteur, l'organisation est l'ensemble de liens, règles et comportements à établir parmi les agents de façon à ce que le système global se comporte tel qu'il a été spécifié. De la part de l'observateur ou analyste d'un système distribué, l'organisation est le schéma global de fonctionnement observé.

Les deux points de vue ont en commun de nécessiter l'expression du modèle de l'organisation conçue ou observée à un instant donné. En conception, l'enjeu est de définir tous les éléments nécessaires à l'interaction des agents, des buts individuels simples à satisfaire, jusqu'à de complexes comportements de coordination impliquant des notions telles que le rôle, l'autorité ou le pouvoir. De même, la reconnaissance de l'existence d'une organisation parmi des entités distribuées nécessite de pouvoir comparer ce qui est observé à des modèles de référence. L'ensemble de ces éléments permet de décrire l'organisation du système.

C'est pourquoi nous avons cherché à obtenir une vue de l'organisation du SMA qui soit assez abstraite et indépendante du système pour permettre de reconnaître une organisation connue dans le système observé (manifestation de l'émergence), décrire la forme d'organisation utilisée (en conception), ainsi que la structure réellement produite au sein des agents. Nous avons fait évoluer notre modélisation au fil des années.

Le premier modèle d'organisation multi-agents, développé au cours de ma thèse, est un **modèle orienté "structure"** des organisations d'agents, l'accent étant mis sur les rôles et la hiérarchie inter-agents. Nous avons appliqué ce modèle descriptif à quatre structures organisationnelles (hiérarchie, communauté, marché et société), afin de constituer une *bibliothèque organisationnelle* dans laquelle le SMA peut venir chercher une organisation adaptée à la tâche qu'il doit réaliser.

Publications¹ : [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994c], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994a], et la partie "modélisation" de ma thèse [Grislin–Le Strugeon, 1995].

Ces travaux ont été poursuivis dans le cadre de la thèse de Gauthier Agimont (1996), que j'ai co-encadrée. Dans l'étude précédente, l'adéquation d'une organisation relativement à une tâche donnée s'était effectué sur la base de données bibliographiques.

1. citation par ordre chronologique de parution

L'objectif de ces nouveaux travaux était d'étayer cette mise en correspondance organisation/tâche par des résultats expérimentaux.

Les organisations d'agents ont fait l'objet d'une **modélisation orientée “interaction”**, l'accent étant mis sur les modes de division du travail et d'attribution des tâches. Des expériences ont été menées sur la base de simulation par des réseaux de Petri paramétrés (PPN), en faisant varier la taille et la composition de diverses organisations d'agents miniers, afin d'en évaluer l'efficacité (définie selon trois types de coût). Les résultats obtenus montrent en particulier l'avantage des regroupements par flux de travail relativement aux autres formes d'organisation.

Publications : thèse de G. Agimont [Agimont, 1996], [Agimont *et al.*, 1995], [Agimont *et al.*, 1996], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1996a], [Mandiau *et al.*, 1999] et [Mandiau *et al.*, 2000].

Enfin, notre conception actuelle du modèle (**orienté “composante”**) distingue le SMA, le modèle organisationnel, et son application par ce SMA. Relativement aux travaux existants, ce modèle introduit la notion de *composante organisationnelle* afin de distinguer les agents des éléments de la structure organisationnelle. La formalisation proposée a pour objectif d'offrir un cadre de description à la modélisation de la dynamique organisationnelle.

Publication : [Grislin–Le Strugeon, 2007], à paraître.

Modèles et méthodes d'adaptation organisationnelle

mots clés : SMA, adaptation, organisation, réorganisation, formalisation

Les modèles précédents rendent compte de l'état du système à un instant donné. Mais dans le cadre d'un système ouvert placé dans un environnement dynamique, des agents y entrent, en sortent, se modifient, les contraintes extérieures changent. Notre objectif est d'explorer les modifications qu'un SMA peut appliquer afin d'adapter son organisation en réponse à une nouvelle situation.

Afin d'assurer la réalisation des buts qui leur sont alloués, les agents peuvent s'adapter en modifiant leur organisation. Deux types principaux de modifications organisationnelles se distinguent, selon qu'elles affectent la répartition des ressources (agents ou compétences) ou la structure organisationnelle, en regard des buts visés.

Nos premiers travaux relatifs à ce sujet ont exploré les changements de structure organisationnelle, sur la base du modèle orienté “structure” décrit ci-dessus. Nous avons proposé une **méthode de réorganisation de SMA** à partir d'une double caractérisation : celle de la tâche à réaliser et celle d'un ensemble de structures prédéfinies. Le postulat était que la connaissance des caractéristiques des structures organisationnelles relativement aux besoins en termes de connaissances, d'actions et de coordination de

la tâche courante, doit permettre aux agents de choisir une organisation adaptée. Ceci s'est révélé original et intéressant en tant qu'alternative aux deux approches de conception, réactive vs. cognitive, qui prévalaient au moment de ces travaux (début des années 90).

Publications : ma thèse [Grislin–Le Strugeon, 1995], [Grislin–Le Strugeon et Mandiau, 1994], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994b], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994a] et [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1996a].

Cependant, les changements complets de structure peuvent se révéler coûteux en raison de la quantité de liens inter-agents à modifier. Afin de rendre l'organisation plus flexible sans en modifier totalement la structure, il est possible de se baser sur des modèles d'organisation plutôt que sur des structures préétablies. Nous avons en particulier étudié les possibilités de regroupements temporaires d'agents en fonction des besoins. L'organisation initiale et persistante étant formée de *pools* composés d'agents aux compétences similaires, des actions de regroupement leur permettent de créer dynamiquement des **structures temporaires basées sur les flux de travail**. Des protocoles de communication spécifiques ont été proposés afin de permettre aux agents de créer des liens temporaires entre eux, selon les compétences recherchées et leurs disponibilités.

Publications : [Petit-Roze et Grislin–Le Strugeon, 2005], partie modélisation SMA de [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006].

Adaptation comportementale individuelle

mots clés : agent, sélection d'action, vote, préférences

Au niveau de l'agent, une autre forme d'adaptation a été étudiée. Elle est la résultante d'une forme d'organisation, non plus entre agents, mais entre des "entités décisionnelles" internes à un agent, et appelées *comportements*. Tout agent, en tant qu'entité autonome, prend des décisions en fonction de ses buts, de ses capacités, de son état et de celui de son environnement. C'est pourquoi la sélection d'une action pertinente à un instant donné est une des problématiques fondamentales des systèmes autonomes en environnement ouvert et dynamique. Dans ce cadre, la décomposition interne en termes de comportements et selon une architecture dite "horizontale" permet de prendre en compte des buts éventuellement concurrentiels et des stimuli environnementaux différents.

L'approche suivie dans la thèse de David Hanon, que j'ai co-encadrée, est basée sur le **vote de préférences distribuées**. A chaque pas de calcul, chacun des comportements propose un ensemble d'options d'actions. Celles-ci font l'objet de classements individuels selon les préférences de chacun, puis d'un vote final qui détermine quel sera le comportement global de l'agent au pas suivant. Les possibilités de veto permettent de respecter les contraintes environnementales.

Les avantages de la méthode proposée sont principalement d'autoriser l'utilisation d'un espace d'actions moins contraint que dans les travaux existants et de s'affranchir des problèmes de paramétrage expérimental. L'application visée est la navigation autonome de piétons virtuels.

Publications : [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2002], [Hanon *et al.*, 2003], [Hanon *et al.*, 2005], [Hanon *et al.*, 2006], thèse de D. Hanon (2006).

Le comportement de l'agent obtenu par l'approche ci-dessus est fortement réactif, permettant une adaptation aux situations imprévues. L'inconvénient lié à ce type d'approche réside en la possibilité de comportement inadapté et non détecté par l'agent.

Afin de répondre à ce problème, nous avons commencé à étudier les possibilités de couplage de la méthode ci-dessus avec un comportement capable de mémoriser et d'analyser les actions passées. L'objectif est de permettre à l'agent de déterminer si son propre comportement est approprié ou non. Un principe d'**auto-contrôle** a été proposé et simulé dans le cadre de la navigation autonome afin de limiter les situations de blocage et d'hésitation.

Publication : [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2005].

1.5.2 Conception de systèmes interactifs à base de Systèmes Multi-Agents

Etude de l'interaction Humain-SMA

mots clés : SMA, interaction Humain-SMA

L'autonomie des agents et le caractère multiple du SMA posent la question de la **spécificité des interactions** des utilisateurs avec ce type de systèmes, bien que ceci ait été peu étudié jusqu'alors. Nous nous sommes placés dans un contexte de résolution de problème impliquant des acteurs humains et des agents artificiels.

Nous avons d'une part confronté nos modèles de coopération à ceux qui prévalent dans le domaine de l'interaction Humain-Machine, et tenté de catégoriser les situations d'interaction en fonction des phases de la résolution du problème. Nous avons d'autre part mis en évidence les cas principaux rencontrés en conception de système Humain-SMA, en fonction du niveau d'implication de l'utilisateur dans les tâches réalisées et en fonction des points de vue agent, utilisateur ou concepteur.

Publications : [Kolski *et al.*, 1993], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1996b], [Kolski et Grislin–Le Strugeon, 1998], [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 1998], [Grislin–Le Strugeon et Millot, 1999], [Péninou *et al.*, 1999], [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 2001].

Conception de Systèmes Multi-Agents d'Information

mots clés : SMA, système d'information, génie logiciel

Nous nous sommes également intéressés au *système multi-agents d'information* (ou SMAI), à savoir le SMA en tant que système central d'un système d'information (SI). En effet, l'approche multi-agent permet une adaptation à un environnement distribué, dynamique et ouvert tel que l'internet et les bases de données réparties. Elle permet également l'adaptation aux utilisateurs. En effet, les agents sont capables de réaliser des tâches de personnalisation afin de fournir de l'information pertinente aux utilisateurs.

Cette thématique a été abordée dans le cadre de deux thèses que j'ai co-encadrées : dans un premier temps, une architecture multi-agents et une méthode de personnalisation de l'information ont fait l'objet de la thèse de Christelle Petit-Rozé (2003), puis une méthode de **conception de systèmes multi-agents d'information** a été proposée dans celle de Abdouroihamane Anli (2006). Dans les deux cas, le SMA destiné à personnaliser de l'information est constitué d'agents spécialisés, qui se regroupent dynamiquement par flux de travail. Les regroupements privilégient la réutilisation de solutions afin d'accélérer le processus de résolution de problème. L'originalité de la méthode de conception consiste en ce qu'elle sépare les phases dédiées au SI et au SMA, celui-ci étant considéré comme fournisseur de services de personnalisation appliqués aux données gérées par le SI. La notation associée utilise AUML, dont elle propose une extension.

Le cadre applicatif est l'information aux usagers des transports terrestres, via une collaboration avec G. Uster de l'INRETS et plusieurs projets de recherche GRRT, PREDIT et PREDIM.

Publications : [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2001], [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2002], [Petit-Rozé *et al.*, 2004], [Anli *et al.*, 2004b], [Anli *et al.*, 2005b], [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2006a], les aspects SI de [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006], et les thèses de C. Petit-Rozé (2003) et A. Anli (2006).

1.5.3 Perspectives

Les Systèmes Multi-Agents possèdent un lien fort avec l'environnement informatique actuel, dans lequel les systèmes présentent un caractère de plus en plus autonome et sont en interaction via les réseaux. Les problématiques de ce domaine (distribution, autonomie, adaptation, collectif, organisation, ...) correspondent aux questions posées par ce nouvel environnement évolutif et ouvert : quel résultat collectif va émerger des activités individuelles, partiellement indépendantes mais interconnectées ? quels regroupements d'intérêts vont se former, évoluer ? comment concevoir des systèmes destinés à intégrer de tels environnements ? comment leurs donner les moyens de modéliser les autres, de s'adapter ? etc.

En réponse à ces interrogations et relativement aux travaux effectués, nos perspectives se déclinent selon trois aspects : la recherche fondamentale, les recherches intégrant

plusieurs thématiques et les applications envisagées.

Concernant l'aspect fondamental des recherches, les pistes suivantes nous paraissent prometteuses en terme d'approfondissement des travaux actuels :

- La *formalisation de la dynamique organisationnelle des SMA* ouvre des perspectives concernant la mise en évidence, de façon théorique et non plus expérimentale, de certaines propriétés des méthodes d'organisation des SMA. La formalisation d'une stratégie d'organisation a ainsi pour but de vérifier que la méthode utilisée répond à un ensemble de critères, tels que la flexibilité du système, définie en tant que sa capacité à adapter son organisation relativement à certains événements, ou sa robustesse, définie par sa capacité à assurer sa fonction indépendamment de l'évolution de son environnement. Notre objectif est donc de poursuivre nos travaux en vue de décrire les méthodes d'adaptation organisationnelles de façon suffisamment formelle pour permettre de cerner plus précisément le comportement du système.

A cette fin, le modèle organisationnel proposé doit être complété. La notion de rôle doit être approfondie dans le sens d'une distinction entre la définition "originelle" d'un rôle (dans le modèle) et sa réalisation effective au sein de la structure. En particulier, nous envisageons d'intégrer au modèle les concepts normatifs (relatifs aux normes et conventions dans les organisations) qui apportent une nouvelle façon d'aborder les liens entre agents et leur évolution. Ceci permettra, par exemple, de représenter les autorisations de modification des interactions entre rôles.

Nous travaillons actuellement dans ce sens, de façon complémentaire aux travaux actuels d'E. Adam (groupe RAIHM) concernant les changements de rôles dans les SMA. Relativement à cette thématique, nous travaillons également en collaboration avec des chercheurs de l'IRIT (Toulouse) dans le cadre du groupe de recherche COLLINE. La participation au GdR MFI (Modèles Formels de l'Interaction) a enrichi également la réflexion à ce sujet.

- Comme ce qui concerne l'organisation au niveau collectif, la *sélection d'action* peut faire l'objet d'un méta-traitement de la part des agents au niveau individuel. Dans ce cadre, nous envisageons de poursuivre les travaux initiés précédemment dans le sens de l'auto-contrôle de l'agent autonome. En particulier, l'intégration de l'approche par mécanisme de vote au sein d'une architecture hybride constitue une première contribution à cet objectif.

Ces approches sont complémentaires des travaux actuels du Pr. R. Mandiau portant sur les méthodes de résolution en situations non-coopératives.

Les éléments étudiés selon une approche fondamentale centrée SMA ouvrent la voie à des **travaux intégrant plusieurs thématiques** :

- La formalisation de la dynamique organisationnelle et l'introduction des concepts normatifs dans la modélisation offrent des perspectives concernant les interactions Humain-SMA. Ils permettent en effet de représenter des changements de comportements relatifs au schéma organisationnel initial. Dans le contexte de l'aide à la décision en particulier, un champ d'investigation commun serait la modélisation des organisations émergentes issues de la co-adaptation humain/système à base d'agents. Ce type d'approche peut par exemple être utilisé dans un but de conception participative de systèmes.
- L'étude de l'auto-adaptation des méthodes d'organisation pourrait être l'occasion de poursuivre certaines collaborations internes au LAMIH initiées précédemment, lors des travaux concernant la personnalisation des informations (2 co-encadrements de thèse avec la thématique IHM du groupe RAIHM), la gestion d'ateliers flexibles (1 co-encadrement de Master 2 Recherche en collaboration avec le groupe Systèmes de Production), et lors de l'enseignement des méthodes de Data Mining (collaboration avec le groupe Recherche Opérationnelle et Informatique). Ces travaux ont en commun l'usage de techniques d'apprentissage à des fins d'auto-adaptation des systèmes.

L'**application de nos travaux** est jusqu'à présent principalement liée au *domaine des transports*, domaine dans lequel le laboratoire LAMIH, intégré dans le pôle de compétitivité *I-Trans*², présente une forte expertise. Les perspectives de recherche et de collaboration avec cette visée applicative sont ainsi nombreuses, sans que cela n'exclut bien évidemment tout autre domaine. Par exemple, le cadre de la gestion des ateliers flexibles, introduit lors des travaux réalisés en collaboration avec le groupe SP et le GdR CollInE, pose des problèmes complémentaires. Deux projets en cours de démarrage offriront également de nouvelles perspectives, dans le cadre du travail collaboratif autour d'une table dotée de capteurs RFID d'une part, et dans celui des robots autonomes d'autre part.

Pour conclure, notons qu'une analyse proposée par le groupe européen AgentLink³ montre que les technologies basées agents n'en sont qu'aux premières phases de leur diffusion industrielle. Il reste en effet du travail à réaliser en terme de standardisation et de mise à l'échelle. De plus, un des freins à la diffusion des approches orientées agents réside en la difficulté à établir un équilibre acceptable entre l'adaptabilité des systèmes et la prédictibilité de leur comportement. Ceci nous semble être une des clés de l'avenir du domaine : aller vers la création de systèmes autonomes, adaptatifs et flexibles, à condition d'être aussi robustes, prédictibles et vérifiables.

2. I-trans a pour but de soutenir des projets susceptibles de contribuer à l'évolution des transports de demain sur la base de quatre enjeux : l'intelligence, l'innovation, l'intermodalité et l'interopérabilité.

3. M. Luck, P. McBurney, O. Shehory, S. Willmott and the AgentLink Community, *Agent Technology : Computing as Interaction - A Roadmap for Agent Based Computing*, Rapport AgentLink III, sept. 2005.

1.5.4 Encadrement

Co-encadrement de thèses (4)

David Hanon

Titre du travail : *Agents intelligents pour la simulation de personnages virtuels : application à la sécurité du piéton enfant.*

Date début : oct. 2002– Date fin : déc. 2006.

Co-direction (50%) avec le Pr. R. Mandiau.

Statut actuel du docteur : consultant, société ALTEN, Marcq-en-Baroeul.

Abdouroïhamane Anli

Titre du travail : *Méthodologie de conception et d'évaluation de système d'information multimodale au service des usagers dans les transports collectifs.*

Date début : oct. 2002 – Date fin : oct. 2006.

Co-direction (33%) avec les Pr. C. Kolski et M. Abed.

Statut actuel du docteur : post-doctorant à l'INRIA, Rocquencourt.

Christelle Petit-Rozé

Titre du travail : *Personnalisation de l'information à base d'agents intelligents.*

Date début : déc. 1999 – Date fin : déc. 2003.

Co-direction (50%) avec les Pr. C. Kolski et M. Abed.

Statut actuel du docteur : contractuelle à l'INRETS, Villeneuve d'Ascq.

Gauthier Agimont

Titre du travail : *Modélisation et simulation des organisations multi-agents.*

Date début : sept. 1993 – Date fin : juin 1996.

Co-direction (33%) avec les Pr. R. Mandiau et G. Libert (Faculté Polytechnique de Mons).

Statut actuel du docteur : consultant en société d'informatique, Belgique.

Co-encadrement de Master 2 Recherche / DEA (7)

Anis Hachemi (Sept. 2005-Juil. 2006) :

Auto-organisation d'un atelier de production géré par un système multi-agents.

Co-direction (50%) avec le Pr. D. Trentesaux

Emmanuel Boidin (Sept. 2004-Juil. 2005) :

Apprentissage automatique pour la personnalisation : application au transport terrestre de personnes.

Co-direction (75%) avec le Pr. C. Kolski

Tristan Treboz (Sept-2002-Juil. 2003) :

Proposition d'un formalisme d'agent pour les systèmes d'informations personnalisés.

Co-direction (50%) avec le Pr. R. Mandiau

David Hanon (Fev. 2002-Sept. 2002) :

Animation comportementale de piéton virtuel.

Co-direction (50%) avec le Pr. R. Mandiau

Abdouroihamane Anli (Sept. 2001-Juil. 2002) :

Modélisation de l'utilisateur par les agents d'un système d'information personnalisée.

Co-direction (33%) avec les Pr. C. Kolski et M. Abed

Christelle Petit-Rozé (Sept. 1998-Juil. 1999) :

Etude de faisabilité des agents intelligents au service de l'information multimodale pour le transport de personnes.

Co-direction (33%) avec les Pr. C. Kolski et M. Abed

Philippe Polet (Sept. 1997-Juil. 1998) :

Apport des méthodes multi-agents au raisonnement à partir de cas.

Co-direction (33%) avec les Pr. R. Mandiau et B. Houriez

1.5.5 Animation de la recherche

Projets de recherche

J'ai eu l'occasion de collaborer à divers projets de recherche ces dernières années, du montage des dossiers à la réalisation.

Ces projets peuvent être regroupés en trois familles thématiques en fonction de leur domaine d'application :

- personnalisation des informations dans le domaine du transport ;
- animation comportementale pour la réalité virtuelle ;
- interactions personnes-organisations.

Ils ont été l'occasion d'encadrer des étudiants (stages, projets d'étude) et de créer différents partenariats. En particulier, les deux premières thématiques concernent le **domaine du transport**, axe applicatif transverse du LAMIH, ce qui nous a amené à travailler depuis plusieurs années en **collaboration avec l'INRETS**.

1. **Projet GRRT Prospectif : Agents intelligents au service de l'information multimodale dans les transports de personnes.** (1998-99)

En partenariat avec Guillaume USTER (INRETS-ESTAS, Villeneuve d'Ascq).

Support aux stages d'étudiants en DEA (C. Rozé), DESS ICHM (A. Bennani) et DESS TNSI (L. Farrands).

Exploration du domaine de l'information multimodale (multi-modes de transport) et proposition de nouvelles solutions à base d'agents.

Référence : [Petit-Rozé *et al.*, 2001]

2. Projet PREDIT : AGENPERSO (2001-03)

En partenariat avec G. Uster (INRETS), O. Walbecq et M. Zidi (société ARCHIMED).

Support au stage de DEA de A. Anli (2002).

Modélisation des utilisateurs par des agents, pour la personnalisation du contenant et du contenu de l'information. Il repose sur une organisation multi-agents dynamique ; les agents chargés de représenter les utilisateurs se regroupent selon les points communs des profils qu'ils gèrent. Ils sont de plus capables d'apprendre et d'évoluer en fonction des changements intervenus dans les profils des utilisateurs.

Références : [Petit-Roze *et al.*, 2003c], [Petit-Rozé *et al.*, 2003].

3. Projet PREDIT RESPECT (Route Empruntée en Sécurité par le Piéton-Enfant Confronté au Trafic) (2001-03)

En partenariat avec le CRP2C (Centre de Recherche en Psychologie, Cognition et Communication) de Rennes, l'INRETS/LPC d'Arcueil et la société CORYS TESS de Grenoble.

Support au stage de DEA de D. Hanon.

Conception d'un simulateur éducatif permettant de placer l'enfant-joueur dans des situations accidentogènes engendrées par des interactions entre les piétons et les véhicules. Contribution à la conception et à la réalisation de l'animation comportementale des piétons virtuels.

Références : [Grislin-Le Strugeon *et al.*, 2002], [Aubert *et al.*, 2003].

4. Projet régional/FEDER NIPO (2001-2004) : Nouvelles Interactions Personnes-Organisations.

Projet supporté par la Région Nord-Pas de Calais dans le cadre du programme TACT (Technologies Avancées pour la Communication et les Transports) et le FEDER.

En partenariat avec l'équipe PERCOTEC du LAMIH (Psychologie et Ergonomie de la Cognition dans les environnements TECHNOlogiques, activités collectives), et différents laboratoires de Lille : l'équipe NOCE (Nouvelles Organisations pour la Coopération et l'Éducation) du laboratoire TRIGONE, les équipes SMAC (Systèmes Multi-Agents) et GRAPHIX (Interaction Homme-Machine 3D) du LIFL.

Participation à l'action 2 (Méthodes de conception de Nouvelles Interactions Personnes-Organisations) et plus spécifiquement à la tâche 2.1 visant à étudier de Nouvelles Interactions Personnes-Organisations auto-adaptatives relativement au savoir et savoir-faire des utilisateurs, ainsi qu'au contexte d'interaction. Une partie de la 1ère phase de ce projet a été consacrée à l'organisation de la conférence internationale CADUI'2002 organisée dans la région Nord-Pas de Calais (Valenciennes, 15-17 mai), rassemblant un centaine de personnes et intéressant la plupart des membres du projet NIPO.

Référence : [Kolski *et al.*, 2004a].

5. Projet PREDIM : MOUVER.PERSO - MObilité et mUltimodalité Voyageurs Etudiants en Région Nord-Pas de Calais - Système d'information multimodale personnalisée. (2004-2006)

Dans le cadre du PREDIM et en partenariat avec l'INRETS, équipe ESTAS, Villeneuve d'Ascq, et la société Archimed (Lille).

Support de CDD d'un ingénieur de recherche. Domaine d'application et de validation pour la thèse d'A. Anli.

Proposition et démonstration d'un ensemble de services d'aide personnalisée à la mobilité, qu'il serait possible d'apporter dans le domaine des déplacements quotidiens des étudiants. L'innovation principale est l'intégration de proposition d'itinéraires en fonction des événements ajoutés à l'agenda personnel de l'utilisateur, sur PDA.

Référence : [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2006b].

6. Projet régional MIAOU (2004-2006) : Nouvelles Interactions Personnes-Organisations : Modèles d'Interaction et Architectures Orientées Usages.

Dans le cadre du programme TAC (Technologies Avancées pour la Communication), du Contrat de Plan Etat-Région.

En partenariat avec les équipes PERCOTEC, NOCE, SMAC et GRAPHIX (Cf. projet NIPO, ci-dessus), ainsi que : le CERIM-EVALAB (Ergonomie et usage des nouvelles technologies en santé : évaluation ergonomique et aide à la conception) de Lille, et l'équipe MODEL (Modélisation et Evolution du Logiciel) du Laboratoire d'Informatique du Littoral.

Je participerai également à deux nouveaux projets ANR qui vont démarrer au dernier trimestre 2007 : (i) le projet TTT (Table d'interaction avec des objets Tangibles et Traçables) dans le cadre du travail collaboratif autour d'une table dotée de capteurs RFID ; (ii) le projet AMORCES (Algorithmes et MOdèles pour un Robot Collectif Éloquent et Social) dans le domaine des robots autonomes.

Groupes de recherche

- Membre du PRC-GDR I3 (Information. Interaction. Intelligence.) :
Structure d'Animation S.M.A. (2.1), groupe COLLECTif-INteraction-Emergence
(membre du groupe COLLINE depuis 1995).
<http://www.irit.fr/COLLINE>
- Groupe (MFI) Modèles Formels pour l'Interaction (1.5), de 2002 à 2006.
<http://mfi.univ-lille1.fr>
- groupe COPIE (COmportement du PIéton dans son Espace de circulation) depuis
2005
<http://pfi-copie.inrets.fr>
- l'équipe RAIHM/SMA était affiliée au réseau européen AgentLink (II)
<http://www.agentlink.org>
- groupe de recherche T2 - Interaction entre organisation humaine et organisation
agent, dans le cadre du projet régional MIAOU (depuis 2004)
- groupe de recherche régional NIPO (2001-2004)
- Groupe 7 du GRAISyHM (Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée
et Systèmes Homme-Machine), entre 1996 et 1998.

Participation à un jury de thèse extérieur à l'UVHC

- Examinatrice de la thèse de Daniel Rodic, 2005 :
Titre du travail : *Intelligent Distributed Agent Based Architecture, INDABA*
PhD in Computer Science, Faculty of Engineering, Built Environment and Infor-
mation Technology, University of Pretoria
Direction : Pr. A.P. Engelbrecht (Computational Intelligence Research Group)

Relecture d'articles de revues

- La *Revue d'Intelligence Artificielle*, Numéro spécial *Modèles multi-agents pour
des environnements complexes*, 2007
- Le *South-African Computing Journal*, 2004
- La *Revue d'Interaction Homme-Machine* (RIHM), 2004
- La revue *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2002

Relecture d'articles de conférences

- JFSMA (Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents), 2006 et 2007
- ISSADS (International School and Symposium on Advanced Distributed Systems),
Guadalajara, Mexique, 2005 et 2006
- ROADEF (congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide
à la Décision), Lille, 2006
- EAM (Europ. Ann. Conf. on Human Decision-Making and Manual Control), Va-
lenciennes, 2006
- IHM (Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine), 2004

- ALCAA (Agents Logiciels, Coopération, Apprentissage et Activité humaine), Bayonne, 2003
- workshop *Load balancing and scheduling* de la conférence Europar, Mons, Belgique, 1999
- RJCIA (Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle), Toulouse, 1998

Organisation d'événements

- Membre du comité d'organisation de la conférence CADUI 2002 (4th International Conference on Computer-Aided Design of User Interfaces), Valenciennes, mai 2002 ;
- Organisation d'une session *Interaction with agent systems* lors de la conférence HCII'2001, août 2001.

Autres activités : représentation

- membre élu de la CSE 27e section de l'université de Valenciennes depuis 2001.
- membre nommé du CA du LAMIH depuis 2005.

1.6 Publications

1.6.1 Bilan quantitatif

- Articles dans une revue internationale : 4
- Articles dans une revue nationale : 4
- Coordination d’ouvrages : 1
- Chapitres de livres : 5
- Conférences internationales avec actes et comité de lecture : 26
- Conférences nationales ou francophones avec actes et comité de lecture : 14
- Séminaires et autres communications : 7
- Rapports de contrats de recherche : 5
- Rapports de recherche : 2

1.6.2 Détail des publications

Articles dans une revue internationale (4)

- [1] C. Petit-Rozé and E. Grislin–Le Strugeon. MAPIS, a multi-agent system for information personalization. *Information and Software Technology*, 48 : 107–120. 2006.
- [2] R. Mandiau, E. Grislin–Le Strugeon, and G. Agimont. Study of the influence of organizational structure on the efficiency of a multi-agent system. *Networking and Information Systems Journal*, 2(2) : 153–179. 1999.
- [3] C. Kolski and E. Grislin–Le Strugeon. A review of intelligent human-machine interfaces in the light of the arch model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3) : 193–231. 1998.
- [4] C. Kolski, E. Grislin–Le Strugeon, and M. Tendjaoui. Implementation of AI techniques for intelligent interface development. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 6(4) : 295–305. 1993.

Articles dans une revue nationale (4)

- [5] E. Grislin–Le Strugeon. Modélisation de l’adaptation organisationnelle dans les systèmes multi-agents. *Revue d’Intelligence Artificielle, Numéro spécial Modèles multi-agents pour des environnements complexes*, 21(sous presse). 2007.
- [6] A. Anli, E. Grislin–Le Strugeon, and M. Abed. Une plate-forme de personnalisation basée sur une architecture multi-agents. *Revue des Nouvelles Technologies de l’Information (RNTI-E)*, (5) : 95–100. 2005.
- [7] A. Anli, C. Petit-Rozé, and E. Grislin–Le Strugeon. Plate-forme d’intégration de services personnalisés à base d’agents logiciels. *Génie Logiciel*, 71 : 34–39. 2004.
- [8] C. Petit-Rozé, A. Anli, E. Grislin–Le Strugeon, M. Abed, G. Uster, and C. Kolski. Système d’information transport personnalisée à base d’agents logiciels. *Génie Logiciel*, 70 : 29–38. 2004.

Coordination d'ouvrages (1)

- [9] R. Mandiau, E. Grislin–Le Strugeon, and A. Péninou (eds.). *Organisation et applications des SMA*. Hermès, Paris. (366 pages). 2002.

Chapitres de livres (5)

- [10] E. Grislin–Le Strugeon, D. Hanon, and R. Mandiau. Behavioral self-control of agent-based virtual pedestrians. In *Advanced Distributed Systems : 5th International School and Symposium, ISSADS 2005, Revised Selected Papers*, vol. 3563 of *Lectures Notes in Computer Science*, F.F. Ramos, V. Larios Rosillo and H. Unger ed., 529–537. Springer-Verlag, Heidelberg. 2005.
- [11] C. Petit-Rozé and E. Grislin–Le Strugeon. Systèmes d'information à base d'agents. In *Organisation et application des SMA*, R. Mandiau and E. Grislin–Le Strugeon and A. Péninou ed., 307–319. Hermès, Paris. 2002.
- [12] E. Grislin–Le Strugeon, E. Adam, and C. Kolski. Agents intelligents en interaction homme-machine dans les systèmes d'information. In *Environnements évolués et évaluation de l'IHM. Interaction Homme-machine pour les SI*, vol. 2, C. Kolski ed., 209–248. Hermès, Paris. 2001.
- [13] R. Mandiau and E. Grislin–Le Strugeon. *Systèmes multi-agents*, vol. S7216, 1–17. Techniques de L'ingénieur, Paris. 2001.
- [14] E. Grislin–Le Strugeon, R. Mandiau, and G. Libert. Towards a dynamic multi-agent organization. In *Methodologies for Intelligent Systems*, vol. 869 of *Lectures Notes in AI*, Z.W. Ras and M. Zemankova ed., 203–213. Springer-Verlag, Heidelberg. 1994.

en soumission :

E. Grislin–Le Strugeon, A. Anli and E. Adam. A Methodology to bring MAS to Information Systems. *Agent-Oriented Information Systems (AOIS) à CAISE'06, Luxembourg, Revised Selected Papers*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2007.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture (26)

- [15] E. Grislin–Le Strugeon, A. Anli, and E. Adam. A methodology to bring mas to information systems. In *CAISE'06 The 18th International Conference on Advances Information Systems Engineering*, pages 64–75, Luxembourg, june 2006. Presses Universitaires de Namur.
- [16] D. Hanon, E. Grislin–Le Strugeon, and R. Mandiau. A behaviour based decisional model using vote. In *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation - CIMCA'2005 (28-30 November 2005, Vienna, Austria)*. IEEE Computer Society, November 2005.
- [17] A. Anli, E. Grislin–Le Strugeon, and M. Abed. A generic personalization tool based on a multi-agent architecture. In *Proceedings HCI International (Las Vegas,*

- Nevada, July 22-27, 2005*), Volume 7 - *Universal Access in HCI : Exploring New Interaction Environments*, pages 1–8, Mahwah, New Jersey, July 2005. Lawrence Erlbaum Associates.
- [18] S. Bousbia, A. Anli, D. Trentesaux, and E. Grislin–Le Strugeon. Agile scheduling of flexible manufacturing systems of production. In *17th IMACS World Congress Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, pages 316–323, Paris, July 2005.
- [19] A. Anli, C. Petit-Roze, and E. Grislin–Le Strugeon. User-based decision support system. In *International Conference on Advances in Intelligent Systems - Theory and Applications, AISTA'2004*, Luxembourg, November 2004.
- [20] D. Hanon, E. Grislin–Le Strugeon, and R. Mandiau. A behavior based architecture for the control of virtual pedestrians. In *The second International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems CIRAS 2003*, pages 125–132, Singapore, December 2003. CIC, University of Singapore.
- [21] C. Petit-Roze and E. Grislin–Le Strugeon. Intelligent agents to structure and to process personalized information systems. In *Proceedings International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce - IAW-TIC'2003*, pages 165–174, Vienna, Austria, February 2003. DiskTech Pty Ltd, Canberra, Australia.
- [22] C. Petit-Roze, E. Grislin–Le Strugeon, G. Uster, and C. Kolski. An intelligent agent-based personalized information system. In *Universal access in HCI : inclusive design in the information society (volume 4 of the Proceedings of HCI International 2003)*, pages 597–601, Mahwah, New Jersey, January 2003.
- [23] E. Grislin–Le Strugeon, D. Hanon, P. Pudlo, and F.X. Lepoutre. Agent-based modelling of autonomous virtual humans. In *Proceedings of 5th International Conference Computer Graphics and Artificial Intelligence (3IA'2002)*, pages 170–174, Limoges, France, January 2002. Diazo1, Clermont-Ferrand.
- [24] C. Petit-Roze, E. Grislin–Le Strugeon, and M. Abed. Personalized information systems. In *Analysis, design and evaluation of human-machine systems 2001 : a proceedings volume from the 8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium*, pages 369–374, Kassel, Germany, September 2001. Elsevier Science Ltd, Amsterdam.
- [25] C. Petit-Roze and E. Grislin–Le Strugeon. Interaction with agent systems for intermodality in transport systems. In *Usability evaluation and Interface design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, volume 1, pages 494–498. Lawrence Erlbaum Associate Publishers, London, January 2001.
- [26] E. Grislin–Le Strugeon and A. Péninou. Interaction with agents systems : problems and classification. In *Usability evaluation and Interface design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, volume 1, pages 479–483. Lawrence Erlbaum Associate Publishers, London, January 2001.
- [27] R. Mandiau, E. Grislin–Le Strugeon, and G. Agimont. Study of the efficiency of multi-agent organizational structure : an approach based on an experiment. In

- 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, Boston, USA, July 2000.
- [28] A. Péninou, E. Grislin–Le Strugeon, and C. Kolski. Multi-agent systems for adaptive multi-user interactive systems design : some issues of research. In *Human-Computer Interaction, Ergonomics and User Interfaces*, pages 326–330. Lawrence Erlbaum Associate Publishers, London, August 1999.
 - [29] E. Grislin–Le Strugeon and P. Millot. Specifying artificial cooperative agents through a synthesis of several models of cooperation. In *Proceedings of the 7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control CSAPC'99*, pages 73–78, Villeneuve d'Ascq, France, September 1999. Presses Universitaires de Valenciennes, Valenciennes.
 - [30] M.P. Pacaux-Lemoine and E. Grislin–Le Strugeon. Multiagent systems and human-machine cooperation. In *17th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control (EAM)*, pages 101–110, Valenciennes, France, December 1998.
 - [31] E. Grislin–Le Strugeon and R. Mandiau. Flexible behaviors for contexte adaptive multi-agent organizations. In *Second International Conference on MultiAgent Systems (ICMAS)*, Kyoto, Japon, December 1996.
 - [32] E. Grislin–Le Strugeon, M. Tendjaoui, R. Mandiau, and C. Kolski. Intelligent agents concepts for computer-supported collaborative work systems in complex industrial systems - research directions. In *COOP'96 Second International Conference on the Design of Cooperative Systems*, pages 331–344, INRIA, Rocquencourt, June 1996. Hermès, Paris.
 - [33] R. Mandiau and E. Grislin–Le Strugeon. Integrating the conflict solving into the multi-agent planning. In *International Conference on Information Systems, Analysis and Synthesis (ISIS)*, July 1996.
 - [34] G. Agimont, E. Grislin–Le Strugeon, R. Mandiau, and G. Libert. Parameterized petri nets for organizational simulation and systems design. In *COOP'96 Second International Conference on the design of cooperative systems*, pages 261–277, INRIA, Rocquencourt, January 1996.
 - [35] G. Agimont, E. Grislin–Le Strugeon, and G. Libert. Self organizing agents using petri nets. In *7th International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems Applications (Expersys)*, San Francisco, USA, November 1995.
 - [36] R. Mandiau and E. Grislin–Le Strugeon. Explicit representation of a multiagent group : the shared plan. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, Canada, October 1995.
 - [37] E. Grislin–Le Strugeon, M. Grislin, and P. Millot. Toward the application of multiagent techniques to the design of human-machine systems organizations. In *6th IFAC Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, MIT, USA, June 1995.

- [38] E. Grislin–Le Strugeon, R. Mandiau, and P. Millot. Representation for an organization in a multiagent world. In *IFAC Conference on integrated systems engineering*, pages 41–46, Baden-Baden, Germany, September 1994.
- [39] E. Grislin–Le Strugeon, R. Mandiau, and P. Millot. A multiagent organizational adaptation. In *Canadian Workshop on DAI*, Banff, Canada, May 1994.
- [40] E. Grislin–Le Strugeon, M. Tendjaoui, and C. Kolski. Knowledge specification and representation for an intelligent interface devoted to process monitoring and supervision. In *IFAC/IFIP/IMACS International Symposium on Artificial Intelligence in real-time control*, pages 245–250, Delft, The Netherlands, June 1992.

Conférences nationales ou francophones avec actes et comité de lecture (14)

- [41] D. Hanon and E. Grislin–Le Strugeon. Sélection d’actions en environnement continu et dynamique par vote de comportements. In *Systèmes Multi-Agents - Modèles de comportements. Actes des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA) 2007*, pages 223–231, Carcassonne, oct 2007. Cépaduès éd.
- [42] R. Mandiau, D. Hanon, and E. Grislin–Le Strugeon. Modèles comportementaux appliqués à la navigation des piétons. In *Colloque francophone de la Plate-Forme Intégratrice COPIE (Comportement du PIéton dans son Environnement)*, Paris, nov 2007.
- [43] D. Hanon, E. Grislin–Le Strugeon, and R. Mandiau. Un modèle décisionnel orienté comportement utilisant le vote, application à la navigation autonome en environnement simulé. In *Actes de RFIA 2006 15ème congrès francophone Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle (25-27 janvier 2006, Tours)*, Tours, January 2006. Presses Universitaires François-Rabelais.
- [44] C. Petit-Roze and E. Grislin–Le Strugeon. Modelisation d’interactions par et avec des agents en personnalisation d’information. In *Actes des Troisièmes Journées Francophones Modèles Formels de l’Interaction (MFI’2005), Caen, France, 25-27 Mai*. Cepadues-Editions, May 2005.
- [45] C. Kolski, E. Grislin–Le Strugeon, E. Adam, and P. Mathieu. Conception des systèmes multi-agents : pistes de réflexion en vue de futures coopérations entre ergonomes et informaticiens. In C. Bastien, R. Lucongsang, and G. Poulain, editors, *Actes du congrès ERGO-IA ’2004 : Ergonomie et Informatique Avancée*, pages 147–154, ESTIA, Biarritz, November 2004.
- [46] C. Petit-Roze, E. Grislin–Le Strugeon, G. Uster, C. Kolski, and M. Abed. Vers une personnalisation de l’information dans les transports. In *Innovation Technologique dans les Transports Terrestres*, Lille, France, December 2003.
- [47] C. Petit-Roze, C. Kolski, E. Grislin–Le Strugeon, A. Anli, M. Abed, and G. Uster. AgenPerso : IHM à base d’AGENTS logiciels PERSONNELS d’information aux usagers des transports collectifs. In *Proceedings of IHM 2003*, pages 260–263, Caen, January 2003. International Conference Proceedings Series, ACM.

- [48] A. Ebel, D. Hanon, B. Stanciulescu, P. Pudlo, E. Grislin–Le Strugeon, and F.X. Lepoutre. Modèle d’animation comportementale de piétons virtuels. In *XVèmes Journées de l’Association Française d’Informatique Graphique*, Lyon, France, December 2002.
- [49] E. Jamin, E. Grislin–Le Strugeon, S. Leleu-Merviel, and C. Kolski. Vers une approche holistique en recherche d’information contextuelle. In *Conference Internationale NîmesTIC 2001, Relation Homme-Système : complexe ?*, Nîmes, France, December 2001.
- [50] C. Petit-Roze, E. Grislin–Le Strugeon, M. Abed, G. Uster, and C. Kolski. Recherche d’informations personnalisées. In *Conference Internationale NîmesTIC 2000, Ingénierie des Systèmes et NTIC*, Nîmes, France, September 2000.
- [51] E. Grislin–Le Strugeon and A. Péninou. Interaction Homme-SMA : réflexion et problématiques de conception. In *Sytèmes multi-agents, de l’interaction à la socialité. Actes des JFIADSMA ’98*, pages 133–146. Hermès, Paris, 1998.
- [52] E. Grislin–Le Strugeon, G. Agimont, R. Mandiau, and P. Millot. Organisation évolutive d’un système multi-agents. Illustration par des agents-robots miniers. In *I.A. Distribuée et systèmes multi-agents*, pages 167–176. Hermès, Paris, January 1996.
- [53] E. Grislin–Le Strugeon and R. Mandiau. Adaptation organisationnelle d’un système multi-agents en fonction de la tâche courante. In *2èmes Rencontres Nationales des Jeunes Chercheurs en I.A.*, Marseille, France, September 1994.
- [54] E. Grislin–Le Strugeon, R. Mandiau, and G. Libert. Proposition d’organisation dynamique d’un groupe d’agents en fonction de la tâche. In *1ères Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, Toulouse, France, April 1993.

Séminaires et autres communications (7)

- [55] E. Grislin–Le Strugeon. Modélisation orientée agent de piéton : le problème de la sélection d’action, décembre 2005. Séminaire du groupe COPIE (Comportement du PIéton dans son Environnement), INRETS, Arcueil, France.
- [56] E. Grislin–Le Strugeon and P. Dos Santos. Modélisation comportementale à base d’agents : principes et démonstration, mars 2005. Séminaire dans le cadre du projet MIAOU (Modèles d’Interaction et Architectures Orientées Usages), LIFL, Lille, France.
- [57] C. Kolski, C. Petit-Rozé, A. Anli, M. Abed, E. Grislin–Le Strugeon, H. Ezzedine, and A. Trabelsi. La plasticité vue sous l’angle de la personnalisation ou selon les besoins vis-à-vis de l’information transport, août 2004. Journées thématiques de l’AS Plasticité du RTP 16 IHM, Namur, Belgique.
- [58] M. Abed, A. Anli, E. Grislin–Le Strugeon, C. Kolski, C. Petit-Rozé, and G. Uster. Système d’information transport personnalisée à base d’agents logiciels, mai 2003. Séminaire Nouveaux Systèmes d’information au service des usagers du forum Systèmes et Logiciels pour les NTIC dans le transport, CNAM, Paris.

- [59] E. Adam, C. Kolski, R. Mandiau, and E. Grislin–Le Strugeon. Exploitation du modèle holonique dans un cadre combinant IAD et IHM, mai 2003. Séminaire du GT 1.5 Modèles Formels pour l’Interaction du GDR I3, Paris.
- [60] A. Ebel, D. Hanon, B. Stanciulescu, P. Pudlo, E. Grislin–Le Strugeon, and F.X. Lepoutre. Modèle d’animation comportementale de piétons virtuels, décembre 2002. XVème Journée de l’Association Française d’Informatique Graphique, Lyon.
- [61] A. Ebel, M. Lempereur, D. Hanon, P. Pudlo, E. Grislin–Le Strugeon, and F.X. Lepoutre. L’animation d’humanoïdes au lamih, juin 2002. 9ème journée du Groupe de Travail Animation et Simulation, AFIG et GRD-PRC ALP, ENSEIRB, Bordeaux.

Rapports de contrats de recherche (5)

- [62] E. Grislin–Le Strugeon, A. Anli, C. Petit-Rozé, M. Soui, G. Conreur, P. Dos Santos, M. Abed, C. Kolski, G. Uster, O. Walbecq, and M. Zidi. MOUVER.PERSO : MObilité et mUltimodalité Voyageurs Etudiants en Région Nord Pas de Calais - Système d’information multimodale personnalisée. Rapport final de projet PREDIT, LAMIH, Valenciennes, déc. 2006.
- [63] A. Anli, M. Abed, E. Grislin–Le Strugeon, and C. Kolski. Méthodologie de conception et d’évaluation de système d’information au service des usagers dans les transports collectifs. Rapport de convention LAMIH-ARCHIMED, LAMIH, Valenciennes, novembre 2003.
- [64] C. Petit-Rozé, A. Anli, E. Grislin–Le Strugeon, M. Abed, and C. Kolski. AGEN-PERSO : Interface homme-machine à base d’AGENTS Logiciels PERSONnels d’information aux usagers des TC. Rapport final de projet PREDIT, LAMIH, Valenciennes, janvier 2003.
- [65] G. Aubert, C. Charron, S. Jung, M.A. Granié, E. Grislin–Le Strugeon, F.X. Lepoutre, and P. Pudlo. RES-RFI. Rapport final du projet PREDIT RESPECT, janvier 2003.
- [66] C. Petit-Rozé, E. Grislin–Le Strugeon, M. Abed, G. Uster, and C. Kolski. Agents intelligents au service de l’information multimodale dans les transports de personnes. Rapport final de projet prospectif GRRT, LAMIH, Valenciennes, janvier 2001.

Rapports de recherche (2)

- [67] E. Grislin–Le Strugeon. Une méthodologie d’auto-adaptation d’un système multi-agents cognitifs. Mémoire de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, janvier 1995.
- [68] E. Grislin–Le Strugeon. Contribution à la conception et à la réalisation d’une interface évoluée : le module décisionnel d’imagerie. Rapport de DEA, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, juin 1991.

Chapitre 2

Organisations multi-agents et adaptation du système

Cette partie développe les recherches réalisées dans le domaine de l'adaptation organisationnelle des SMA.

2.1 Introduction

Les deux objectifs que sont la conception de systèmes informatiques sur la base d'éléments distribués, et l'analyse de phénomènes qui émergent de l'interaction d'entités multiples, amènent à adopter deux points de vue différents sur les organisations d'agents. De la part du concepteur, l'organisation est l'ensemble de liens, règles et comportements à établir parmi les agents de façon à ce que le système global se comporte tel qu'il a été spécifié : « A decision and communication schema which is applied to a set of actors that together fulfill a set of tasks in order to satisfy goals while guaranteeing a global coherent state » [Malone, 1987]. De la part de l'observateur ou analyste d'un système distribué, l'organisation est le schéma global de fonctionnement observé : « un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. » [Morin, 1977].

Toutefois, les deux points de vue ont en commun de nécessiter l'expression du modèle de l'organisation conçue ou observée à un instant donné. En ce qui concerne la conception de SMA, l'enjeu est de définir tous les éléments nécessaires à l'interaction des agents, des buts individuels simples à satisfaire, aux modes de communication éventuels, jusqu'à de complexes comportements de coordination impliquant des notions telles que le rôle, l'autorité ou le pouvoir. De même, la reconnaissance de l'existence d'une organisation parmi des entités distribuées nécessite de pouvoir comparer ce qui est observé à des modèles de référence, qui s'expriment également selon les termes précédents.

Dans un environnement évolutif, l'organisation ne peut être fixe car, comme l'exprime le troisième point de la théorie de la contingence [Scott, 1992] : « (1) there is no one best way to organize, (2) all ways of organizing are not equally effective, and

(3) the best way to organize is contingent on environmental conditions ». Rendre l'organisation contingente des conditions environnementales consiste, pour les agents, à modifier la structure qui régit les échanges entre eux. L'auto-organisation, c'est-à-dire l'organisation des agents par eux-mêmes, peut être réalisée selon différentes approches. [Camps, 1998] distingue l'auto-organisation par spécialisation des fonctions, de celle par modification de la topologie du groupe. [Serugendo *et al.*, 2006] distinguent l'auto-organisation forte de l'auto-organisation faible : « Strong self-organising systems are those systems where there is no explicit central control neither internal nor external. Weak self-organising systems are those systems where, from an internal point of view, there is re-organisation maybe under an internal (central) control or planning ».

Nous nous plaçons dans l'hypothèse de l'auto-organisation par modification de la topologie du groupe sans contrôle extérieur au système. Nos premiers travaux se basent sur l'existence d'un agent décideur ; ils appartiennent donc à l'approche d'auto-organisation faible. Les suivants lèvent cette contrainte, ils peuvent être considérés comme faisant partie de l'approche d'auto-organisation forte.

L'étude des organisations multi-agents comporte un aspect statique, consistant en la définition des composants de l'organisation et de leurs relations, et un aspect dynamique consistant en les méthodes permettant l'instauration, la suppression ou la modification des relations entre les constituants de l'organisation. La partie 2.2 de ce chapitre présente nos contributions relevant de l'aspect statique, la partie 2.3 traite de l'aspect dynamique.

2.2 Contribution à la modélisation des organisations multi-agents

La modélisation des organisations multi-agents a pour objectif de représenter les éléments constitutifs de la structuration d'un ensemble d'agents. Elle a bien entendu évolué au fil des années. Les travaux de la fin des années 80 s'attachaient principalement à proposer de nouvelles formes de coordination entre agents (voir par exemple [Fox, 1981], [Smith, 1980]). A partir des années 90, les organisations existantes ont fait l'objet de classifications ([Gasser, 1992]¹) et de représentations par des modèles semi-formels ([Ferber et Gutknecht, 1998], [Hannoun *et al.*, 1999], [Wooldridge *et al.*, 2000], [Castro *et al.*, 2000]). Les travaux actuels tendent à une plus grande formalisation ([Gruer *et al.*, 2002], [Fuxman *et al.*, 2004], [Dignum *et al.*, 2005b]) et à une standardisation des modèles d'organisation multi-agents ([Bernon *et al.*, 2004] [Odell *et al.*, 2004]).

Nos travaux ont été dirigés par deux objectifs principaux : la recherche de concepts pertinents pour traduire la diversité des structures existantes et les schémas organisationnels sous-jacents d'une part, la recherche d'une description plus formelle de l'état organisationnel du système. Dans nos premiers travaux, le SMA se déclinait selon différentes formes fixées, décrites dans une bibliothèque de structures organisationnelles. Ensuite, nous avons étudié les différentes déclinaisons possibles d'une organisation don-

1. Pour une classification récente, voir [Horling et Lesser, 2005a].

née en faisant varier la quantité d’agents jouant chacun des rôles. Enfin, notre approche actuelle distingue le SMA, les modèles organisationnels, et leur application par le SMA.

2.2.1 Modèle orienté structure

Le premier modèle de structure organisationnelle, développé au cours de ma thèse [Grislin–Le Strugeon, 1995], est une approche “opérationnelle” de la méthode d’analyse décrite dans [Pattison *et al.*, 1987]. L’objectif étant de rendre ce modèle implémentable et utilisable par des agents logiciels, des simplifications ont été opérées, compensées par ailleurs par une précision accrue des éléments du modèle. Le résultat est une description d’une structure organisationnelle σ par la donnée d’un ensemble de composants C_σ et d’un ensemble de relations L_σ entre ces composants : $\sigma = \langle C_\sigma, L_\sigma \rangle$

Notons que la notion de composant n’était pas reliée à celle de composant informatique telle qu’elle est définie actuellement. Un composant est défini ici comme *ce qui compose* un ensemble. Cette notion se rapporte plus à la notion actuelle de *rôle* dans une organisation d’agent (voir par exemple [Ferber *et al.*, 2004]). En effet, la définition d’un composant correspond à l’application d’un rôle donné à un agent ou un groupe d’agents :

$\forall c \in C_\sigma, c = \langle t, r \rangle$, avec :

- $t \in \{\textit{individuel}, \textit{composite}\}$: décrit le caractère unique ou multiple (groupe) du composant,
- et $r \in \{\textit{coordination}, \textit{execution}, \textit{expertise}\}$: définit le rôle du composant.

La description est récursive, car si un composant est de type *composite*, sa structure pourra être décrite selon la même méthode.

Lors de ces travaux, nous avons défini la notion de rôle en la rapportant à la fonction occupée dans l’organisation, sur le modèle des organisations humaines : la responsabilité de coordinateur consiste à établir la coordination parmi les tâches d’autres composants ; l’exécutant réalise des actions ; l’expert fournit des connaissances aux autres. D’autres rôles pourraient être ajoutés à cette liste, mais les trois précédemment cités nous semblaient suffisants dans notre objectif.

La distinction faite entre le *rôle* et les *responsabilités* d’un composant mérite une explication. Le rôle d’un composant définit la fonction qu’il occupe dans l’organisation. Les responsabilités dénotent l’activité concrète des agents. Un agent a ainsi une responsabilité lorsqu’il a la charge de la réalisation d’une tâche, qu’il s’agisse d’une tâche de coordination ou d’une action de modification de l’environnement. C’est pourquoi le terme de *rôle* désigne la position du composant dans l’organisation, tandis que les *responsabilités* interviennent plus tardivement, lorsque cette distribution aura été effectuée, les agents auront acquis un (ou plusieurs) rôles dans l’organisation et des responsabilités par rapport à la tâche commune incombant au système².

2. D’autres auteurs, comme Aebischer [Aebischer et Oberle, 1990], préfèrent utiliser les termes *statuts* et *rôles*. Les statuts spécifient les positions relatives des membres de l’organisation les uns par rapport aux autres. Les rôles sont les aspects dynamiques des statuts, c’est-à-dire les conduites atten-

A chaque rôle correspond un ensemble de besoins sous forme de ressources. Cependant, une description plus approfondie des besoins en ressources nécessiterait des connaissances concernant l'univers multi-agents spécifique qui l'utilise. Coordonner nécessite de posséder la capacité de communiquer avec les composants qui effectuent les actions à coordonner. Un coordinateur doit pouvoir donner des ordres et, éventuellement, recevoir des acquittements de tâches. Un exécutant reçoit des ordres et, éventuellement, donne des résultats. Un expert reçoit des requêtes et envoie les informations demandées. Enfin, chacun d'entre eux peut avoir besoin d'informations concernant l'environnement ou les capacités des uns et des autres, et donc faire des requêtes à ses accointances.

La relation d'interaction s'applique entre deux composants donnés et est décrite selon deux aspects :

- le lien d'autorité ($lien_a$), qui concerne le sens dans lequel s'exerce l'autorité. Il s'agit d'autoriser ou non l'autonomie d'un composant relativement à un autre : a-t-il la possibilité ou non de refuser l'exécution d'une tâche ?
- le lien de communication ($lien_c$), qui spécifie le sens de communication possible entre les deux composants. Il s'agit de la possibilité pour un composant de déclencher une communication avec un autre composant.

$$\forall l \in L_\sigma, l = \langle lien_a, lien_c \rangle$$

Trois liens élémentaires d'autorité $lien_a$ sont définis du composant c_1 vers le composant c_2 : lien d'infériorité ($<$), de supériorité ($>$) et d'égalité ($=$) ; ainsi que trois liens élémentaires de communication : dans le sens c_1 vers c_2 (\rightarrow), dans le sens contraire (\leftarrow) ou dans les deux sens (\leftrightarrow). Les relations entre composants sont déterminées par leurs rôles respectifs dans l'organisation. Dans ce modèle qui n'autorise pas de violation des règles organisationnelles établies, la communication est liée au lien d'autorité entre les composants. En effet, le contenu des messages (ordre, réponse, échange d'information, etc.) et la direction de l'échange est contraint par le lien d'autorité qui est établi entre les protagonistes. De même qu'un employé sait comment se comporter face à un de ses collègues ou face au P.D.G. de son entreprise, un agent sait, par la connaissance du rôle tenu par un autre agent, quels sont les liens d'autorité et de communication susceptibles de les relier.

Cette description des relations entre agents apparaît désormais trop simple en ce qui concerne la caractérisation des relations entre agents, d'autres travaux ayant depuis montré l'intérêt d'autres types de relations, tel que la relation d'accointance ([Mathieu *et al.*, 2002]), les liens de dépendance ([Castelfranchi *et al.*, 1993], [Hannoun *et al.*, 1998]) ou les liens de pouvoir ([Sibertin-Blanc *et al.*, 2005]).

Application. Nous avons appliqué ce modèle descriptif à quatre structures organisationnelles (hiérarchie, communauté, marché et société) sur la base des travaux de

dues en fonction de ces statuts. Par rapport à la représentation présentée ici, les *statuts* correspondent aux relations entre les composants.

[Fox, 1981] et [Gasser, 1992], afin de constituer une *bibliothèque organisationnelle* dans laquelle le SMA peut venir chercher un modèle adapté à sa situation courante.

Par exemple, la structure de marché est décrite ainsi :

$$\text{marché} = \langle C_{\text{marché}}, L_{\text{marché}} \rangle$$

avec trois types de composants principaux, *manager*, *contractant*, et *dispo* pour “disponible” (contractant potentiel) :

$$C_{\text{marché}} = \{\text{manager}, \text{contractant}, \text{dispo}\}$$

où les managers sont décrits comme des individus ayant un rôle de coordination, les contractants ont un rôle d’exécution et les agents disponibles n’ont pas de rôle :

$$\text{manager} = \langle \text{individu}, \text{coordination} \rangle,$$

$$\text{contractant} = \langle \text{individu}, \text{execution} \rangle,$$

$$\text{dispo} = \langle \text{individu}, \emptyset \rangle$$

Les interactions sont définies entre *manager* et *contractant* et entre *manager* et *dispo* :

$$l_{\text{marché}}(\text{manager}, \text{contractant}) = (<, \leftrightarrow),$$

$$l_{\text{marché}}(\text{manager}, \text{dispo}) = (=, \leftrightarrow)$$

Une vue de synthèse du (méta-)modèle correspondant à ces premiers travaux est donnée en figure 2.1.

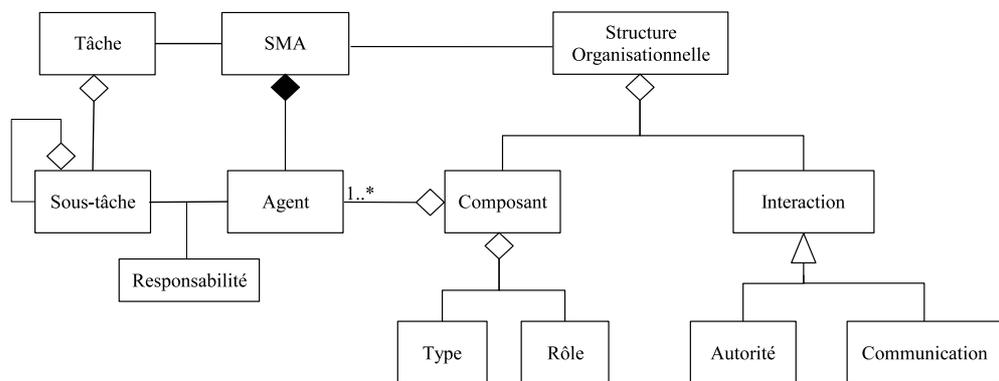


FIGURE 2.1 – Synthèse du modèle organisationnel orienté structure

Ces travaux ont fait l’objet de publications (voir par exemple [Grislin–Le Strugeon et al., 1994c] ou [Grislin–Le Strugeon et al., 1994a]) et de la partie “modélisation” de ma thèse [Grislin–Le Strugeon, 1995].

En complément de ce travail, et en le confrontant aux modèles de coopération développés au laboratoire dans le domaine des Systèmes Hommes-Machines, nous nous sommes demandé si certaines des structures organisationnelles retenues étaient “canoniques”, c’est-à-dire capables de former la base de toute construction organisationnelle ([Grislin–Le Strugeon et Millot, 1999]). En effet, il est apparu rapidement que la structure dite de *société* est formée à partir de types d’organisation hétérogènes, et que les

trois structures restantes - communauté, hiérarchie et marché - ne semblent pas pouvoir s'exprimer en fonction d'autres interactions intra-composants. Cependant, nous n'avons pas pu montrer que toute autre structure pouvait se décrire sur la base de ces trois modèles. Il nous paraît désormais que d'autres facteurs, tels que le pouvoir ou la dépendance évoqués ci-dessus, manquent pour espérer atteindre un modèle plus fondamental que celui-ci. Par ailleurs, des travaux récents de sociologues (voir [Mintzberg et der Heyden, 2000]) décrivent des rôles élémentaires différents de ceux pris en compte dans nos travaux.

2.2.2 Modèle orienté interaction

Ces travaux ont été poursuivis dans le cadre de la thèse de Gauthier Agimont [Agimont, 1996]. Dans l'étude précédente, l'adéquation d'une organisation relativement à une tâche donnée s'était effectué sur la base de données bibliographiques. L'objectif de ces nouveaux travaux était d'étayer cette mise en correspondance organisation/tâche par des résultats expérimentaux.

L'évaluation de l'efficacité de différentes organisations d'agents relativement à une même tâche a été réalisée selon trois critères :

- Le *coût d'infrastructure* correspond à la quantité de liens de communications nécessaires aux interactions dans la structure. En particulier, les agents regroupés au sein d'une même *unité* doivent pouvoir communiquer de façon directe ; les unités communiquent également entre elles.
- Le *coût de coopération* représente la difficulté de coordination entre agents occasionnée par la structure. Par exemple, s'il est nécessaire que des agents appartenant à des unités distinctes coordonnent leurs actions, le coût de coopération sera plus élevé que si la coordination se passe au sein d'une même unité.
- Le *développement de l'expertise* mesure l'évolution (moyenne) de la qualité des connaissances des agents. En effet, le principe sous-jacent, issu de la littérature [Mintzberg, 1986], est que lorsque deux agents partageant la même spécialité entrent en contact, ils sont susceptibles d'améliorer leurs connaissances réciproques.

Ces mesures ont été appliquées à trois formes de regroupement des agents, selon le type d'agent, la spécialité et le flux de travail :

Un *type d'agents* correspond ici à un ensemble homogène de compétences, l'homogénéité étant établie en fonction de l'application. Par exemple, dans le domaine des robots fourrageurs, un type d'agents peut être un agent explorateur terrestre, capable de se déplacer au sol, de percevoir son environnement et de communiquer afin de rendre compte du résultat de sa mission. La première forme d'organisation étudiée consiste ainsi à regrouper des agents de même type, c'est-à-dire possédant des caractéristiques fonctionnelles identiques. Les compétences nécessaires à la réalisation de la tâche particulière sont de cette manière aisées à retrouver dans le système. Cependant, le nombre de communications dédiées à la coordination entre tâches sera nécessairement élevé

dans ce type de structure. En effet, l'aspect flux de travail, à savoir l'enchaînement des tâches et les relations existant entre elles, n'y est absolument pas pris en compte.

Une *spécialité* regroupe différents types ayant un point commun, à définir également selon l'application. Dans l'exemple précédent, il est possible de regrouper des types d'agents explorateurs dédiés au milieu de déplacement (terrestre, marin, aérien) au sein d'une spécialité *exploration*. La deuxième forme d'organisation consiste à établir des unités correspondant aux domaines de spécialités. Les échanges au sein d'une unité particulière permettent aux agents de partager, et donc d'améliorer, leurs connaissances sur la spécialité qu'ils ont en commun. Cette amélioration peut ensuite être répercutée au niveau de la qualité ou de la rapidité du travail. Cependant, ce type de structure présente un inconvénient de taille qui est la nécessité de mettre en place une structure de coordination complexe entre les unités car cette organisation, tout comme la précédente, ne respecte pas nécessairement le flux de travail. De plus, il n'est pas prêté attention à la possibilité de recouvrement de spécialité(s) qui rendrait difficile la répartition des agents en unités distinctes.

Le *flux de travail* associe des agents de spécialités et/ou de types différents au sein d'un groupe ayant un objectif commun. L'accent est alors mis sur la complémentarité des compétences des agents. Ainsi la troisième structure envisagée est le regroupement par flux de travail. Les agents nécessaires à la réalisation d'un projet donné sont rassemblés et chaque équipe travaille ensuite aussi indépendamment que possible des autres. Ayant toutes les ressources nécessaires, ils travaillent rapidement et en collaboration au sein d'une même unité et de manière concurrente entre les unités. Les agents sont dans ce cas considérés en tant que ressources (en compétences, capacités, connaissances ou fonctions) utiles à la réalisation de la tâche [Trentesaux et Tahon, 1994]. Cette solution est intéressante lorsque le flux de travail peut être difficilement géré par différentes unités du fait de la complexité des interactions entre les agents de types différents. Mais cela nécessite l'existence de ressources en nombre suffisant. Dans le cas contraire, certaines d'entre elles doivent être partagées et il n'est dès lors plus possible de créer des équipes complètes. Il est donc nécessaire de connaître rapidement les besoins en ressources requis par la réalisation de telle ou telle tâche. Par ailleurs et comme dans la structure précédente, la polyvalence (partielle ou totale) des agents est un facteur susceptible de compliquer la répartition des agents entre unités autonomes.

Ces regroupements se distinguent par la division du travail, l'attribution des tâches et la mise en place de l'organisation. Ils sont de plus représentatifs d'un grand nombre de structures réelles ([Woodward, 1965], [Litterer, 1973], [Malone, 1987]) parce qu'ils respectent les types d'interdépendance les plus courants [Thompson, 1967].

Une vue de synthèse du nouveau (méta-)modèle correspondant à ces travaux est donnée en figure 2.2.

Des expériences ont été menées sur la base d'une simulation par des réseaux de Petri paramétrés (PPN) [Gracanin *et al.*, 1994]. Ce type de réseaux de Petri permet de représenter le système à différents niveaux d'abstraction. Dans notre modélisation, une place

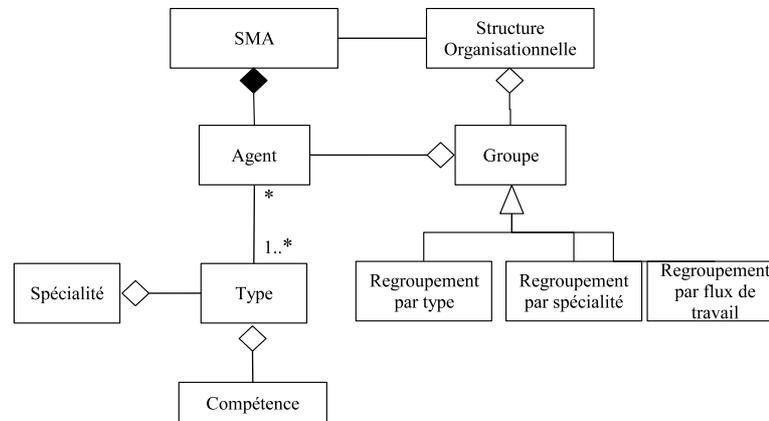


FIGURE 2.2 – Synthèse du modèle organisationnel orienté interaction

paramétrée contient au minimum tous les états relatifs à un objet ou à un agent, et au maximum tous les agents du système. De plus, deux types de données numériques ont été ajoutés au PPN original : des durées et des priorités sur les transitions, permettant de réaliser des mesures de durée d'action des agents et de répéter les expérimentations en déterminant si nécessaire l'ordre des franchissements de transitions.

Application. Après une première application au cas bien connu des proies-prédateurs [Agimont *et al.*, 1995], les PPN ont été utilisés pour simuler le comportements de diverses organisations d'agents miniers, en faisant varier la taille et la composition des regroupements.

Sans détailler plus avant les expérimentations et les résultats obtenus (voir [Mandiau *et al.*, 1999]), notons uniquement parmi ces derniers quelques points intéressants.

Tout d'abord, les gains en infrastructure obtenus dans les systèmes structurés en sous-ensembles sont très nets par rapport au système de référence constitué d'un seul groupe comprenant tous les agents. De plus, cet intérêt croît encore avec la taille du système. Ceci est confirmé par le gain maximal d'un système par rapport au système de référence, qui atteint 53% pour les systèmes comportant 6 agents, 57% pour 7 agents et jusqu'à 64% pour 8 agents en terme d'infrastructure.

Cependant la subdivision du système induit des coûts de coopération : les systèmes de référence sont supérieurs dans ce domaine. De même pour le développement de l'expertise, qui s'est avéré dans tous les cas inférieur au système de référence. Les coûts de coopération sont proportionnellement plus importants dans les groupes de petite taille car la division en sous-groupes y a un effet néfaste de rupture dans le flux de travail : cela force les agents à communiquer entre leurs unités ; il y a dispersion parmi plusieurs unités des compétences nécessaires à la réalisation de la tâche. Ceci apparaît moins lorsque le nombre d'agents s'accroît : les agents ne sont plus irremplaçables, plusieurs agents ayant les mêmes compétences.

Un autre résultat, prévisible, est l'avantage en terme de coûts de coopération dans les regroupements par flux de travail vis-à-vis des autres formes d'organisation étu-

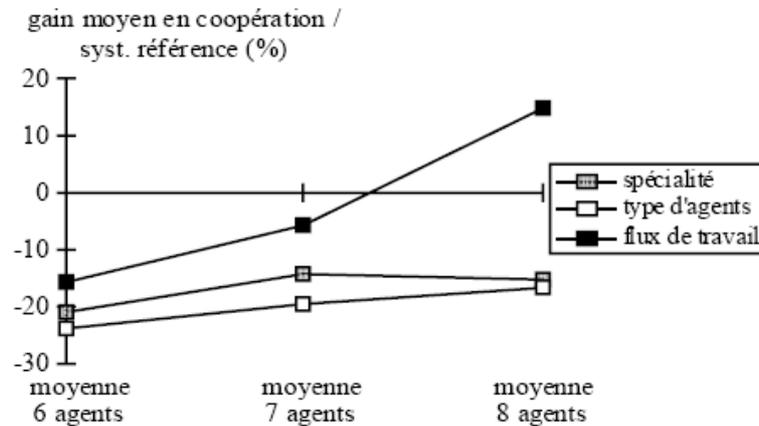


FIGURE 2.3 – Gain moyen en coopération obtenu par rapport au système de référence, par type de regroupement et selon le nombre d'agents [Mandiau *et al.*, 1999]

diées (Cf. figure 2.3). Ce type de structuration regroupant les différentes compétences nécessaires autour d'un projet commun, permet de limiter les phases de recherche de ressource dans la totalité du système. Par ailleurs, l'écart de la structure par flux de travail avec les autres structures a tendance à se creuser à mesure qu'augmente la taille du système. Les systèmes à 8 agents comportent en effet la possibilité de constituer deux équipes complètes et totalement autonomes, comportant un agent de chaque type. Il est surprenant dans ce cas de trouver une valeur meilleure que le cas de référence, mais cette différence provient de la technique utilisée qui introduit des priorités dans le réseau de Petri et qui oblige les agents à se structurer parfaitement en deux lignes de traitement correspondant aux deux unités. Ces priorités n'existent pas dans le cas de référence, les agents se structurant selon le contexte.

Les résultats obtenus ont montré l'intérêt des critères d'évaluation utilisés et ils ont confirmé l'importance de bien choisir la structure du système en fonction de l'objectif. Par exemple, lors de certains des travaux suivants (Cf. partie 2.3.5), nous avons repris les organisations par flux de travail pour leurs caractéristiques intéressantes concernant les coûts de coopération. Toutefois, la petite taille des systèmes simulés (en nombre d'agents) limite la portée de ces expérimentations.

La modélisation par réseaux de Petri paramétrés s'est révélée utile et applicable; ceci a été confirmé lors de travaux suivants dans l'équipe, en particulier pour représenter des processus de type *workflow* ([Adam, 2000]).

Ces travaux ont donné lieu à la thèse de G. Agimont [Agimont, 1996] et aux articles : [Agimont *et al.*, 1995], [Agimont *et al.*, 1996], [Mandiau *et al.*, 1999] et [Mandiau *et al.*, 2000].

2.2.3 Modèle orienté composante

Dans les travaux évoqués en partie 2.2.2, les expérimentations ont porté sur différentes formes d'organisation et sur leurs déclinaisons en termes quantitatifs. Une même forme d'organisation a donné lieu à des regroupements qui diffèrent en nombre d'agents (ce qui influe sur les résultats produits) mais la façon dont les agents y interagissent est identique.

Plus généralement, ce qui caractérise une forme d'organisation est indépendant de sa composition exacte : une hiérarchie est reconnaissable quelque soit son nombre de niveaux ; une structure de marché fonctionne de la même manière quelque soit le nombre d'offrants ; etc. La distinction entre le modèle organisationnel et la structure réellement implémentée peut donc s'avérer importante. La structure selon laquelle les agents s'organisent correspond certes à un modèle organisationnel spécifique, mais il s'agit d'une réalisation spécifique de cette structure selon les besoins et contraintes de ces agents à un instant donné.

C'est pourquoi notre approche a évolué afin de distinguer différentes réalisations d'une même organisation. Relativement aux travaux précédents, le modèle proposé reprend la distinction usuelle entre un *modèle* d'organisation et sa mise en oeuvre dans le cas d'une *structure* particulière. De plus, il introduit la notion de *composante organisationnelle* afin de représenter une autre distinction : celle qui différencie les éléments de la structure organisationnelle et les agents.

Cette double distinction conduit à la description d'une organisation multi-agents en trois parties, dans laquelle le *système* possède une *structure* qui correspond à un modèle d'*organisation* (figure 2.4) :

- le *Système* est la partie la plus concrète de la modélisation. Elle représente les agents, dont l'ensemble est le système multi-agents (SMA) ;
- la *Structure* est la partie centrale de la modélisation. Elle décrit les composantes de la structure organisationnelle, et leur composition en sous-structures ;
- l'*Organisation* est la partie la plus abstraite de la modélisation. Elle représente le modèle d'organisation, le "canevas" sous-jacent et reconnaissable, sur lequel est basée la structure existant parmi les agents.

Plus précisément, nous définissons un modèle ω d'organisation indépendamment de l'implémentation qui en est faite : un *modèle d'organisation* est une classe de structures organisationnelles présentant les mêmes caractéristiques de rôles et de modes d'interaction entre les acteurs jouant ces rôles.

$$\omega = \langle \mathcal{R}_\omega, interaction \rangle$$

avec :

\mathcal{R}_ω : l'ensemble des rôles du modèle

interaction : fonction qui associe un mode d'interaction à certains ensembles de rôles (généralement, des couples de rôles)

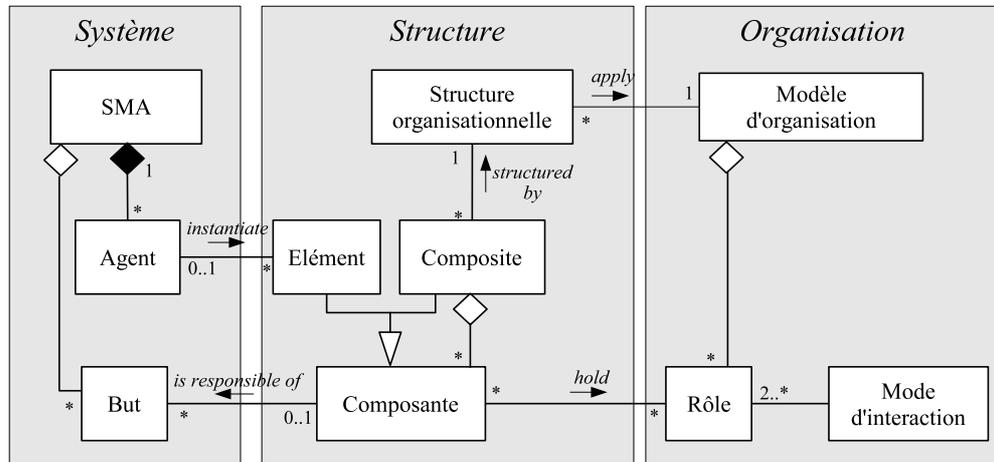


FIGURE 2.4 – Synthèse du modèle organisationnel orienté composante [Grislin–Le Strugeon, 2007]

Un *rôle* définit un comportement vis-à-vis des autres rôles. Dans notre modèle d'organisation, un rôle est caractérisé par le type de buts dont il endosse la responsabilité et par ses interactions avec les membres de l'organisation. Nous avons distingué buts individuels et sociaux. La responsabilité d'un but social consiste à effectuer un ensemble d'actions managériales, permettant de contrôler, superviser, et/ou coordonner les actions du groupe. Puisqu'un rôle est défini dans le cadre d'un modèle d'organisation, le lien rôle-compétences est défini également à un niveau abstrait. Ainsi, la définition d'un rôle ne précise pas les compétences nécessaires pour prendre ce rôle dans le cadre d'un domaine précis d'application, mais le "type de compétences" qu'il requiert, par exemple en distinguant les compétences qui sont de type managérial. Dans notre modèle, les rôles sont joués par les composantes de la structure. Par exemple, le rôle de "recherche d'information sur Internet" peut être joué par un ensemble d'agents agissant en parallèle mais de manière concertée, le résultat étant fourni par le groupe (ou son représentant) et non de façon distincte par chacun d'eux. Le rôle est ici lié aux buts dans le cadre d'un modèle d'organisation, à la différence du méta-modèle AGR [Ferber *et al.*, 2004] dans lequel, le rôle étant fondamentalement lié à la position d'un agent au sein d'un groupe, un lien direct existe entre agents et rôles.

Un *mode d'interaction* décrit les échanges entre deux rôles ou plus, d'un même modèle d'organisation. Les modes d'interaction peuvent être définis de façon générique. En particulier, il est possible de prévoir un ensemble de protocoles indépendants de l'application. De même que pour les rôles, nous supposons qu'il existe des modes d'interaction communs à différents modèles organisationnels.

Une *composante organisationnelle* est une partie de l'organisation, dans laquelle elle tient un rôle. Une composante peut être une entité élémentaire (notée *Element*) ou être lui-même formé de composantes (*Composite*). Les composantes élémentaires

sont associées chacune à un unique agent ; les composites correspondent à des groupes d'agents. Toute composante m est définie par son type, son rôle dans l'organisation et ses buts. Une composante de type composite est définie en outre par le modèle d'organisation qu'il applique, l'ensemble de ses propre composantes et leurs rôles :

$$m = \langle type, r, \mathcal{B}_m, s \rangle$$

où :

$$type = \langle Element | Composite \rangle$$

r : rôle de m

\mathcal{B}_m : ensemble des buts de m

s : structure organisationnelle de m

A noter que, lorsque $type(m) = Element$, la définition se limite à ses trois premiers éléments car $compose(m) = \emptyset$ et $\omega_m = \emptyset$. A contrario, lorsque $type(m) = Composite$, il est alors possible de définir la *structure de la composante organisationnelle* par :

$$s(m) = \langle \omega_m, compose, hold \rangle$$

où :

ω_m : modèle d'organisation de m

$compose$: relation définissant les composantes de m

$hold$: relation entre les composantes de m et les rôles de ω_m ,
chaque composante jouant un rôle :

$$\forall m_i \in compose(m), \exists r_j \in \mathcal{R}_{\omega_m}, hold(m_i) = r_j$$

La notion de composante a été introduite pour distinguer la mise en application d'un rôle (niveau modèle) dans le cadre d'une structure organisationnelle, de l'agent ou du groupe d'agents qui prend ce rôle. Elle traduit le fait qu'un agent ou un groupe d'agents doit jouer un certain rôle dans la structure organisationnelle, sans préciser quel est ce ou quels sont ces agents. Ceci permet, par exemple, de décrire un état organisationnel à atteindre par le SMA, avant que cet état soit effectif. En ce sens, la notion de composante organisationnelle correspond en partie à la notion de *position* existant dans le méta-modèle de [Odell *et al.*, 2004]. Selon une approche similaire, les composantes organisationnelles de notre modèle sont des entités en situation intermédiaire entre agents et rôles, cependant nous considérons qu'un ensemble d'agents peut également prendre un rôle. Le lien composante-rôle se distingue donc de l'association *Agent-Agent Role Assignment* du méta-modèle de [Odell *et al.*, 2004]. De plus, ceci diffère de l'idée qu'un agent joue un rôle au sein d'un groupe (le groupe étant le contexte d'expression du rôle), représentée par le lien *Groupe-Agent Role Assignment* du méta-modèle.

Enfin, et sur la base de cette description, il est possible de modéliser l'organisation d'un SMA par l'association entre composantes et agents.

L'état organisationnel, à l'instant t , d'un ensemble d'agents \mathcal{A} ayant à réaliser les buts \mathcal{B} est noté :

$$\sigma_t(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \langle \mathcal{M}, \textit{instantiate}, \textit{responsible} \rangle$$

avec :

\mathcal{M} : un ensemble de composantes

instantiate : relation entre les agents de \mathcal{A} et les éléments de \mathcal{M} :

$$\forall m \in \mathcal{M}, \exists \mathcal{A}_i \subseteq \mathcal{A} : \textit{instantiate}(\mathcal{A}_i, m)$$

responsible : relation entre les buts de \mathcal{B} et les composantes de \mathcal{M} :

$$\forall m \in \mathcal{M}, \exists \mathcal{B}_i \subseteq \mathcal{B} : \textit{responsible}(\mathcal{B}_i, m)$$

L'objectif de la première modélisation était de représenter différentes modes de coordination entre agents, dans un cadre toutefois relativement rigide. La seconde modélisation, basée sur les réseaux de Petri, était destinée à la simulation, dans le but de fournir des données expérimentales quant aux performances de différentes formes d'organisation en fonction des circonstances. La troisième modélisation doit servir de base à la modélisation de la dynamique organisationnelle multi-agents.

Ces travaux font l'objet d'une publication à paraître [Grislin–Le Strugeon, 2007].

Cette représentation statique est utilisée en partie suivante afin de décrire nos travaux concernant l'adaptation de la structure organisationnelle des SMA.

2.3 Contribution aux modèles et méthodes d'adaptation organisationnelle

Les modèles précédents rendent compte de l'état du système à un instant donné. Mais nous nous plaçons dans le cadre d'un système ouvert - des agents y entrent et en partent, se modifient - placé dans un environnement dynamique - les contraintes extérieures changent. Or, l'objectif est de rendre le SMA adaptatif, c'est-à-dire capable de s'adapter afin de conserver certaines propriétés, comme la fiabilité ou la robustesse par exemple.

Si l'on souhaite doter le système de la capacité de se réorganiser, un ensemble de questions fondamentales doivent trouver une réponse, concernant :

- la détection du besoin de réorganisation : quels sont les critères déterminant la nécessité d'une réorganisation ? Qui ou quel(s) agent(s) va (vont) décider d'une action de réorganisation ?
- la décision de réorganisation : en quoi le système doit-il s'adapter ? Quels sont les éléments ou fonctions sur lesquels vont s'appliquer les actions de réorganisation ?
- l'action de réorganisation : comment, avec quelle méthode, la réorganisation va-t-elle être appliquée ?

2.3.1 Détection

Les raisons susceptibles de mener le SMA à s'adapter proviennent généralement des modifications affectant son environnement, créant de nouveaux buts ou modifiant les contraintes qu'il exerce sur celui-ci. Dans le cas d'un système ouvert, les agents eux-mêmes peuvent être la cause de la réorganisation. Un système distribué sur le réseau peut par exemple évoluer par l'ajout d'un agent (une connexion), la défaillance ou la suppression d'un agent (déconnexion).

Les conséquences en sont perceptibles par les agents de façon interne au système, au niveau individuel ou collectif. Les individus détectent le besoin d'adaptation en raison d'une surcharge de travail ou d'un défaut d'efficacité [Gasser et Ishida, 1991] par exemple, par l'échec dans l'atteinte des buts individuels [Dignum *et al.*, 2004], ou encore en raison de la détection de situations de non coopération [Capera *et al.*, 2003]. Concernant le groupe, il s'agit d'utilité totale du système dans [Dignum *et al.*, 2005a] ou d'une performance sous-optimale dans [Matson et DeLoach, 2005].

L'évaluation de l'utilité du SMA peut être conçue en tant que compétence spécifique, possédée par certains agents ou la totalité d'entre eux.

2.3.2 Décision

[Dignum *et al.*, 2005a] distinguent le changement comportemental du changement structurel : dans le premier, la structure organisationnelle est conservée mais le comportement des agents change, tandis que dans le second, ce sont des éléments structurels (rôles, normes, etc.) qui sont modifiés. [Mathieu *et al.*, 2002] évoquent une évolution de la structure des accointances et de la distribution des compétences.

Typologie. Sur la base du modèle statique d'organisation multi-agent présenté précédemment (fig. 2.4, p. 47), la réorganisation peut être vue en tant que modification des parties de ce modèle ou des relations entre elles. Ceci nous a amené à proposer une typologie des modifications organisationnelles :

1. les *modifications compositionnelles* qui affectent la répartition des ressources (agents ou compétences) en regard des buts visés. Les modifications portent alors sur les relations composante-agent (*instantiate*) ou but-composante (*responsible*). Des modifications de la ressource *agents* sont par exemple proposées par [Decker et Sycara, 1997] ou par la méthode OSD (Organization Self-Design) décrite dans [Ishida *et al.*, 1992] : les ajouts d'agents rendent possible la division des tâches parmi eux, l'agrégation de buts étant obtenue par retraits d'agents. Un mécanisme similaire mais appliqué aux tâches est proposé dans [Shin et Leone, 1990], avec amplification ou agrégation de tâches. La stratégie de réorganisation décrite dans [DeLoach *et al.*, 2007] repose sur la ré-affectation d'agents en fonction de leur capacité à réaliser les buts, en évaluant différentes combinaisons agent-rôle-but.
2. les *modifications structurelles* qui affectent la structure organisationnelle en changeant des liens entre la structure et le modèle d'organisation ou entre une composante et son rôle. Les compositions/décompositions de groupes, par exemple par émergence sur la base d'une évaluation de la coopération entre agents [Ca-

pera *et al.*, 2003], rentrent dans ce cadre. La création, par les agents, de liens d'acointances correspondant aux liens de dépendance qui sont apparus dans le système [Mathieu *et al.*, 2002], peut être vue comme la constitution de nouvelles structures qui se superposent à l'organisation existante. Plusieurs travaux actuels traitent des changements de rôles : agents qui prennent ou quittent un rôle (voir par exemple [Hannoun *et al.*, 2000] ou [Pacheco et Carmo, 2003]), ou font évoluer les rôles [Weyns *et al.*, 2004]. Les changements complets de structure sont peu développés car plus coûteux [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994a].

La modification d'un lien composante-composite consiste à changer la composition d'un certain regroupement d'entités organisationnelles. Il peut donc s'agir soit d'une nouvelle répartition des ressources vis-à-vis des buts (modification structurelle), soit d'une nouvelle structure (modification compositionnelle).

Modélisation. Nous décrivons les changements opérés lors des réorganisations sur la base du modèle statique proposé précédemment et sur la formalisation des transitions dans les organisations d'agents proposée dans [Matson et DeLoach, 2005]. Dans les travaux de [Matson et DeLoach, 2005], la réorganisation d'un groupe consiste en un changement d'état de son organisation. La fonction de transition entre états est de la forme $\delta(O, \phi, s_n) \rightarrow S'$, où O est l'organisation, ϕ est une propriété de transition, s_n est l'état courant de l'organisation, et S' est l'ensemble des états atteignables à partir de s_n par ϕ . Nous avons précisé ce formalisme afin de modéliser les différentes formes de réorganisation possibles. La représentation temporelle utilisée est une simple discrétisation : un changement organisationnel est une transition menant d'un état organisationnel défini à un instant t à un état défini à un instant $t + \Delta t$ suivant. L'état σ_n défini relativement à l'instant n ($n \in \mathbb{N}$) sera ainsi supposé précéder l'état σ_{n+1} .

Soit un ensemble d'agents \mathcal{A} ayant à réaliser les buts de \mathcal{B} . Les transitions entre états sont décrites sous la forme :

$$\delta(\phi, \sigma_n(\mathcal{A}, \mathcal{B})) \vdash \sigma_{n+1}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$$

où les propriétés de transition ϕ sont les conditions de déclenchement des actions de réorganisation. Elles correspondent ainsi aux situations susceptibles de mener à un changement d'état organisationnel du système, telles que celles évoquées au point 2.3.1.

Modifications compositionnelles

Dans le cas d'une *modification compositionnelle*, le modèle organisationnel ω_0 est inchangé, la structure s_0 également. Deux types de transition sont possibles :

- la modification d'un lien agent-élément consiste à faire un nouveau “casting” vis-à-vis des compétences recherchées pour effectuer les actions attendues de la part d'un élément de l'organisation. Il s'agit d'une réaffectation d'un agent dans la structure en modifiant la fonction *stantiate*. La conséquence est un regroupement différent des agents. Les *transitions d'instanciation* portent sur le produit cartésien $\mathcal{A} \times E$, \mathcal{A} étant l'ensemble d'agents et E l'ensemble des composantes de type *Element* de la structure, par la relation *stantiate*.

- la modification d'un lien composante-but consiste à changer l'allocation de tâches parmi les composantes de l'organisation. Ce changement correspond à une modification de la fonction *responsible* et affecte consécutivement la répartition des tâches parmi les agents. Les *transitions de responsabilité* porte sur le produit cartésien $\mathcal{B} \times \mathcal{M}$, \mathcal{B} étant l'ensemble des buts et \mathcal{M} l'ensemble des composantes de la structure, par la relation *responsible*.

En conséquence, même en considérant qu'un agent peut instancier plusieurs *Element* et qu'une composante peut prendre en charge plus d'un but, les états atteignables à partir de l'état actuel de \mathcal{A} constituent un ensemble fini dans le cadre de telles réorganisations.

Dans ce cadre, les agents sont considérés en tant que ressources du système. Les possibilités de réorganisation dépendent des caractéristiques de ces ressources. En particulier, il peut être intéressant de remarquer que les réorganisations ci-dessus seraient impossibles sans la multi-compétence et/ou la redondance de compétences d'une partie au moins des agents. Une autre façon de gérer ces ressources consiste à les faire évoluer, par l'acquisition dynamique de compétences par exemple [Mathieu *et al.*, 2002].

Modifications Structurelles

Les modifications structurelles correspondent à des changements de structure ou à des changements de modèles.

Dans les *changements de structure*, le modèle organisationnel reste identique mais son application change. Le changement de structure d'un composite correspond soit à une modification de son ensemble des composantes (modification de la fonction *compose*), soit à un changement dans la répartition des rôles parmi les composantes (modification de la fonction *hold*).

Une modification de l'ensemble des composantes \mathcal{M} consiste à y ajouter ou enlever une composante. Par exemple, un agent rejoint un groupe : décrit de manière organisationnelle, ceci est modélisé par l'ajout d'une composante (de type *Element*) à un composite m en modifiant *compose(m)*. Cette action ne remet pas en cause fondamentalement l'organisation, il s'agit d'une adaptation de sa structure. De même, la modification d'un lien composante-rôle par adaptation de la fonction *hold* a des conséquences quantitatives sur la structure car la quantité de composantes jouant chacun des rôles est modifiée.

Ces principes sont appliqués par les méthodes d'organisation qui dupliquent des agents en fonction des besoins (voir par exemple [Mathieu *et al.*, 2002]). Ces agents sont rattachés à la structure sans en modifier le modèle organisationnel : l'ajout d'un agent permet de répartir différemment les rôles dans le groupe sans changer d'organisation pour autant. D'autres travaux se basent sur une évaluation du niveau de criticité des ressources-agents, afin de proposer des systèmes tolérants aux pannes par une stratégie de réplication des agents critiques [Faci *et al.*, 2006]. Ces modifications affectent la façon dont le modèle est appliqué. La structure s'en trouve modifiée, les composantes ont changé ainsi que les relations les liant aux autres parties du modèle. On définit

ainsi les *transitions structurelles*, comme étant des changements affectant les relations de composition des composantes organisationnelles et leurs relations avec les rôles. Le nouvel état organisationnel se différencie du précédent par la structure de l'organisation tout en restant dans l'espace défini par le modèle ω de $s(m)$.

L'ensemble S , qui représente les structures possibles à partir d'un modèle organisationnel donné, est de taille infinie. En effet, toute structure s de S s'exprime en fonction de *compose*, or la cardinalité de l'ensemble image de m par cette relation n'est pas limitée : il est possible de multiplier les regroupements si on considère qu'un agent peut appartenir à plusieurs groupes. De plus, la fonction *hold* n'offre pas de limitation non plus, car le nombre d'instances d'un rôle de ω n'est pas déterminé.

Dans ce cas, comment restreindre l'exploration du domaine lors d'une décision de réorganisation de ce type? Une idée est d'appliquer le principe du changement minimal : toute modification ayant un coût, les structures explorées en priorité seront celles qui sont les plus proches de la structure existante.

Dans les *changements de modèle*, le lien structure-modèle est modifié. Ce changement est qualitatif : ce type de réorganisation affecte le modèle organisationnel sur lequel est construite la structure d'un composite. La réorganisation modifie donc les fondements des interactions et les rôles d'une partie du SMA. L'adaptation peut consister à changer de modèle organisationnel (voir [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994a]), ou à changer le modèle lui-même, par la modification d'un rôle du modèle par exemple (voir [Weyns *et al.*, 2004], [Adam et Mandiau, 2005b]).

On définit la *transition organisationnelle*, par un déplacement dans le domaine de valeurs donné par l'ensemble des modèles organisationnels Ω . Ainsi le changement d'état consiste en la donnée d'une nouvelle structure pour le composite m , cette structure étant basée sur un modèle organisationnel différent du précédent.

Ces formes de réorganisation par changement de modèle d'organisation sont délicates à réaliser sans arrêter le système, car il faut gérer la transition affectant les rôles et les liens entre les acteurs de ces rôles.

Ce travail représente une partie de la publication à paraître [Grislin–Le Strugeon, 2007].

2.3.3 Action

La réalisation de la réorganisation dépend du caractère individuel ou collectif de la décision. Dans le cas d'une décision individuelle, l'agent doit imposer la réorganisation choisie, il doit donc posséder un rôle (méta-organisationnel) lui conférant l'autorité nécessaire à cette action. Dans le cas d'une décision collective, les agents décideurs appliquent d'un commun accord les modifications à leur organisation. Des variations autour de ces deux méthodes existent bien évidemment, voir par exemple les quatre stratégies proposées dans [Dignum *et al.*, 2005a].

Quant à la mise en oeuvre de méthodes d'adaptation organisationnelle, nous avons traité principalement des modifications du type 2, qui affectent la structure organisationnelle. Les sections suivantes présentent ces travaux. La première approche, destinée à rendre le système adaptatif relativement à la tâche qui lui est confiée, impose une structure organisationnelle spécifique aux agents. La seconde approche, destinée à rendre le système adaptatif afin de gérer ses besoins en termes de ressources, crée des variations dans l'application qui est faite d'un modèle organisationnel fixé.

Ces travaux (plus ou moins anciens) seront présentés à l'aide du formalisme (récent) présenté ci-dessus.

2.3.4 Adaptation par changement de modèle organisationnel

La première contribution aux méthodes d'adaptation organisationnelle est celle proposée dans ma thèse et reposant sur la modélisation orientée structure évoquée en partie 2.2.1. Le contexte du domaine de recherche au moment de ces travaux voyait encore la dichotomie entre les agents réactifs et les agents cognitifs. L'objectif de ces travaux était alors de rendre les agents cognitifs plus "réactifs" en leur donnant la possibilité de modifier leur organisation. Dans ce but, un agent, pas toujours le même, déclenche l'adaptation du système. Il peut donc être considéré comme un organisateur interne, ni fixe, ni central, mais son existence suffit à placer cette approche dans la catégorie de l'auto-organisation faible.

La décision est le fait d'un agent (mais pas toujours le même), selon des *critères de niveau social* considérant l'efficacité d'une organisation relativement à la tâche qui incombe au SMA. L'objet d'adaptation est le *modèle d'organisation*, sachant que le nombre d'agents est fixe, ainsi que l'application de chaque modèle.

Détection du besoin de réorganisation

Nous sommes partis du fait, largement admis (voir par exemple [Carley et Gasser, 1999]), selon lequel il n'existe pas de structure organisationnelle idéale de manière absolue, c'est-à-dire dont les performances serait les meilleures en toute circonstance. L'idée directrice est donc plutôt de parvenir à déterminer quelle serait la ou les organisations performantes vis-à-vis de circonstances données.

A chaque demande de réalisation de tâche, l'adéquation de la structure organisationnelle actuelle vis-à-vis de la réalisation de la nouvelle tâche est évaluée. Une inadéquation entraîne la réorganisation du SMA. Tout agent est susceptible de recevoir une demande de réalisation de tâche. Chacun d'eux dispose donc des connaissances et de la compétence décisionnelle nécessaire pour évaluer et choisir l'organisation adéquate pour le groupe.

Décision de réorganisation

La décision de réorganisation est donc basée sur des critères relatifs à la tâche globale, collective, à réaliser par SMA. Sur la base du plan de réalisation de cette tâche, structuré selon la définition de [Chandrasekaran et Johnson, 1993] en tant qu' "*arbre*

de tâches, méthodes et sous-tâches appliquées récursivement jusqu'à ce que les tâches atteintes soient en un certain sens réalisables directement en utilisant les connaissances disponibles", trois caractéristiques correspondant aux exigences de la tâche en termes de connaissance (K), d'action (A) et de coordination (R) sont évaluées. A partir des valeurs obtenues selon ces trois critères, la tâche est classée selon une catégorie parmi les huit possibilités correspondant aux combinaisons de valeurs 0/1 sur les trois dimensions K, A et R.

Par ailleurs, quatre modèles d'organisation ont été définis (hiérarchie, communauté, marché et société) sur la base des travaux de [Fox, 1981] et [Gasser, 1992]. Ces structures constituent les éléments d'une bibliothèque dans laquelle les agents peuvent venir choisir une organisation adaptée à la situation rencontrée. Une étude des caractéristiques de ces structures a permis de déterminer leur adéquation aux différentes catégories de tâche. En résumé :

- la hiérarchie (ω_h) est l'organisation qui supporte le mieux les situations exigeant une coordination importante (critère R élevé). Les contraintes imposées par les liens d'autorité entraînent une concentration des efforts opérationnels sur un petit nombre de composants. La hiérarchie convient donc uniquement pour les situations dans lesquelles le critère d'action A est faible.
- la communauté (ω_c) autorise une distribution importante des tâches parmi les agents, ce qui permet d'effectuer efficacement de nombreuses actions (A élevé). La coordination est plus difficile à obtenir que dans une hiérarchie (R faible). Quant aux connaissances, nous n'avons pas de résultat nous permettant de statuer sur les aptitudes de ce type d'organisation. En effet, il semble que deux aspects contradictoires coexistent. D'une part, les communications paraissent y être peu efficaces en raison du manque de structure (échanges assez aléatoires, non ciblés). D'autre part, la diffusion des connaissances y est *a priori* plus aisée en raison de la densité du réseau communicationnel, permettant de mettre en contact des agents qui ne l'auraient pas été dans une autre organisation. En raison de cette incertitude à propos du critère de connaissance, l'organisation en communauté est utilisée uniquement dans les cas où le critère de communication K est faible.
- le marché (ω_m) favorise la sélectivité des communications et donc l'échange d'informations (K élevé). Il est recommandé lorsque de nombreuses actions doivent être réalisées (A élevé). La coordination y est assez mauvaise (R faible).
- la société (ω_s) a les mêmes caractéristiques que la communauté, avec une meilleure aptitude pour la coordination et l'utilisation des connaissances, grâce à l'usage qui y est fait de règles spécifiques épargnant de nombreuses communications préalables. Elle convient donc lorsque la tâche réunit les conditions d'exigences les plus importantes (K, A et R élevés)

Relativement à la modélisation des SMA exposée précédemment (2.2), l'adaptation du système porte sur l'association entre le SMA et un modèle organisationnel : le SMA est capable de se doter d'une organisation adaptée à la tâche qu'il a à réaliser. Chacun des agents du système possède en effet les compétences et les connaissances lui permettant : (i) de caractériser la tâche courante selon les critères (K, A, R) définis ci-dessus,

et (ii) de sélectionner l'organisation adéquate parmi celles qui sont définies pour ce SMA.

La dynamique du système peut être ici décrite en utilisant un automate à états finis déterministe et à transition infinie (absence d'état final). Ces travaux ayant été réalisés dans le cadre du modèle présenté en 2.2.1, le modèle organisationnel et la structure organisationnelle sont confondus, ce qui se traduit par une seule application possible de chaque modèle :

- L'ensemble des modèles organisationnels (équivalent ici à l'ensemble des structures) est $\Omega = \{\omega_h, \omega_m, \omega_c, \omega_s\}$.
- Les propriétés de transitions ϕ sont basées sur les valeurs des triplets (k, a, r) , avec k , a et r , les valeurs binaires des caractéristiques de la tâche susceptibles de provoquer un changement d'organisation.
- La fonction de transition δ est définie ici par :

$\forall \omega \in \Omega,$

$$\begin{aligned} \delta((0, 0, 1), \omega) \vdash \omega_h, & \quad \delta((1, 0, 0), \omega) \vdash \omega_m, & \quad \delta((1, 1, 1), \omega) \vdash \omega_s \\ \delta((0, 1, 0), \omega) \vdash \omega_c, & \quad \delta((1, 0, 1), \omega) \vdash \omega_h \\ \delta((0, 1, 1), \omega) \vdash \omega_s, & \quad \delta((1, 1, 0), \omega) \vdash \omega_m \end{aligned}$$

Action de réorganisation

L'action de réorganisation consiste ensuite à propager la décision afin de provoquer la modification progressive des relations entre les *composantes* du système. Trois méthodes permettant d'effectuer la transition entre structures organisationnelles ont été proposées : la méthode du *tout ou rien* (destruction complète des anciens liens et rôles avant reconstruction), la méthode *économique* (modification de ce qui est nécessaire uniquement) et la méthode *itérative* (propagation de la réorganisation de proche en proche).

Application

La méthode de réorganisation proposée a été appliquée à un "cas d'école", dans le domaine des robots fourrageurs; elle utilise la méthode itérative, évoquée précédemment, pour propager les modifications affectant l'organisation. Ceci a permis de montrer sa faisabilité.

Ce travail a été publié dans le cadre de ma thèse [Grislin–Le Strugeon, 1995], et dans [Grislin–Le Strugeon et Mandiau, 1994], [Grislin–Le Strugeon et al., 1994b], [Grislin–Le Strugeon et al., 1994a] et [Grislin–Le Strugeon et al., 1996a].

Cette méthode était originale en 1995 car elle permettait d'apporter une forme de dynamicité organisationnelle alors généralement absente parmi les SMA composés d'agents cognitifs.

- Cependant, un ensemble de points d'amélioration sont à noter, dont les suivants :
- il faudrait évaluer le coût des réorganisations car une réorganisation intempestive peut être plus coûteuse que le gain qu'elle occasionne ;

- la propagation de la réorganisation dans le système est difficile à mettre en place car elle est basée sur les accointances ; elle peut générer un important volume de messages redondants ;
- les caractéristiques selon lesquelles sont évaluées les tâches sont certes fondées mais peuvent certainement être améliorées ou enrichies (méthode d'évaluation, domaine de valeurs, etc.) ;
- l'adéquation d'une forme d'organisation vis-à-vis d'un type de tâche est basée sur la littérature. Bien qu'ayant fait l'objet d'une étude complémentaire basée sur une évaluation expérimentale (Cf. partie 2.2.2), ce point mériterait de plus amples investigations.
- une bibliothèque de structures conçue ainsi ne permet pas d'ouverture du système, à savoir que l'ajout d'un agent au SMA impose de mettre à jour la bibliothèque afin de définir le rôle de cet agent dans chacune des structures.
- telle quelle, l'approche est peu robuste car la défaillance d'un agent n'est pas gérée. De même que ci-dessus, un événement de ce type impose une mise à jour de la bibliothèque de structures organisationnelles.

Afin de rendre la structure plus flexible, à savoir plus à même de s'adapter aux imprévus, en réponse à certains des inconvénients de cette première approche, il est possible de se baser sur les *modèles* d'organisations plutôt que sur des structures pré-établies. C'est l'hypothèse fondamentale qui sous-tend les travaux présentés en partie suivante.

2.3.5 Adaptation des composantes organisationnelles

L'adaptation organisationnelle selon cette approche, consiste à faire varier les composantes de la structure selon un modèle ω fixé. Elle consiste en la mise en place de regroupements temporaires entre agents en fonction de nouveaux besoins. La décision est le fait d'*un* agent (mais pas toujours le même), selon des *critères locaux* considérant la capacité d'un groupe à achever sa tâche. L'objet d'adaptation est la *structure organisationnelle*, sachant que le modèle d'organisation est fixe.

Détection du besoin de réorganisation

L'état initial du système est formé par n composantes, chacune formant un ensemble homogène par le regroupement d'agents aux compétences identiques. Pour cette raison, nous appellerons ces composantes organisationnelles des *pools* de spécialistes. Les modes d'interaction entre *pools*, ou entre une composante d'un *pool* (*poolMember*) et un *pool*, sont basés sur des modèles de type *marché* avec des variantes d'appels d'offres donnant lieu à contractualisation.

$$\omega_{pools} = \langle \{pool, poolMember\}, interaction_{marché} \rangle$$

Les agents d'au moins l'un de ces pools possèdent les compétences leur permettant d'interagir avec l'environnement du système. Nous supposons que les tâches (ou buts)

parviennent au SMA par interaction avec l'un des agents de ce pool. Si cet agent n'est pas capable d'atteindre à lui seul le but assigné, il démarre une opération de regroupement. La détection d'un besoin de réorganisation se concrétise ainsi, dans cette approche, par un besoin de regroupement qui est le fait d'un agent, dans le but de réaliser une tâche qu'il est incapable de mener à bien de façon isolée.

Décision de réorganisation

Comparativement au processus décisionnel décrit en partie 2.3.4, la décision s'effectue donc au niveau individuel et local de l'agent. Il n'y a pas de choix d'un modèle organisationnel, car celui-ci est fixé. En effet, l'appel à d'autres agents est prévu et fait partie intégrante du processus de réalisation de tâche de l'agent. Chaque agent, composante du système, connaît les rôles des composantes avec lesquelles il doit échanger des données. Cependant, aucun d'eux n'a la connaissance ni le contrôle du processus en sa totalité et la notion d'organisation n'est pas explicitement représentée dans les connaissances des agents. Or, un observateur du système pourrait reconnaître la formation de composantes incluant plusieurs agents entre lesquels existent des liens supports d'échanges pendant une période donnée. En ce sens, la structure évolue dynamiquement et émerge des interactions des agents.

Plus précisément, le système comprend donc, en plus des *pools* évoqués ci-dessus, un ensemble variable de composantes ayant des structures basées sur un modèle d'organisation en *flux de travail*. Chaque tâche t_i déclenche la constitution d'un groupe d'agents, formant une composante m_i dont la structure est basée sur ω_{flux} . Le modèle d'organisation ω_{flux} peut être décrit très simplement par la donnée de deux rôles, le premier correspondant à l'entité qui fournit le résultat de son activité, qui est repris par le second en vue de la poursuite d'un processus de réalisation plus global. Cette seconde entité prendra ensuite le rôle de "l'émetteur" de résultat vis-à-vis d'un autre intervenant si nécessaire³.

$$\omega_{flux} = \langle \{r_e, r_r\}, interaction_{transmission} \rangle$$

Un agent étant susceptible de participer à plusieurs composantes simultanément, les *pools* initiaux servent de réserves de ressources, auxquelles les agents s'adressent afin de constituer des composantes par flux de travail comprenant les compétences nécessaires.

Action de réorganisation

L'action de réorganisation est donc le résultat d'interactions entre agents. La décision d'un agent de déléguer une partie de la tâche à réaliser à un autre agent modifie la structure organisationnelle du SMA, car les composantes varient selon les regroupements en cours.

3. Notons que sur la base de ce modèle, il est également possible de construire des structures comprenant une composante centralisatrice, qui joue le rôle de "récepteur" des résultats produits par plusieurs autres composantes.

La façon dont les agents s'organisent est fixe : le modèle ω est un modèle de type *marché* comportant des rôles définis et des protocoles définissant les interactions entre certains couples de rôles. Des regroupements se forment en fonction des liens qui se créent entre les agents à l'occasion de la réalisation d'un objectif commun. Les agents appartiennent, initialement et de façon persistante, à des composantes qui sont des regroupements par compétences (des *pools* d'agents). A cette structure organisationnelle de base se superposent ensuite des regroupements dynamiques selon les liens établis. A un instant donné, la structure s du système est ainsi constituée d'un ensemble de composantes qui correspondent à des regroupements par flux de travail. Ces groupes sont "dissouts" lorsque les échanges entre les agents n'ont plus lieu.

La participation simultanée des agents à un nombre variable de composantes multiplie le nombre d'états possibles du système. L'état global du système à un instant t peut être décrit en spécifiant l'ensemble \mathcal{M} de ses composantes :

$$\mathcal{M} = \{m_{pool_1}, \dots, m_{pool_p}, m_{flux_1}, \dots, m_{flux_q}\}$$

où les m_{pool_i} sont les composantes (persistantes) de structure *pool* et les m_{flux_i} sont les composantes à structures de flux.

- Tout événement lié aux réalisations des agents crée des modifications de cet état :
- la survenue d'une nouvelle tâche amène à la création d'une composante :
 $\delta(new_g, \mathcal{M}) \vdash \mathcal{M}'$ avec $\mathcal{M}' = \mathcal{M} \cup \{m_{flux_{q+1}}\}$
 - la terminaison d'une activité peut mener à la recherche d'un agent capable de poursuivre le processus et donc à la modification d'une composante :
 $\delta(fin_a, \mathcal{M}) \vdash \mathcal{M}'$ dans lequel il existe m_{flux_i} modifié par l'ajout ou le retrait d'un agent.
 - la terminaison d'une activité peut aussi mener à la dissolution d'une composante s'il s'agissait de la fin du processus global :
 $\delta(fin_g, \mathcal{M}) \vdash \mathcal{M}'$ avec $\mathcal{M}' = \mathcal{M} - m_{flux_i}$

Application et évaluation

Cette méthode a été appliquée à un prototype de système d'information dans le domaine du transport terrestre de personnes, application réalisée dans le cadre du projet AGENPERSO (Cf. partie 4.3.3) et en collaboration avec C. Petit-Rozé ([Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006] ; voir aussi partie 4.3). Les tâches allouées au système consistent en le chaînage de différents modes de transport afin de répondre à la demande de l'utilisateur. Les solutions possibles sont classées en fonction des préférences et contraintes de l'utilisateur particulier ayant fait la demande d'information.

Les *pools* d'agents sont ici au nombre de quatre, correspondant aux quatre ensembles de compétences qui ont été considérés nécessaires à la recherche d'une solution de transport personnalisée et intégrant plusieurs modes de transport : l'interaction avec l'utilisateur, la recherche de données transport, la gestion des profils d'utilisateurs et la coordination, incluant l'intégration des données pour la production d'une solution adaptée.

Dans notre cadre applicatif, la sélection d'un agent en vue de rejoindre le groupe, donne la priorité à ceux qui ont déjà réalisé des tâches similaires. Ceci permet d'accélérer le processus de résolution de problème. Une autre conséquence est l'évolution du système vers une spécialisation des connaissances des agents, leur apprentissage se basant sur une partie seulement de l'espace des solutions. Dans certains cas, le système peut ainsi évoluer vers un découpage de cette composante en sous-composantes spécialisées.

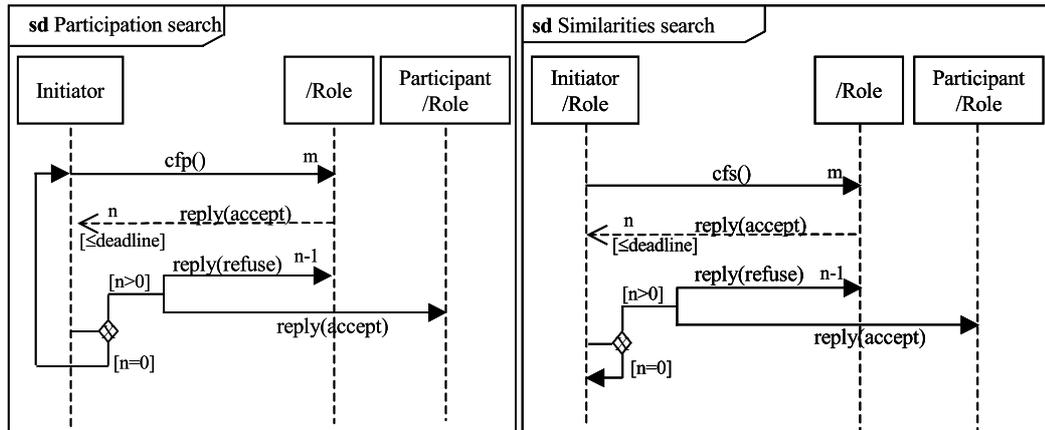


FIGURE 2.5 – Protocoles principaux régissant les interactions au sein de MAPIS [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006]

Des protocoles spécifiques ont été définis, sur la base du contract-net itéré tel qu'il a été standardisé par la FIPA [FIPA : Foundation for Intelligent Physical Agents, 2002]. La figure 2.5 illustre les deux principaux protocoles utilisés : le premier (*call for participation*) effectue la recherche nécessaire à la délégation d'une tâche, et le second (*call for similarities*) permet la recherche de similarités entre la tâche courante et des tâches résolues précédemment. Ces protocoles permettent aux agents de créer des liens temporaires selon les compétences recherchées et les disponibilités des uns et des autres.

Il manque une évaluation plus conséquente du système réalisé, et plus particulièrement des essais sur une échelle plus grande (en nombre d'utilisateurs et de requêtes simultanées). En effet, le processus instauré génère un volume important de messages d'une part, et comporte une forme de centralisation des informations d'autre part.

Enfin, il existe un risque de blocage circulaire dû aux appels bilatéraux. Par exemple, un assistant utilisateur peut demander un coordinateur dans le pool correspondant, dans lequel tous les agents sont indisponibles, certains étant bloqués faute d'agent assistant disponible. Toutefois, il est possible de régler ce problème dans un certain nombre de cas en donnant la priorité aux résolutions en cours relativement aux nouvelles demandes. Une autre solution consiste à donner aux agents la capacité de se dupliquer si nécessaire.

Ce travail a été publié dans le cadre de la thèse de C. Petit-Rozé [Petit-Roze et Grislin–Le Strugeon, 2005], et dans la partie modélisation SMA de [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006]

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté nos travaux dans le domaine de l'adaptation organisationnelle au sein d'un système multi-agents. Ceux-ci ont été distingués selon qu'ils traitaient de l'aspect statique des organisations ou de leur dynamique.

Concernant la modélisation statique des organisations multi-agents, trois modèles ont été successivement présentés. Ils correspondent à des objectifs différents, à savoir : la constitution d'une bibliothèque de modèles organisationnels, la simulation de différents types de regroupements d'agents, et la représentation des éléments nécessaires à la description de la dynamique organisationnelle d'un SMA.

Concernant la modélisation dynamique, notre modèle actuel a servi de base à la description d'une typologie des modifications organisationnelles. Dans le cadre de celle-ci, deux méthodes d'adaptation ont été présentées : par changement de modèle organisationnel, et par adaptation des composantes organisationnelles.

Cette dernière méthode plus particulièrement, a fait l'objet d'une application dans le cadre d'un système multi-agents traitant des informations à destination d'utilisateurs des transports.

La thématique des organisations multi-agents a fourni le cadre au co-encadrement d'une thèse.

Chapitre 3

Sélection d'action et adaptation individuelle

Cette partie développe les travaux réalisés dans le domaine de l'adaptation comportementale, individuelle, des agents.

3.1 Introduction

La problématique adaptative existant au niveau de l'organisation d'agents est présente également au niveau de l'agent lui-même. Dans le cadre de l'étude d'agents autonomes possédant des buts individuels, l'adaptation de l'agent à la situation présente consiste à effectuer des actions lui permettant de se rapprocher de son but. La difficulté réside, pour l'agent, à choisir quelle est l'action la plus pertinente face à une situation donnée. Cette problématique bien connue de la *sélection d'action* [Maes, 1989], est une des problématiques majeures des agents autonomes. Elle concerne la prise de décision en fonction de la perception par l'agent de la situation, et des actions effectivement réalisables.

Une classification des mécanismes de sélection a été proposée par [Tyrrell, 1993] et reprise par [Pirjanian, 2000]. Elle répartit ces mécanismes en deux classes principales, l'arbitrage de comportements et la fusion de commandes. L'*arbitrage* est caractéristique des mécanismes qui opèrent un choix parmi un ensemble d'actions, soit sur la base de priorités, soit selon l'état du système, soit par compétition. L'architecture à subsomption de [Brooks, 1986] et les réseaux d'activation de [Maes, 1989] font partie de cette catégorie. La *fusion de commandes* caractérise les mécanismes qui combinent les actions proposées, soit par le vote, soit par des méthodes floues, soit par combinaison linéaire. Les mécanismes qui "superposent" les actions telles que l'architecture Schema [Arkin, 1998] ou les Boids [Reynolds, 1999] pratiquent la fusion de commandes. Cependant, les mécanismes de vote s'intègrent mal dans cette classification. En effet, bien que prenant en compte l'ensemble des propositions, le résultat d'un tel mécanisme est le choix d'une action et non d'une combinaison d'actions. C'est pourquoi nous lui préférons une seconde classification ([Avila-Garcia *et al.*, 2003]), légèrement différente, qui considère la

politique d'arbitrage entre les actions, soit par compétition, soit par coopération. Les mécanismes utilisant la compétition suivent une approche de type *le gagnant emporte la mise* (*winner take all*), tandis que la coopération correspond aux approches basées sur le vote, auxquelles nous pourrions ajouter les approches par combinaison d'actions.

Nous nous sommes intéressés à la sélection d'action dans le cadre des modèles décisionnels à base de comportements. Ces modèles intègrent un ensemble de comportements qui sont autant de décideurs ayant leurs propres buts. Le comportement de l'agent résulte de l'interaction de ces décideurs (voir la représentation schématique en figure 3.1).

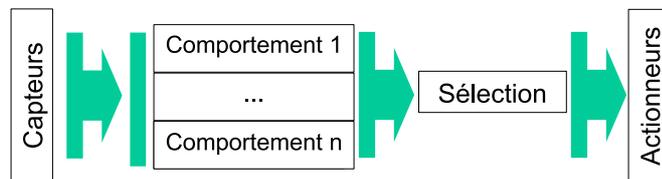


FIGURE 3.1 – Composants d'un agent selon un modèle basé comportements [Hanon, 2002]

La décomposition interne en terme de comportements plutôt que de modules fonctionnels possède l'avantage de permettre de prendre en compte plusieurs buts, éventuellement concurrentiels et liés à des stimuli environnementaux différents, tout en garantissant la rapidité de raisonnement propre aux architectures horizontales.

Chaque comportement s'apparente à un décideur d_i , qui, à un instant t , choisit la prochaine action à réaliser en fonction de ce qu'il a perçu de son environnement et de ses propres objectifs. Nous appellerons o_i l'*option*, ou alternative d'action, proposée par le décideur d_i . La sélection d'action est la fonction qui détermine l'option d'action o à réaliser en fonction des o_i . Il est important de noter que le contexte est celui d'une prise de décision réactive, avec une vue limitée, locale, de la situation. Il n'existe en aucun cas de décideur "expert" capable de prendre une décision satisfaisante pour le collectif, ni de fonction objectif globale à satisfaire.

3.2 Contribution à l'adaptation du comportement

Au niveau individuel, une forme élémentaire d'adaptation consiste, pour l'agent, en la modification de son comportement selon les circonstances. Cette capacité peut s'avérer cruciale lorsque l'environnement est à la fois de nature dynamique (évolutif) et non totalement observable. C'est le cas de certains logiciels de simulation, tels que ceux proposant des environnements de réalité virtuelle. Le peuplement de mondes virtuels d'entités artificielles est un domaine de recherche particulièrement actif, avec un domaine étendu d'applications, de la biologie aux jeux vidéos. Parmi ces entités, les animats ont été plus particulièrement étudiés, en particulier par la simulation d'animaux sociaux tels que les fourmis ou les abeilles (voir par exemple [Drogoul et Ferber,

1992]). La simulation d'humains s'avère plus difficile à mettre en oeuvre en raison de la complexité de leurs comportements.

Un exemple de situation restreinte de simulation d'humains est la gestion du comportement de piétons virtuels. Les rendre autonomes reste difficile malgré une forte activité de recherche tant nationale (Cf. par exemple [Thomas, 1999], [Devillers *et al.*, 2002]) qu'internationale (Cf. [Thalmann, 2003], [Pelechano *et al.*, 2005]). La simulation à base d'agents des piétons virtuels offre des possibilités intéressantes en termes de modularité, d'adaptation et d'autonomie. La modularité doit permettre d'intégrer autant d'individus simulés et autant de différences comportementales inter-individus que nécessaire. L'adaptation doit permettre de répondre aux exigences de réaction aux événements tels que le trafic de véhicules, le comportement des autres personnages virtuels et le comportement du joueur. Enfin, l'autonomie doit permettre d'éviter une description totalement exhaustive des situations possibles (comme lors de l'utilisation de scripts) en dotant l'agent de capacités de réaction aux situations imprévues. Cependant, il s'agit de respecter une contrainte forte qui est celle de la limitation de temps imposée par la simulation.

Dans ce cadre, l'objectif est de présenter un comportement de l'agent-piéton qui soit suffisamment réactif pour une application de réalité virtuelle, persistant (éviter des oscillations), tout en respectant les contraintes dues à l'environnement (éviter de collision, par exemple). Notre intérêt s'est porté sur les architectures orientées comportement qui présentent une alternative intéressante aux approches classiques pour ce type d'application.

Notre travail s'inscrit dans l'approche par coopération. La première voie explorée a été celle de l'extension d'un mécanisme de combinaison d'actions provenant de la robotique, avant de se tourner vers les mécanismes de vote.

3.2.1 Approche par combinaison linéaire

Une première voie a été explorée durant le DEA de D. Hanon, qui a adapté un modèle issu de la robotique appelé Architecture à Fusion d'Actions Généralisée (AFAG) [Arnaud, 2000]. C'est une architecture orientée comportements, qui unifie les trois architectures de contrôle que sont l'architecture à subsomption [Brooks, 1986], l'architecture à sélection d'actions [Maes, 1989] et l'architecture orientée schémas [Arkin, 1998].

Extension du modèle AFAG

Dans le modèle d'origine [Arnaud, 2000], un comportement est caractérisé par une activité A et un vecteur de consignes R . L'activité traduit la présence et l'importance des stimulus relatifs à ce comportement ; sa valeur varie entre 0 (comportement inactif) et 1 (comportement actif). Chaque élément du vecteur R correspond à une consigne sur les actionneurs de l'agent. Le vecteur de consignes est calculé par une arborescence de noeuds. Cette notation, permettant de décrire l'architecture du système, dérive directement de la subsomption. Quatre types de noeuds (Inhibition, Suppression,

Augmentation et Maximum) permettent de réaliser un arbitrage entre les différents comportements et de calculer le vecteur de consignes en sortie du réseau.

Nous avons proposé une version étendue de ce modèle, ayant les caractéristiques suivantes :

1. la décision à prendre s'exprime par un vecteur de commande $v = (v_1, v_2, \dots, v_p)$;
2. les entrées du réseau sont les options proposées par des comportements-décideurs, caractérisées par leur niveau d'activation a_i et une commande r_i , soit $o_i = (a_i, r_i)$;
3. les noeuds sont des fonctions f_j (*a priori* quelconques) permettant de combiner au moins deux options entrantes (a_i, r_i) ;
4. les sorties du réseau fournissent les valeurs (A_k, R_k) d'activation et de commande résultantes;
5. chaque sortie correspond à une composante du vecteur d , dont la valeur est calculée à partir de ces deux valeurs, par exemple : $v_k = A_k R_k$.

Dans ce modèle, la perception du besoin d'adaptation est propre à chaque comportement. Chacun d'eux compare le sous-ensemble de percepts qui le concerne aux valeurs de consigne qu'il possède. L'activation a_i d'une commande r_i est proportionnelle à la différence constatée entre la perception et la consigne. Ces valeurs issues des différents comportements sont injectées dans le réseau afin de calculer la commande d'action. Le comportement résultant est ainsi donné par l'ensemble des p valeurs issues de l'application aux options initiales des fonctions formées par les noeuds du réseau.

Ce modèle permet de créer à volonté divers types d'architectures orientées comportement, la sélection d'actions étant réalisée au choix par fusion, par coordination, mais également par arbitrage. En effet, deux facteurs instaurent une forme de priorité entre les comportements : les fonctions utilisées dans les noeuds avantagent les comportements qui en subsument ou inhibent d'autres ; et plus les valeurs issues d'un comportement interviennent tardivement dans la décision, plus leur poids est important relativement aux autres. Il est envisageable également de faire intervenir plusieurs fois un même comportement dans le réseau.

Les modèles proposés ont fait l'objet d'un rapport de DEA [Hanon, 2002] et de publications dans des conférences internationales [Grislin-Le Strugeon et al., 2002, Hanon et al., 2003].

Application

Nous avons appliqué ce mécanisme de sélection d'action à la commande de piétons virtuels dans le logiciel RESPECT (Route Empruntée en Sécurité par le Piéton-Enfant Confronté au Trafic) développé dans le cadre d'un projet PREDIT (Cf. partie 1.5.5 et figure 3.2). Ce projet visait à concevoir un simulateur éducatif permettant de placer l'enfant-joueur dans des situations accidentogènes engendrées par des interactions entre les piétons et les véhicules [Aubert *et al.*, 2003].

Dans ce cadre, nous avons contribué à la conception et à la réalisation de l'animation comportementale des piétons virtuels. Chacun d'eux est "pilote" par un agent.



FIGURE 3.2 – Exemple de vues issues du logiciel RESPECT

Les actions à modéliser par les agents correspondent aux commandes de mouvement à générer. Dans le contexte de ce projet, les actions sont appliquées dans un premier temps à un mobile qui correspond à la représentation des caractéristiques physiques de l'agent-piéton. Chaque agent se voit ainsi représenté par un couple formé d'un module décisionnel, que nous appellerons *l'acteur*, et de sa représentation physique, *le mobile* (figure 3.3). Les modifications effectuées sur les valeurs des attributs du mobile sont ainsi répercutées aux niveaux géométrique et graphique.

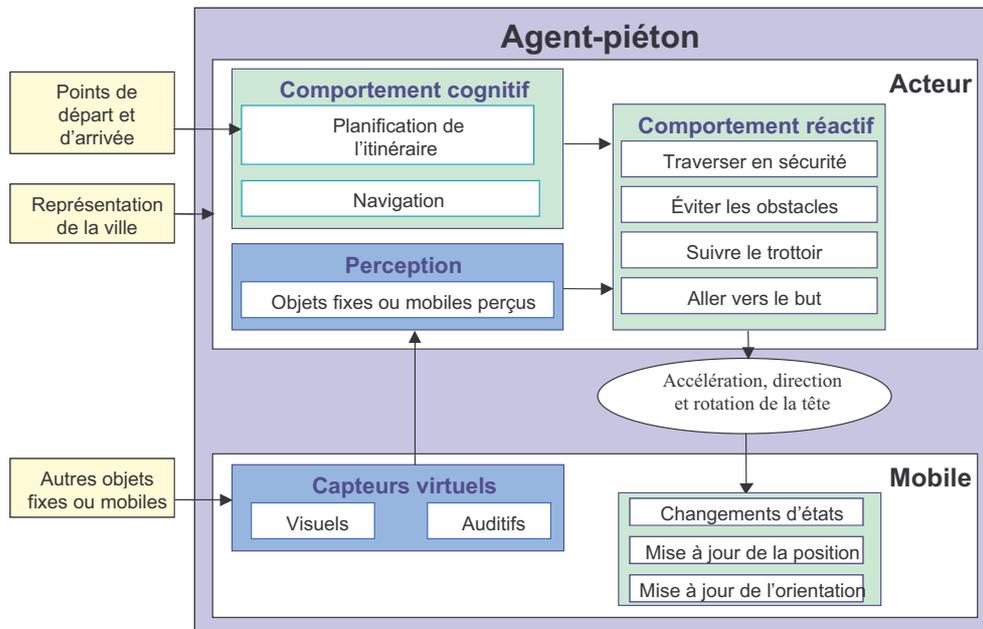


FIGURE 3.3 – Architecture de l'agent-piéton de RESPECT

Concernant la partie *acteur* du piéton, l'architecture proposée est une architecture hybride, intégrant des propriétés cognitives et réactives (Cf. figure 3.3). Le raisonnement cognitif est utilisé lors d'une phase initiale de recherche d'itinéraire, et en *navigation*, c'est-à-dire dans la décision concernant l'adoption d'un nouvel objectif (le point de passage courant étant considéré atteint, on prend le suivant dans l'itinéraire). Le raisonnement réactif est le comportement principalement actif en cours de simulation. Il permet de réagir, de manière appropriée et à chaque pas de la simulation, à l'environnement dynamique. Dans un but d'homogénéisation des modèles utilisés pour les piétons virtuels et le piéton-avatar de l'utilisateur, les actions réalisables par un piéton virtuel correspondent aux commandes réalisables par l'utilisateur via la manette de commande. Il s'agit en particulier d'actions d'accélération et de direction du mobile, ainsi que d'actions de rotation de la tête. Un exemple de réseau utilisé pour la commande des piétons est présenté en figure 3.4.

Le modèle proposé a également été adapté pour modéliser le comportement des conducteurs, à l'aide de comportements élémentaires et de noeuds d'arbitrage différents de ceux des piétons. Cela permet de généraliser partiellement la représentation des acteurs, qu'ils soient piétons ou conducteurs de véhicules.

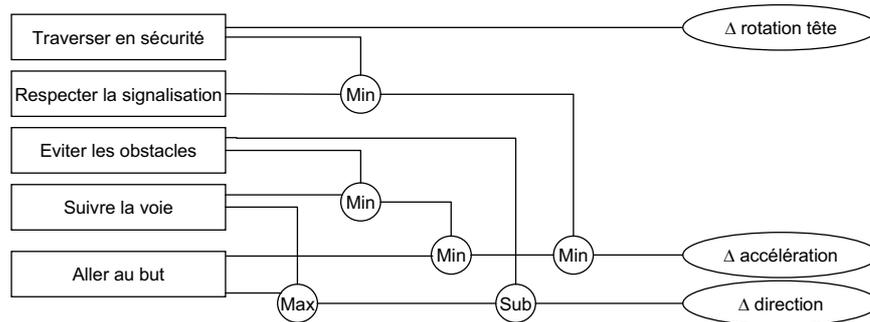


FIGURE 3.4 – Exemple de réseau de comportements appliqué à la commande d'un piéton virtuel

Ce travail a fait l'objet d'un rapport de projet [Aubert et al., 2003].

Bien que nous ayons pu mettre en oeuvre ce modèle dans un contexte applicatif, cette approche n'est pas entièrement satisfaisante car elle n'affranchit pas le concepteur des problèmes de paramétrages inhérents à ce type de modèles. En particulier, les paramétrages concernent :

- le choix des comportements élémentaires (les d_i) ;
- le choix des sorties des comportements élémentaires (les (a_i, r_i)) ;
- le choix des fonctions combinant les décisions (les f_j).

Si la dépendance du premier de ces points vis-à-vis de l'application est compréhensible, les points suivants ne sont également pas résolus. La sortie r_i d'un comportement n'est pas nécessairement choisie parmi un ensemble fixe de valeurs ; l'activation a_i n'est pas nécessairement linéaire. Concernant le réseau lui-même, il a été expliqué précédemment

que l'arborescence crée une répartition en niveaux décisionnels ; sa structure a un impact sur le résultat. Or, il n'existe pas de méthode permettant de définir *a priori* la structure optimale du réseau, ni le positionnement des comportements. L'utilisation d'une méthode expérimentale de paramétrage permet de produire un modèle qui répond à certains critères d'adéquation relativement à un comportement global souhaité. Cependant, la donnée de ce comportement idéal est évidemment réduite à un ensemble de situations prévisibles.

Afin de pallier ces inconvénients, une nouvelle approche a été étudiée, celle-ci n'effectue pas une combinaison des actions mais réalise un choix parmi celles-ci.

3.2.2 Approche par mécanisme de vote

Cette nouvelle approche est basée sur le vote de préférences distribuées. Elle fait partie des travaux qui considèrent l'application de la théorie du choix social aux problèmes de décision collective dans les SMA (voir, par exemple, la classification réalisée dans [Chevaleyre *et al.*, 2007]). Les préférences sont des relations binaires, réflexives et transitives appliquées par les décideurs à l'ensemble des options d'action possibles. Chaque décideur d_i possède ses objectifs propres et donc sa propre relation de préférence, que nous noterons \leq_i . L'application de cette relation crée un ordre parmi les options, qui peut être assimilé à un vote sur chacun d'elles. La décision finale est obtenue en recueillant les votes de tous les décideurs. Cette méthode par agrégation de préférences est appelée *vote de préférences distribuées* dans notre contexte [Rosenblatt, 1996] [Sukthankar, 1997] [Hostetler et Karrney, 2002].

L'approche par vote de préférences distribuées comporte des avantages relativement aux autres méthodes de sélection d'action. En effet, elle donne l'assurance d'obtenir une solution qui soit à la fois acceptable par tous les décideurs (pas de violation de contrainte) et qui satisfasse un maximum de décideurs.

Cependant, elle comporte trois inconvénients principaux :

- Les mécanismes proposés dans la littérature [Sukthankar, 1997, Hostetler et Karrney, 2002] reposent sur un espace d'actions discret limité et fixe. Cette restriction engendre des problèmes d'hésitation car la discrétisation ne s'adapte pas en fonction des besoins de la situation courante.
- La pondération des comportements est également source de difficultés. Le problème est le même que celui évoqué dans l'approche par fusion d'action, à savoir le problème du paramétrage : quel rapport de poids instaurer entre deux comportements ? Une solution expérimentale a été proposée par [Hostetler et Karrney, 2002] ainsi qu'une solution reposant sur un algorithme génétique dans [Sukthankar *et al.*, 1998]. Malgré tout, les modèles obtenus "figent" le comportement décisionnel de l'agent : aucune assurance n'est donnée quant à la pertinence des pondérations obtenues lorsque des changements interviennent dans l'environnement ou concernant les objectifs des agents.
- Enfin, malgré la multitude de méthodes de vote existantes, seule celle par estimation moyenne est utilisée dans ce contexte décisionnel. Cette méthode repose sur l'attribution de notes aux différentes options candidates. Or, dans le cas qui

nous intéresse, les décideurs possèdent uniquement des représentations locales de la situation, ce qui rend difficile l'évaluation de toutes les autres options.

L'objectif de l'étude a donc consisté à (i) autoriser l'utilisation d'un espace d'actions caractérisé par sa dynamicité et l'absence de valeurs données *a priori*, (ii) éviter l'utilisation des pondérations, et (iii) proposer une procédure de vote équitable ne nécessitant pas d'échelle de notation.

Proposition d'un mécanisme dynamique de sélection d'action

Dans l'approche par vote de préférences distribuées proposée, les décideurs sont des comportements générés, durant l'exécution du programme, sur la base de comportements-types prédéfinis et en fonction de la situation. L'ensemble des comportements d_i varie donc avec le temps, afin de s'adapter aux situations rencontrées.

Chaque comportement exprime ses souhaits en termes d'actions et des impossibilités concernant certaines valeurs du vecteur de commandes v (comme précédemment, $decision = v = (v_1, \dots, v_n)$). Chaque d_i propose ainsi :

- un ensemble \mathcal{O}_i d'options $vo_i = (vo_{i,1}, \dots, vo_{i,n})$ où $vo_{i,j}$ correspond à la valeur souhaitée de la composante v_j de v par d_i ,
- et un ensemble \mathcal{V}_i de vetos vv_i , correspondant aux valeurs inacceptables pour d_i en raison de ses contraintes. Ceux-ci sont exprimés par des intervalles de valeurs : $vv_i = ([vv_{i,1}, vv'_{i,1}], \dots, [vv_{i,n}, vv'_{i,n}])$.

Chaque option (resp. veto) représente une situation ou configuration particulière, dans laquelle les valeurs relatives des $vo_{i,j}$ (resp. $vv_{i,j}$) sont importantes. Notons cependant que les relations de dépendance entre ces valeurs ne sont pas exprimées sous forme intensive mais extensive : on exprime toutes les options (resp. veto) dont les valeurs respectent (resp. contredisent) la relation liant les $vo_{i,j}$ (resp. $vv_{i,j}$).

De plus, tous les comportements ne sont pas concernés par tous les éléments de v ; un comportement d_i peut ne pas avoir d'opinion concernant la valeur à prendre par un ou plusieurs v_j . Dans ce cas, la valeur correspondante dans l'option prendra à la valeur prise au cycle précédent par cet élément. Dans le veto, il couvre le domaine complet de valeurs du v_j .

Le processus décisionnel comporte plusieurs étapes.

1. La première consiste à créer l'ensemble des comportements-décodeurs sur la base des percepts. Il s'agit d'une instanciation sur la base de comportements prédéfinis. Ceux-ci peuvent être paramétrables ; ils sont dépendants de l'application.
2. Chaque décideur fournit ensuite ses préférences sous la forme d'un $\mathcal{A}_i = \langle \mathcal{O}_i, \mathcal{V}_i \rangle$. L'ensemble des ensembles d'options $\{\mathcal{O}_i\}$ sera noté \mathcal{O} et celui des veto sera noté \mathcal{V} .
3. L'espace d'action est réduit par l'application de chacun des veto $\{vv_i\}$ aux éléments de \mathcal{O} afin de n'en conserver que le sous-ensemble \mathcal{OV} des options valides. Une option est valide s'il n'existe pas de veto qui la contredise, c'est-à-dire que

pour chacun des veto, l'option ne remplit pas un des critères du veto :

$$\forall vo_i \in \mathcal{O}, \forall vv_k \in \mathcal{V}, \exists j \in [1; n], vo_{i,j} \notin [vv_{k,j}, vv'_{k,j}]$$

4. Les comportements classent ensuite chacune des options valides selon leurs objectifs individuels. Le résultat de cette étape est un ensemble de classements sur les options. Notons $R_i = \langle r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in} \rangle$ avec r_{ij} le rang assigné à vo_i par le décideur d_j (si d_j préfère vo_x à vo_y , $r_{xj} \leq r_{yj}$).
5. L'arbitrage final consiste à comptabiliser les votes afin de déterminer la meilleure option. Différentes méthodes sont possibles à cette étape. C'est une variante de la méthode de Borda qui a été utilisée : une option se voit attribuer 1 point chaque fois qu'elle est classée en tête, 2 points lorsqu'elle est deuxième, etc.

$$points(vo_i) = \sum_{j=1}^p (j \cdot occ(vo_i, j))$$

où : $p = |\mathcal{O}\mathcal{V}|$, le nombre d'options valides

et $occ(vo_i, j) = |\{r_{ik} \in R_i, r_{ik} = j\}|$, le nombre d'occurrences de vo_i à la place j dans R_i .

L'option choisie est celle qui recueille le moins de points :

$$decision = vo_m, \text{ tel que } points(vo_m) = \min_{i=1..p} \{points(vo_i)\}$$

En cas d'égalité, une des options équivalentes est choisie au hasard.

Pour conclure, cette approche apporte une amélioration au vote distribué de préférences, par :

- la gestion dynamique des comportements-décideurs,
- la gestion dynamique de l'espace d'actions,
- l'absence de pondération,
- une méthode de vote autorisant l'utilisation de pré-ordres totaux.

L'usage original des veto sous la forme d'intervalles de valeurs permet de conserver un maximum de possibilités d'action tout en autorisant la restriction de l'espace total par l'élimination des options qui ne respectent pas toutes les contraintes.

Cependant, cette approche n'apporte pas de solution au problème de la définition des comportements. La tâche de conception des comportements y est légèrement modifiée, puisqu'il s'agit de la définition des comportements-types, mais ce changement n'affranchit pas le concepteur du choix du niveau d'abstraction à instaurer. En particulier, le problème de la granularité des comportements n'est pas réglé. De plus, il reste à étudier plus avant le mécanisme d'instanciation des comportements sur la base des éléments perçus.

Application

A la suite du projet RESPECT présenté précédemment (voir partie 3.2.1), le modèle a été appliqué à la simulation comportementale en vue de sa validation.

Les premiers résultats issus d'une application à un environnement virtuel en 2D semblent prometteurs (voir l'exemple donné en figures 3.5 et 3.6). Cet environnement est dérivé de celui présenté dans la littérature par Suthankar ([Sukthankar, 1997]). Il a permis de montrer rapidement quel est le comportement en déplacement d'entités virtuelles simples basées sur le modèle proposé.

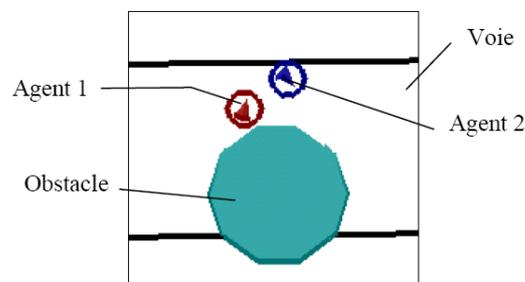


FIGURE 3.5 – Exemple de croisement de deux agents en présence d'un obstacle.

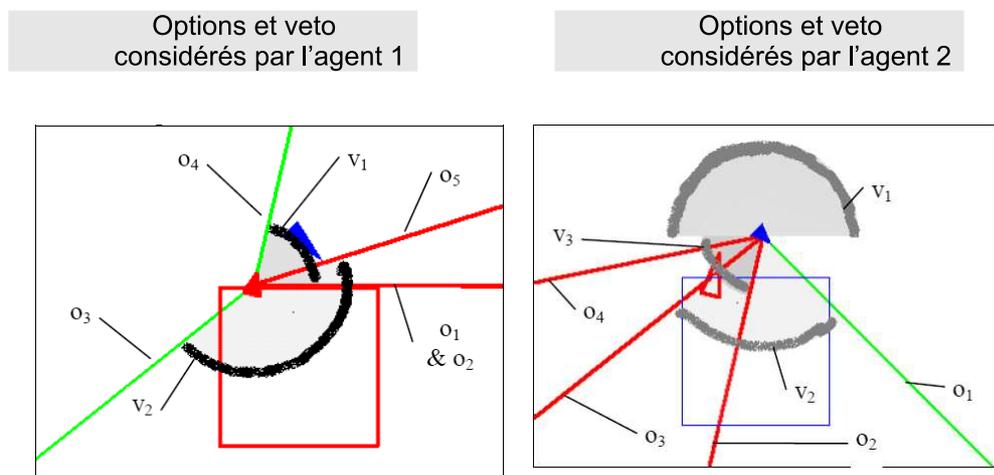


FIGURE 3.6 – points de vue propres à chacun des agents dans la situation présentée en figure 3.5 [Hanon *et al.*, 2006]

Les comportements types utilisés sont : le suivi de voie, l'évitement d'un obstacle fixe, l'évitement d'un obstacle mobile (typiquement : un autre agent), le comportement d'inertie, et le comportement aléatoire.

Différentes situations ont été testées, telles que des croisements de flux d'agents ou des rétrécissements de voies. Les mesures réalisées concernent :

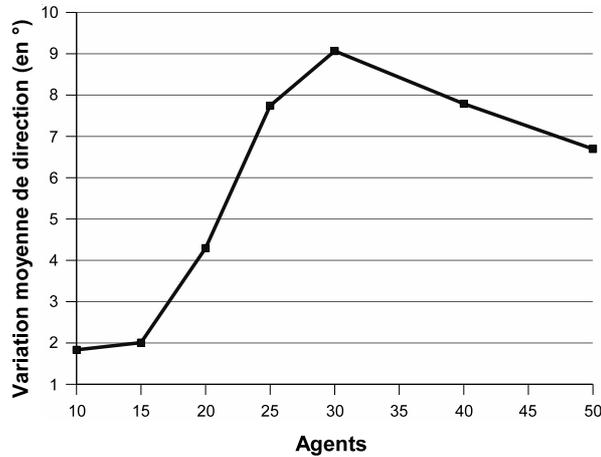


FIGURE 3.7 – Variation moyenne de direction en fonction du nombre d’agents présents [Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007].

- la distance parcourue, en tant qu’indicateur des déplacements inutiles réalisés,
- les variations de direction, indicatrices des déplacements inutiles, en particulier des hésitations de l’agent,
- le nombre de collisions, indicateur des problèmes de respect de contraintes.

Ces mesures ont été réalisées sur un agent choisi aléatoirement à chaque test. Des moyennes ont ensuite été calculées sur les valeurs obtenues dans un contexte de 10 agents, puis de 15 agents, etc.

Les résultats montrent qu’il est possible, par la méthode proposée, d’éviter le paramétrage expérimental du modèle. Ils montrent également la fiabilité des décisions par l’absence de violation de contraintes, grâce aux vetos. La distance parcourue est peu significative, équivalente à celle obtenue avec une méthode à combinaison d’actions. Les résultats présentés en figure 3.7 montrent que la variation moyenne de direction (moyenne des différences d’angle entre deux pas consécutifs de la simulation) reste faible ($<10^\circ$). Ceci indique qu’il y a peu de changements brusques de direction, la trajectoire de l’agent étant “lissée”, en particulier par l’intervention du comportement d’inertie. Cependant cette moyenne augmente très rapidement avec le nombre d’agents. La “casure” intervenant dans la courbe pour 30 agents est due à la densité d’agents qui limite les déplacements possibles des agents.

Le nombre d’agents est limité à 50 car au delà le temps de calcul devient trop grand par rapport aux contraintes de rafraîchissement de l’image. Nous avons cherché à savoir si la taille de l’espace d’actions donnait une indication relative à ce problème. C’est ce qui fait l’objet du graphique 3.8. Il montre le nombre moyen (en rouge) et maximal (en bleu) d’options valides considérées à chaque pas de la simulation par un agent. Les options valides sont celles qui n’ont pas été éliminées par les vetos, représentant ainsi la taille de l’espace d’actions considéré. Le nombre maximal d’options augmente rapidement, mais ce problème est ponctuel car l’augmentation du nombre moyen d’options

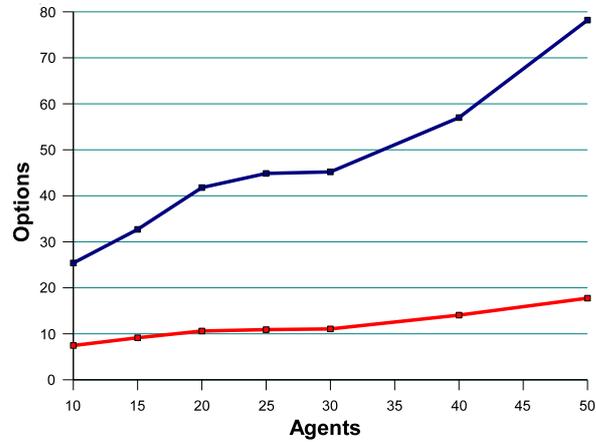


FIGURE 3.8 – Nombre moyen (en gris) et maximal (en noir) d'options évaluées par un agent à chaque pas de la simulation [Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007].

reste correcte. Ce point reste donc à étudier plus avant afin de permettre la simulation d'un plus grand nombre d'agents.

Par ailleurs, la diversité des situations produites par l'environnement de test est réduite. L'objectif est désormais de passer à une validation plus importante.

De plus, le modèle reste purement réactif, selon des vues locales et sans anticipation. Cela entraîne des blocages mutuels, par exemple lorsque la densité d'agents augmente.

Ces travaux ont fait l'objet de la thèse de D. Hanon [Hanon, 2006] et des publications : [Hanon et al., 2005, Hanon et al., 2006, Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007].

3.2.3 Approche hybride

Une approche totalement réactive ne nous permettant pas d'assurer que le comportement sera adéquat en toute circonstance, nous avons exploré une utilisation accrue du niveau cognitif. L'objectif est de donner à l'agent une aptitude à déterminer si son propre comportement est approprié ou non. En particulier, dans le cas de la navigation autonome, l'idée est de permettre à l'agent de détecter des comportements d'hésitations et de blocage, afin de modifier son raisonnement pour se sortir de ces situations.

Si les modèles hybrides (tel que InterRap [Müller, 1996], par exemple) positionnent les niveaux supérieurs en tant que donneurs d'ordres des niveaux inférieurs, nous proposons de positionner ceux-ci en tant que contrôleurs externes, *a posteriori*, des actions générées par les niveaux inférieurs. Le principe général du processus d'auto-contrôle proposé est basé sur un ensemble de cas simples de transfert du contrôle entre les niveaux de l'agent 3.9.

L'interaction entre niveaux contigus. L'interaction intervient uniquement entre niveaux contigus, selon un principe hiérarchique, par le partage de représentations d'états et d'actions.

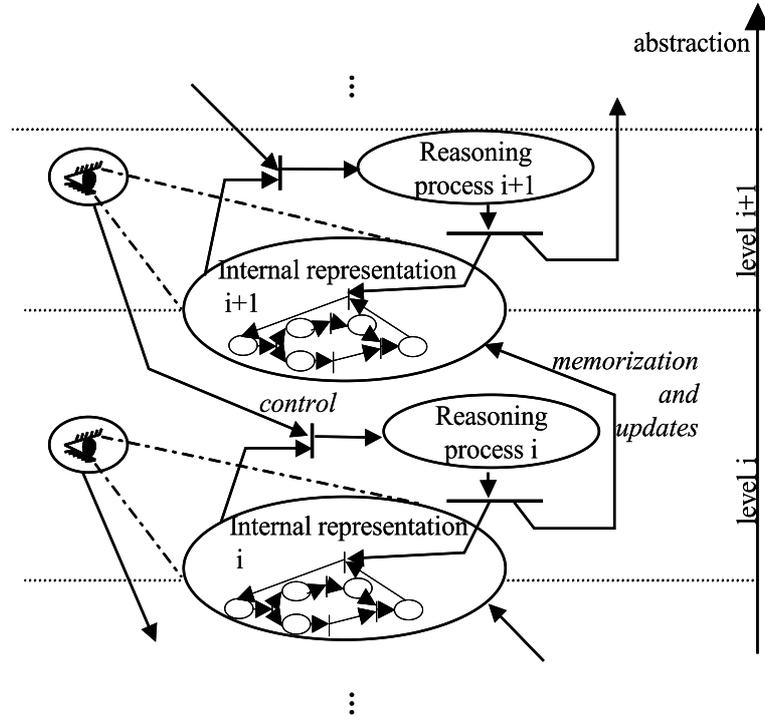


FIGURE 3.9 – Principes d’auto-observation et de contrôle appliqués à une architecture multi-niveaux [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2005].

Contrôle descendant. Le niveau i a une connaissance d’un plus haut niveau d’abstraction que le niveau $i - 1$, et donc une meilleure compréhension de la situation courante, basés sur des buts à plus long terme.

Mise à jour ascendante. Seul le niveau le plus bas perçoit l’état de son environnement et de lui-même. C’est pourquoi les mises à jour des auto-représentations proviennent du niveau le plus bas et se propagent de manière ascendante.

En accord avec [Bryson, 2000], l’hypothèse est que le contrôle des bas niveaux par les niveaux plus élevés ne peut pas intervenir à n’importe quel moment, car certaines contraintes sont visibles uniquement des niveaux inférieurs (c’est le cas dans les situations d’urgence par exemple). C’est pourquoi les buts de haut niveau sont vus en tant que directives globales, traduites en actions plus concrètes aux niveaux inférieurs. Dans le cadre d’applications en réalité virtuelle ceci permet de respecter la contrainte de temps de calcul, les niveaux plus cognitifs n’étant pas activés à chaque cycle de simulation. Il intervient uniquement tous les n pas, afin de vérifier si le comportement résultant répond à certains critères de cohérence sur la durée correspondante.

Le modèle proposé a fait l’objet d’une première application à la navigation autonome. Le modèle décisionnel comprend trois niveaux, ce qui est usuel dans le domaine (Cf. par ex., [Laird et Rosenbloom, 1996] ou [Müller, 1996]). La méthode de génération

des actions par le niveau inférieur n'étant pas imposée, c'est la méthode de sélection d'action proposée ci-dessus qui a été utilisée. Le transfert de contrôle entre les niveaux est basé sur deux critères qui qualifient la situation en termes d'urgence et de cohérence. L'*urgence*, évaluée par le temps avant collision, conduit à donner prioritairement le contrôle au niveau le plus réactif. La *cohérence* du comportement est évaluée par les deux niveaux supérieurs, sur la base de la mémorisation des actions passées et selon des objectifs de réalisation à moyen et long terme.

La détection de comportement incohérent a été appliquée à certains cas d'hésitation et de blocage. Le comportement d'hésitation a été défini comme étant une séquence qui inclut des actions ou décisions opposées et répétées (par exemple, rotation à droite, suivie d'une rotation à gauche, puis à droite, etc). Ces actions sont produites par le niveau le plus réactif. Leur observation est réalisée à un deuxième niveau afin de détecter d'éventuelles oscillations, repérables sur une séquence d'une longueur de n pas de simulations. De même, une situation de blocage mutuel est définie par une séquence d'états montrant une absence de progression vers le but et la persistance de la situation d'interaction avec un autre agent. La détection d'incohérence conduit à introduire une modification des données du niveau inférieur, par exemple une diminution temporaire de la distance de sécurité vis-vis des obstacles ou la création d'un but intermédiaire, afin d'induire un changement de comportement.

Cette proposition a fait l'objet d'une première publication [Grislin-Le Strugeon et al., 2005], mais reste à approfondir. En particulier, son application est actuellement assez limitée, par exemple, les situations d'interblocage considérées sont restreintes à deux agents. De plus, nous n'avons pas traité la recherche de la cause des comportements incohérents. Enfin, l'hypothèse fondamentale est qu'un comportement incohérent est dû à une déficience de l'agent, soit un raisonnement erroné, soit une mauvaise représentation de la situation. Or, l'inconsistance peut provenir de l'environnement lui-même.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté nos travaux dans le domaine de l'adaptation comportementale des agents. Le point de départ de ceux-ci a été un objectif de simulation de piétons dans un environnement de réalité virtuelle.

Deux approches ont fait principalement l'objet des études réalisées : une approche basée sur la combinaison d'actions et une approche basée sur le vote. L'approche basée sur le vote s'est avérée particulièrement intéressante car elle autorise une gestion dynamique de l'espace d'actions, et permet de s'affranchir de la problématique usuelle du paramétrage du modèle avec des pondérations.

Une dernière proposition présente une modélisation hybride visant à un auto-contrôle de l'agent.

Cette thématique a fourni le cadre au co-encadrement d'une thèse et à la participation à un projet de recherche PREDIT.

Chapitre 4

Conception de systèmes interactifs basés sur un SMA

En raison de notre contexte de travail au sein d'un laboratoire centré autour de la problématique Homme-machine, nous nous sommes inévitablement intéressés à la conception de systèmes interactifs à l'aide d'agents. Dans les travaux afférents, nous distinguons d'une part les systèmes *orientés agents* qui utilisent uniquement le paradigme agent et/ou multi-agents qui consiste à concevoir un système selon une vue intégrant plusieurs éléments autonomes en interaction, et d'autre part les systèmes *basés agents* et/ou multi-agents, qui vont jusqu'à une implémentation fondée sur un SMA.

Les travaux présentés en partie 4.1 appartiennent à la thématique des systèmes orientés agents, tandis que les parties suivantes relèvent de la thématique des systèmes basés SMA.

4.1 Contribution à la conception de systèmes interactifs selon un paradigme multi-agents

Dans un premier temps, nous avons envisagé la possibilité de : (i) concevoir le composant de dialogue de l'interface d'un système Homme-Machine (SHM) comme un agent intelligent comportant des modèles de lui-même et de son entourage, en interaction avec les modules adjacents ; (ii) modéliser les interactions de l'interface avec les autres entités agissantes (modules d'assistance, autres interfaces, agents humains) selon un schéma multi-agents. A cet effet nous avons effectué un travail de synthèse dans le domaine des interfaces intelligentes, c'est-à-dire des interfaces qui comportent des outils permettant de minimiser la distance cognitive entre le modèle mental de la tâche qu'a l'utilisateur et la manière dont la tâche est présentée à l'utilisateur par l'ordinateur durant sa réalisation.

De plus, sur la base des modèles existants dans le domaine, nous avons étudié une conception de l'I.H.M. basée sur la notion d'agent. Le paradigme multi-agents est particulièrement intéressant pour modéliser les systèmes multi-utilisateurs dans lesquels apparaît une répartition physique des composants du système. A partir des modèles

d'organisations multi-agents, des propositions ont été faites dans le domaine de l'interaction Humain-Machine (voir fig. 4.1).

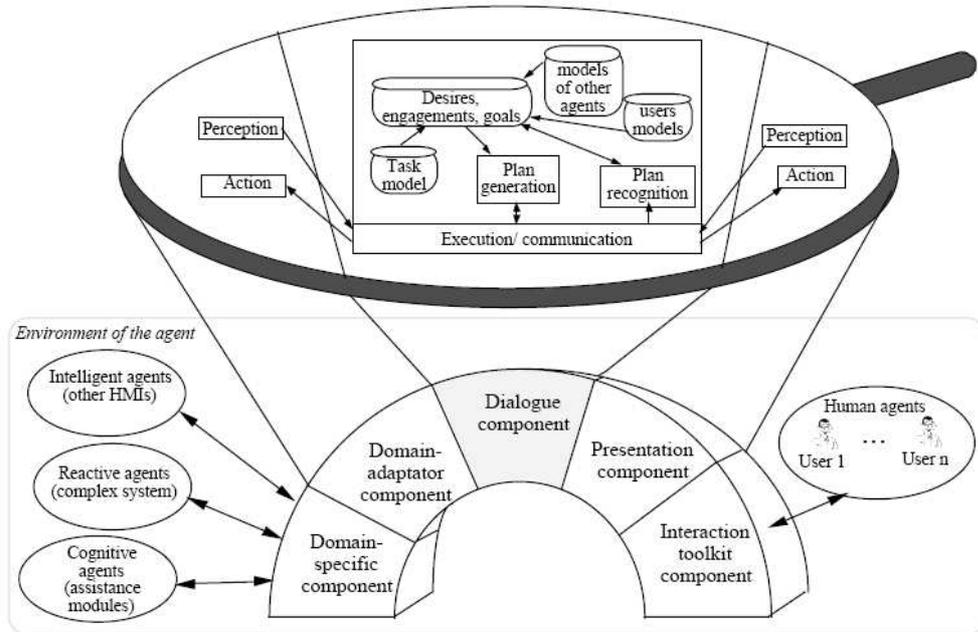


FIGURE 4.1 – Exemple d'agent assistant selon le modèle ARCH [Kolski et Grislin–Le Strugeon, 1998].

Ces travaux ont fait l'objet des publications [Kolski et al., 1993] et [Kolski et Grislin–Le Strugeon, 1998].

4.2 Contribution à l'étude de l'interaction Humain-SMA

A la jonction des domaines de l'IAD et de l'IHM, nous nous sommes intéressés à l'interaction d'une application informatique basée sur un SMA avec l'utilisateur de cette application (nous parlerons de système Homme-SMA ou *H-SMA*). L'objectif est de mettre en évidence ce qui caractérise l'interaction entre le SMA et son (ses) utilisateur(s) et les contraintes de conception spécifiques concernant le SMA et l'interface utilisateur qui en découlent.

En particulier, trois points spécifiques à l'interaction H-SMA ont été explorés.

Le premier point concerne le *caractère autonome* des agents. Le choix de conception d'intégrer un SMA provient généralement d'un besoin d'autonomie. Or, cela suppose de laisser le système prendre certaines décisions. Comment intégrer les décisions prises par le SMA dans la tâche globale du système homme-machine ?

Le deuxième point concerne le *caractère multiple* du SMA. L'utilisateur interagit avec une entité composite et non unique. Cela implique-t-il une conception spécifique ?

Le troisième point est lié à la *conception du SMA*. L'interaction avec les utilisateurs du système doit-elle être prise en compte dans la conception du SMA ? si oui, comment ?

4.2.1 Autonomie du SMA vis-à-vis de l'utilisateur

La problématique de la prise de décision dans un contexte incluant des agents et des humains a été définie par [Carabelea *et al.*, 2003] comme étant la U-Autonomie, à savoir l'autonomie des agents vis-à-vis de l'utilisateur. Nous avons abordé cette question par l'étude de la répartition des tâches entre les différents acteurs (humains et agents) et la notion de coopération.

Répartition des tâches H/SMA

La question de l'autonomie des agents est particulièrement cruciale dans un contexte de résolution de problème impliquant des acteurs humains et des acteurs agents. Trois phases générales de résolution de problème ont été distinguées : l'analyse (évaluation de la situation, analyse du problème et génération éventuelle de solutions schématiques), la planification et la décision (planification précise, choix d'une solution, répartition des tâches, avec rebouclage éventuel vers l'analyse) et l'exécution du plan choisi et des tâches en rapport avec les compétences des intervenants. La qualité des acteurs intervenant dans chacune de ces phases permet de caractériser l'interaction H-SMA, sur la base d'une hypothèse de collaboration de l'utilisateur et du SMA à la résolution du problème.

A partir de ces éléments, un ensemble de combinaisons significatives d'acteurs (H et/ou SMA) a été mis en évidence (Cf. tableau 4.1) :

La situation SMA-SMA-SMA ne rentre pas dans le cadre de l'interaction H-SMA. Toutefois, elle doit retenir l'attention du concepteur, car, bien que le système y soit peu interactif, il doit fournir à l'utilisateur des explications relatant son activité.

Les situations H-H-SMA et H-H-[H et SMA] représentent l'utilisation du SMA comme d'un simple outil, sans tenir compte des capacités d'autonomie des agents. Dans la seconde situation, l'utilisateur effectue un partage de tâches entre lui-même et le système.

Les situations qui voient l'Humain exécutant d'actions planifiées par le SMA uniquement (SMA-SMA-H ou SMA-SMA-[H et SMA], non présentées tableau 1) sont à proscrire car l'utilisateur perd son statut de décideur. Il risque, à terme, de se désintéresser de sa tâche [Milot et Mandiau, 1995].

C'est pourquoi l'on préférera une situation de type : H-SMA-H, H-SMA-SMA ou H-SMA-[H et SMA]. Dans le cas H-SMA-SMA, l'Humain effectue uniquement l'analyse du problème et laisse le soin au SMA de déterminer et d'exécuter les actions à réaliser. Etant donné que ces différentes étapes ne se déroulent pas toujours de manière séquentielle puisque la détermination précise d'une solution implique parfois des retours vers l'analyse de la situation, cela suppose une bonne compréhension mutuelle de la part des différents acteurs.

Acteurs/Tâches			Type d'interaction
Analyse du problème	Planification et décision	Exécution	
SMA	SMA	SMA	l'utilisateur est un simple observateur, inconnu du SMA
H	H	SMA	le SMA est utilisé en tant qu'outil sans tenir compte de son autonomie potentielle
H	H	H et SMA	le SMA est une aide à la réalisation des tâches
H	SMA	H et/ou SMA	le SMA est un assistant expert de la planification et de la prise de décision
SMA	H	H et/ou SMA	le SMA est un assistant expert du problème
H et SMA	SMA	H et SMA	l'H perd le privilège de la décision finale
H et SMA	H	H et SMA	confrontation de solutions : antagonisme possible mais le choix final revient à l'utilisateur
H et SMA	H et SMA	H et SMA	véritable collaboration entre les deux

TABLE 4.1 – Sélection de situations intéressantes d'interaction Humain-SMA (H-SMA) en fonction des phases de résolution du problème

Pour la même raison, les situations du type SMA-H-x (quelque soit le ou les acteurs x exécutants) nécessitent une communication évoluée entre l'H et le SMA. Ce dernier cas est plus probable que le précédent car l'utilisateur du système connaît toujours, au moins partiellement, les bases sur lesquelles reposent le raisonnement du SMA. Nous considérons, d'ailleurs, que l'analyse du problème n'est pas réellement uniquement l'oeuvre du SMA. Dans ces deux situations, l'H et le SMA se complètent et coopèrent, de manière intégrative selon la classification de [Schmidt, 1994], en accroissant qualitativement leurs performances selon les termes employés par [Ferber, 1995].

Les seules situations d'antagonisme existantes se retrouvent lorsque les solutions générées par l'utilisateur et le SMA sont différentes (ce qui est une possibilité dans les situations [H et SMA]-x-x et x-[H et SMA]-x). Dans les situations [H et SMA]-SMA-x ou [H et SMA]-H-x, le problème est réglé par l'existence d'un décideur unique, soit H, soit SMA.

Les situations [H et SMA]-[H et SMA]-x sont à la fois plus complexes et plus riches car H et SMA sont amenés à s'accorder sur les décisions à prendre et les capacités des différents intervenants sont utilisées à bon escient. L'utilisateur peut alors être consi-

déré comme un agent spécifique du SMA. En effet, il existe un partage des tâches entre les deux : l'utilisateur et le SMA ont un objectif commun et sont susceptibles l'un et l'autre d'agir sur un environnement partagé de façon à atteindre cet objectif. Dans le cas contraire, l'utilisateur doit être considéré comme distinct du SMA (comme un autre SMA ou comme appartenant à l'environnement).

Ces éléments ont été publiés dans [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 1998] et [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 2001].

Assistance à l'utilisateur

De façon complémentaire à cette approche, nous avons également étudié l'autonomie des agents par le biais des modèles de coopération utilisés dans le domaine de la coopération Homme-Machine et dans celui des SMA. Nous avons tenté de rapprocher les conceptions issues des deux domaines dans le cadre du développement d'outils d'assistance coopératifs.

En particulier, une problématique dans ce cadre consiste à modéliser l'activité de l'opérateur humain afin de lui proposer l'assistance adéquate au moment opportun, en dépassant la simple description des tâches prescrites, qui mène à une sous-utilisation des outils car trop éloignés de l'activité réelle. Nous avons rapproché le cycle général d'activité d'un agent en perception-décision-action du modèle du *savoir-faire* de l'opérateur humain selon [Hoc et Lemoine, 1994], et composé de trois grandes activités que sont l'élaboration d'information, le diagnostic et la décision d'intervention. La principale différence que nous avons relevée entre les deux types de modèles est l'aptitude des humains à "court-circuiter" certaines étapes du raisonnement en fonction des circonstances. Les modèles d'agents qui se rapprochent le plus de ce type de fonctionnement sont les approches hybrides réactives-cognitives, comme dans [Georgeff et Lansky, 1987] ou le processus de contrôle CELLO [Occello et Demazeau, 1997].

Du point de vue du SMA, la difficulté de l'intégration de l'humain dans l'activité des agents provient des variations que celui-ci introduit dans les mécanismes de coordination et les protocoles de communication qui sont strictement définis entre les agents. Selon la terminologie employée dans le domaine des Systèmes Humains-Machines, le *savoir-coopérer* de l'agent consiste en sa connaissance de la méthode à employer pour gérer la coopération. Les travaux réalisés au LAMIH se basent sur les deux principes proposés par [Hoc, 1996], que sont la gestion des interférences (de buts, de compréhension de la situation, etc.) et la facilitation (des buts mutuels).

Sur cette base, nous avons listé les compétences requises du SMA dans le but de constituer un outil coopératif d'assistance aux opérateurs humains :

- l'aptitude à comprendre ce dont l'opérateur a besoin, qui nécessite de modéliser :
 - ce que l'opérateur fait (interprétation des actions et messages),
 - ce qu'il connaît (modèle des connaissances de l'opérateur),
 - ce dont il est capable (modèle des compétences et capacités),

- ce qu’il veut faire, pour anticiper ses lacunes ou faciliter ses actions (modèle du mode de raisonnement, planification) ;
- l’aptitude à voir comment et quand intervenir pour être utile à l’opérateur (auto-représentation, connaissance de l’application, planification, communication).

Parmi ces compétences, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au moyen utilisable par les agents et par les opérateurs pour communiquer sur leurs propres activités. Le principe général a été l’espace de travail commun, concrétisé sous forme d’un *tableau noir*, permettant aux différents intervenants de se transmettre des informations concernant l’étape de réalisation qu’ils ont atteint et les résultats obtenus. Une proposition d’application a été faite dans le cadre de l’assistance au contrôle du trafic aérien.

Ces travaux ont été publiés dans [Pacaux-Lemoine et Grislin–Le Strugeon, 1998].

L’étude des compétences des agents en terme de *savoir-coopérer* a été poursuivie sur la base de la typologie proposée par [Schmidt, 1991], qui distingue trois formes coopératives – augmentative, débative et intégrative –, selon l’incapacité (généralement liée à la charge de travail) et/ou l’incompétence (liée au savoir-faire) d’un agent à réaliser seul sa tâche.

Après une analyse combinant ces trois formes de coopération et les activités des agents en termes de gestion des interférences et de facilitation évoqués ci-dessus, nous avons mis en regard les méthodes et techniques existantes permettant de réaliser effectivement les compétences requises de la part des agents. Il est apparu que certaines fonctions importantes, telles que la mise en évidence par anticipation de conflits au sein de plans partagés ou la gestion des priorités entre différents niveaux de buts, restaient difficiles à développer, les solutions existantes reposant sur la structure organisationnelle du système.

Cette étude a été publiée dans [Grislin–Le Strugeon et Millot, 1999].

4.2.2 Intégration du caractère multiple du système

Quelle perception l’utilisateur a-t-il d’un SMA ? Le SMA est-il vu comme un agent unique et complexe ou comme plusieurs petits agents spécialisés ? La perception unique ou multiple du SMA dépend du nombre de canaux de communication (nombre de connexions ouvertes) à la disposition de l’utilisateur. Chacune de ces possibilités possède ses avantages et ses inconvénients.

La vision unique de type “boîte noire” donne un point de vue global sur le SMA, forcément réducteur mais aussi intégrateur des différences internes. Elle est également plus habituelle pour un utilisateur de système d’information, indépendamment du nombre de processus se déroulant en parallèle et, plus trivialement, du nombre de fenêtres ouvertes simultanément à l’écran.

La vision multiple est intéressante lorsque les agents ont des ensembles de compétences disjoints : l'utilisateur peut alors avoir l'impression d'effectuer un travail "en équipe" avec des agents effectivement autonomes.

Ces deux visions peuvent aussi coexister et l'alternance entre elles être gérée par l'utilisateur, selon les besoins. Pour le concepteur, ces deux alternatives conduisent à la conception de fonctions différentes. Pour que l'utilisateur puisse percevoir le SMA comme un agent unique, il lui faut, soit nommer un agent "porte-parole", responsable de la communication avec l'utilisateur, soit créer, à un plus bas niveau, un gestionnaire central d'accès des agents à l'interface. A l'opposé, la perception de la multiplicité du SMA suppose l'ouverture d'autant de liens de communication agent vers utilisateur que d'agents dans le système. Le transfert d'informations dans le sens utilisateur vers agent est dans tous les cas une communication simple car l'émetteur est unique.

4.2.3 Conception de SMA avec IHM

Il semble évident d'affirmer que la conception du SMA doit être réalisée relativement à l'utilisation qui en sera faite. Toutefois, cela mérite que l'on s'y attarde. En effet, l'architecture des agents, leurs connaissances, méthodes, etc., ne sont pas réellement indépendantes des fonctions nécessaires au bon usage du SMA. Un exemple concret réside dans le fait de fournir une explication du comportement d'un agent : si ce besoin existe, la fonction de communication de cette information devra être prévue dans le code même de l'agent. Il n'est pas réaliste de considérer que l'on pourra se préoccuper de l'interaction avec l'Humain après avoir achevé la conception complète du SMA, l'utilisateur doit être pris en compte dès le début de la conception du système.

Dans un premier temps, nous avons été tentés de considérer l'utilisateur en tant qu'agent du système englobant Homme-machine (voir [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1995]). Cependant cette uniformisation des agents humains et artificiels ne tient pas si l'on considère les points suivants : (i) l'agent humain est très difficile à modéliser : ses connaissances sont difficiles à cerner et son comportement est difficilement analysable ; (ii) il est généralement le responsable ultime des tâches à réaliser et par conséquent prioritaire dans ses décisions vis-à-vis du système automatisé, ce qui ajoute une contrainte sur l'organisation, la distribution des rôles et des tâches ; (iii) il requiert un mode de communication et un contenu spécifique, différent de celui utilisé entre les agents artificiels.

Ainsi il nous apparaît important de considérer l'utilisateur différemment des autres agents du système :

- L'utilisateur peut être considéré, du point de vue du SMA, comme un agent spécifique du système si la répartition des tâches prend explicitement en compte sa présence. Une même tâche peut être réalisée indifféremment par un agent informatique ou par l'utilisateur humain dès l'instant où les compétences de chacun sont respectées. Si la répartition des tâches prend en compte cette alternative (et la résout), alors l'utilisateur est considéré comme un agent du système.
- Si l'utilisateur agit et modifie l'environnement du SMA sans qu'il y ait planification commune, il est alors plus qu'un objet de l'environnement, les agents

artificiels peuvent se le représenter comme un agent isolé ou comme un autre SMA (en raison de sa complexité). L'utilisateur peut aussi être perçu comme un "capteur" de l'environnement : le système peut interroger l'utilisateur sur le problème à résoudre, mais les différentes actions de l'utilisateur pour trouver l'information ne sont pas explicitement prises en compte par le SMA (la ou les tâches réalisées ne sont pas connues).

- Dans une dernière catégorie, on peut considérer l'utilisateur comme absolument inconnu du système. L'utilisateur lance l'exécution du SMA et en récupère le résultat.

Ces trois catégories, bien que construites de façon exclusive, permettent, en conception, de situer l'utilisateur par rapport au SMA en cours de développement. Elles nécessitent des interfaçages différents mais compatibles car des combinaisons sont possibles, la situation étant évolutive, dynamique.

Dans tous les cas, l'utilisateur sera un des éléments récepteur du résultat produit par le SMA. Le résultat produit (de façon définitive ou en continu) peut être délivré soit à d'autres éléments du système informatique (SMA en particulier), soit à l'utilisateur, soit aux deux simultanément. Dans ce cadre, cette fonction de communication des résultats est rarement *a priori* partie intégrante de l'approche SMA de départ. En effet, les raisons qui conduisent au choix de développer un SMA sont relatives à la nature et aux caractéristiques de l'application à construire, plutôt qu'à des problèmes de communication avec l'utilisateur (voir à ce propos les restrictions apportées lors de l'introduction).

Ce qui importe pour valider la conception d'un SMA, c'est plus le résultat produit (comportement global ou solution de problème) que la manière d'y parvenir. Ceci devient un handicap dès lors qu'un agent humain intervient, car l'utilisateur d'un système automatique a fondamentalement besoin d'un *feed-back* concernant l'activité de ce système. Le moyen de produire un retour d'information intelligible du SMA vers son utilisateur est un élément clé de l'interaction Homme-SMA et dont les modalités restent, selon nous, à inventer.

En guise de synthèse de cette étude, nous avons mis en évidence trois cas principaux rencontrés en conception de système Homme-SMA, en fonction du niveau d'implication de l'utilisateur dans les tâches réalisées et en fonction des trois points de vue agent, utilisateur ou concepteur :

1. Le premier cas est celui dans lequel l'utilisateur n'appartient ni au SMA, ni à son environnement. Selon les agents, l'utilisateur est inconnu. Il est, au plus, un simple observateur du SMA. Le concepteur développe un système peu interactif, sachant qu'il est dans ce cas recommandé de fournir un minimum d'explication quant aux résultats fournis par le SMA.
2. Dans le deuxième cas, l'utilisateur est vu comme un objet de l'environnement, sujet de perception. De son côté, l'utilisateur voit le SMA comme un outil. Il peut lui fournir des informations, avoir un objectif différent de celui du SMA et/ou utiliser des résultats fournis par le SMA. Le système est conçu dans un

objectif d'interaction simple : des échanges d'informations, des explications de résultats éventuels.

3. Enfin, le troisième cas est celui dans lequel l'utilisateur est un agent spécifique du système. Il se sert du SMA comme d'un ou plusieurs assistants ; il est éventuellement possible de prévoir une interaction distincte avec chacun des membres du SMA. L'interaction est plus complexe que dans les cas précédents, incluant une forme de communication évoluée (partage de tâches), la nécessité d'un référentiel commun (connaissances partagées), et/ou des possibilités de visualisation de l'activité du SMA.

Ces quelques réflexions sont destinées à fournir un premier canevas pour le concepteur de système Homme-SMA. *Elles ont été publiées dans [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 1998].*

4.3 Systèmes Multi-Agents d'Information

Dans le domaine de la conception de systèmes interactifs basés sur un SMA, nous nous sommes intéressés en particulier au *système multi-agents d'information* (ou SMAI), à savoir le SMA en tant que système central d'un système d'information (SI). En effet, l'approche multi-agent permet à la fois une adaptation à un environnement distribué, dynamique et ouvert tel que l'internet et les bases de données réparties, et une adaptation aux besoins en information de différents utilisateurs. Les agents des SMA d'Information partagent des caractéristiques fondamentales, telles que : la capacité à communiquer, des connaissances sociales concernant les compétences de chacun, et des méthodes de coordination nécessaires à la réalisation de tâches communes. Sur cette base commune, les agents diffèrent par les compétences qu'ils possèdent. La bibliographie dans le domaine (voir par exemple la classification détaillée donnée par [Klusck, 2001]) relève en particulier trois grandes catégories de compétences relatives aux actions suivantes (cette décomposition se retrouve également dans l'architecture à trois niveaux de [Shakshuki *et al.*, 2003]) :

1. interagir avec les utilisateurs, à savoir comprendre leurs besoins et adapter les réponses du système ;
2. interagir avec les sources d'information, à savoir chercher et accéder aux bases de données locales ou à distance, et en extraire les données pertinentes ;
3. traiter les données, à savoir l'information extraite et les données à propos des utilisateurs, pour faire correspondre information et besoins des utilisateurs.

Les *agents d'interface* ou *agents assistants* sont utilisés pour gérer l'interaction avec les utilisateurs. Pouvoir distribuer les agents sur des plates-formes diverses permet de supporter des formes variées d'interaction. Les agents d'interface possèdent des connaissances à propos des formats de présentations utilisables, ainsi que sur les applications et matériels d'interaction à disposition. La communication avec le système peut ainsi être plus riche que celle offerte par de simples requêtes/réponses car les agents peuvent par exemple les enrichir en y adjoignant des données contextuelles ou en formatant de

manière spécifique la réponse. Dans ce domaine, on peut citer également les recherches effectuées dans le domaine des assistants avatars, tels que les agents conversationnels animés [Cassell et Vilhjálmsson, 1999]. Les agents dits d'assistance comprennent en général des fonctionnalités plus étendues, concernant le traitement de l'information et/ou la gestion des profils utilisateurs. Un des exemples les plus connus d'agent assistant est donné par le système Letizia [Lieberman, 1995].

Les agents *wrappers* sont dédiés aux interactions avec les sources des données. Ils possèdent la connaissance concernant l'emplacement des données pertinentes et valides, ainsi que de la façon de les extraire. Le système PROFILE [Simons *et al.*, 2000] par exemple, met l'accent sur la découverte d'information, à partir de connaissances du domaine. La caractéristique de distribution des agents est bien adaptée à la distribution des sources de données. En particulier, des agents mobiles peuvent être utilisées pour migrer d'un lieu du réseau à un autre, et la pro-activité des agents qui s'exécutent à distance leur permet de garder une activité utile même lorsque la connexion avec le système central est interrompu.

L'information est traitée par les *agents d'information*, capables de rassembler, filtrer, fusionner, etc. Le processus de résolution peut être réalisé par l'intégration de solution partielles. La gestion des données sur les utilisateurs nécessite des capacités d'apprentissage pour faire évoluer les profils d'utilisateurs au fil des transactions.

En plus des trois catégories de compétences ci-dessus, une catégorie supplémentaire consiste à effectuer la médiation, voire la coordination, des actions des agents. Lorsqu'il apparaît trop coûteux (en terme de temps de calcul ou de complexité des connaissances sociales nécessaires) de faire interagir les agents et de les faire se coordonner par eux-mêmes, une solution de conception est d'utiliser des agents *médiateurs*, ou même des *brokers*, dont la tâche est de créer des liens entre les offres et les demandes services [Gleizes et Glize, 2002]. L'activité de médiation requiert des connaissances à propos des compétences et capacités des agents.

L'architecture globale du SMAI inclut généralement les trois grandes parties énoncées et relatives à (i) l'interaction avec les utilisateurs, (ii) l'interaction avec les sources de données et (iii) le traitement des données. Ensuite, la façon dont ces tâches, et les compétences qu'elles requièrent, sont réparties parmi les agents résulte d'un choix de conception. Certains auteurs ([Dignum, 2000]; [Shakshuki *et al.*, 2003]) distinguent la conception fonctionnelle de celle par résolution distribuée.

L'approche fonctionnelle consiste à reproduire dans l'architecture multi-agents le découpage fonctionnel du système. Chaque agent possède un rôle distinct et est responsable de la réalisation de l'une des trois tâches décrites ci-dessus. Une quatrième tâche peut également apparaître, à partir du découpage de la tâche de traitement des données en deux parties : l'une dédiée au "profilage" des utilisateurs et l'autre, au traitement des informations. Les systèmes InfoSleuth [Nodine *et al.*, 2000] et IMPS [Crow et Shadbolt, 1998] peuvent être classés selon cette approche.

Dans la seconde approche, le recueil d'information à partir de sources multiples pour le compte de l'utilisateur est considéré comme un cas de résolution distribuée de problèmes. L'accent est mis sur les interactions entre les agents dans le but d'intégrer

des données hétérogènes. L'architecture RETSINA et son application à l'information du web dans WebMate [Chen et Sycara, 1998], ainsi que les systèmes BIG [Lesser *et al.*, 2000] et CIA [Dignum, 2000] appartiennent à cette approche.

Cependant, nous estimons que ces deux approches ne sont pas réellement antagonistes, et qu'elles diffèrent essentiellement par la distribution des compétences parmi les agents. La première met l'accent sur les rôles et compétences des agents, mais ces notions peuvent provenir de différents niveaux d'abstraction. En effet, l'analyse du système peut manipuler des rôles et compétences de haut-niveau, le traitement de l'information par exemple, qui peuvent mener à des rôles et compétences multiples à un niveau plus détaillé, tout comme le traitement de l'information peut être divisé en filtrage, fusion d'information et application de préférences, par exemple. Ainsi, ces notions peuvent être encapsulées à un haut-niveau dans les agents, ou être implémentées en tant qu'éléments détaillés à l'usage d'agents de grain plus fin en interaction. La seconde approche met l'accent sur la communication et les ontologies partagées utilisées pour collaborer ou négocier. La réalisation d'un but commun tel que le traitement de l'information résulte d'une coordination des agents, qui peut être réalisée par exemple, par l'échange de plans partiels. Or, la résolution de problème effectuée par un ensemble d'agents en interaction pourrait être vue, à un niveau d'abstraction plus élevé, comme l'action d'un agent de résolution à gros grain.

Nos travaux peuvent être ainsi positionnés selon l'approche fonctionnelle au niveau global, tout en permettant l'utilisation de méthodes de résolution distribuée à un niveau plus fin. Dans un premier temps, une architecture multi-agent et une méthode de personnalisation de l'information ont été proposées dans le cadre de la thèse de C. Petit-Rozé [Petit-Rozé, 2003], puis une méthode de conception de systèmes multi-agents d'information a été proposée dans le cadre de celle de A. Anli [Anli, 2006].

Ces travaux ont aussi fait l'objet des chapitres de livres [Grislin–Le Strugeon et al., 2001] et [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2002], de diverses conférences (voir par exemple [Grislin–Le Strugeon et al., 2006a]) et d'un article de journal [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006]. Ils ont été appliqués au domaine de l'information aux usagers des transports terrestres (rapports [Petit-Rozé et al., 2003], [Anli et al., 2003] et [Grislin–Le Strugeon et al., 2006b]).

4.3.1 Proposition d'une architecture et d'une méthode de personnalisation de l'information

Les travaux présentés en partie 4.2 méritaient d'être poursuivis car un ensemble de points n'avaient pas été abordés, parmi lesquels le problème d'un système incluant plusieurs utilisateurs. En particulier, il est intéressant de pouvoir rendre compte des spécificités de chaque utilisateur (préférences, expérience sur le système, par exemple). La modélisation des préférences a été abordée lors de nouveaux travaux centrés sur la personnalisation des informations à l'aide d'agents.

La personnalisation des informations par des agents est un des points abordés par les thèses de C. Petit-Rozé et de A. Anli, ainsi que par le D.E.A. d'E. Boidin. Elle a

fait l'objet de projets de recherche menés en collaboration avec G. Uster de l'INRETS, avec une application au domaine du transport terrestre de personnes.

La personnalisation de l'information est une problématique induite par le contexte actuel de mise à disposition de grandes masses de données. Il devient en effet important de donner l'information nécessaire et suffisante en réponse à une requête particulière, et non plus de diffuser largement toutes les informations disponibles. La personnalisation de l'information consiste ainsi à délivrer à l'utilisateur de l'information pertinente relativement à ses besoins et préférences [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2001]. La personnalisation de l'information s'applique à de multiples domaines (voir par exemple [Kiss et Quinqueton, 2001] pour la gestion des connaissances dans une entreprise), dont le point commun est le besoin de cibler l'information requise, la filtrer, la trier, etc., afin de répondre le plus précisément possible aux demandes explicites ou supposées des utilisateurs.

La personnalisation se fonde sur une certaine connaissance de l'utilisateur par le système. Des informations peuvent être demandées directement à l'utilisateur, d'autres sont déduites par le système au fur et à mesure des connexions. Les connaissances déduites par le système sont des connaissances incertaines et dynamiques, car « la pertinence de l'information n'est [...] pas une mesure objective » [Bouzeghoub, 2003]. Elle est relative à un utilisateur (ou groupe d'utilisateurs) dans un contexte précis de tâches et de ressources – matérielles, logicielles, temporelles – spécifiques.[Anli *et al.*, 2004b].

Nos travaux concernent l'organisation d'un système multi-agents d'information (SMAI), la modélisation des utilisateurs par des agents logiciels en vue de la génération de solutions personnalisées, et la conception de SMAIs.

4.3.1.1 Architecture du SMAI

A partir des quatre catégories de tâches citées ci-dessus, l'organisation du système multi-agents MAPIS (pour MultiAgent Personalized Information System) proposé dans le cadre de la thèse de C. Petit-Rozé [Petit-Rozé, 2003] est formé de quatre *pools* d'agents regroupés selon leurs compétences. Quatre rôles d'agents ont ainsi été définis (Cf. fig. 4.2) :

- un rôle d'assistance afin d'interagir avec les utilisateurs et de comprendre leurs besoins ;
- un rôle de recherche de données pour récupérer les données nécessaires à chaque requête ;
- un rôle de gestion des profils pour gérer les profils des utilisateurs ;
- un rôle de coordination pour déterminer les solutions personnalisées.

Sur la base de ces équipes spécialisées, les agents se regroupent par flux de travail en fonction des besoins selon le principe évoqué en partie 2.3.5.

Cette architecture a été reprise et détaillée par A. Anli dans sa thèse (voir fig. 4.3).

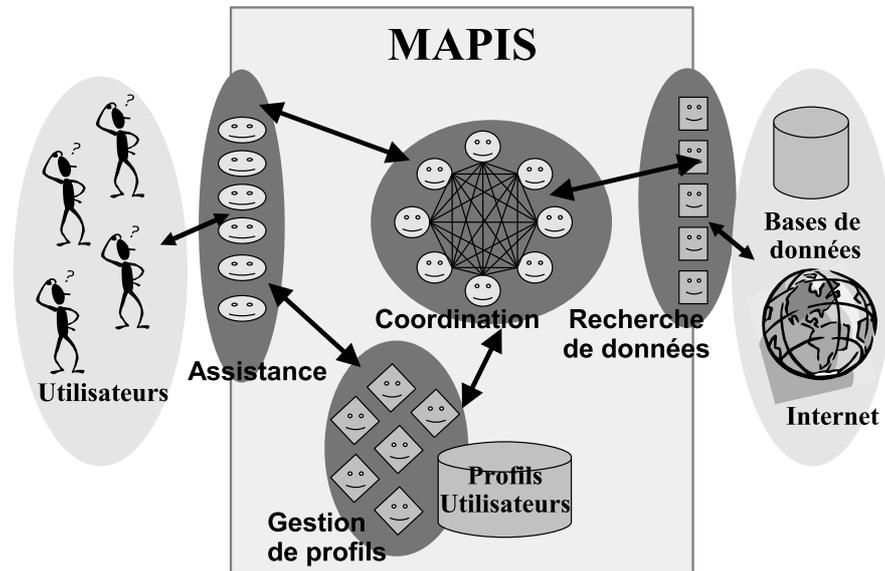


FIGURE 4.2 – architecture de MAPIS (Multi-Agent Personalized Information System) [Petit-Rozé, 2003]

4.3.1.2 Modélisation des utilisateurs

Nous nous sommes intéressés à la modélisation de l'utilisateur par des agents dans le cadre de la personnalisation de l'information.

Lorsque l'agent détecte une différence entre son modèle de l'univers (son environnement et lui-même) et ce qu'il en perçoit, il est nécessaire de mettre en oeuvre une forme d'adaptation. Cette différence peut être due soit à un défaut de perception (perception erronée ou incomplète), soit à un défaut de connaissances (connaissances erronées ou incomplètes), soit à un défaut de modélisation (la perception est mal interprétée). Nous nous sommes focalisés sur le défaut de connaissances, et par conséquent sur l'adaptation des connaissances de l'agent.

La détection du besoin d'adaptation s'effectue de manière individuelle. Dans le système, les agents chargés de la gestion des profils d'utilisateurs possèdent un comportement d'apprentissage, qui leur permet de mettre à jour les profils en fonction des réactions des utilisateurs. En effet, ceux-ci valident ou invalident les propositions de solutions fournies par le système. Les agents mesurent donc la différence entre le comportement prédit et le comportement effectif de l'utilisateur.

La décision concerne le choix des éléments à modifier dans le profil de l'utilisateur, le type de modification et l'amplitude de celle-ci.

La méthode utilisée pour concevoir et gérer les modèles d'utilisateurs combine les cinq catégories de méthodes usuelles (Cf. [Kay, 2001]), à savoir : les questions à l'utilisateur, son observation, l'emploi de stéréotypes, le raisonnement à base de connaissances et la gestion de l'incertain. De fait, certaines données ne peuvent être apprises par le système, elles sont donc demandées directement à l'utilisateur via un questionnaire. Les

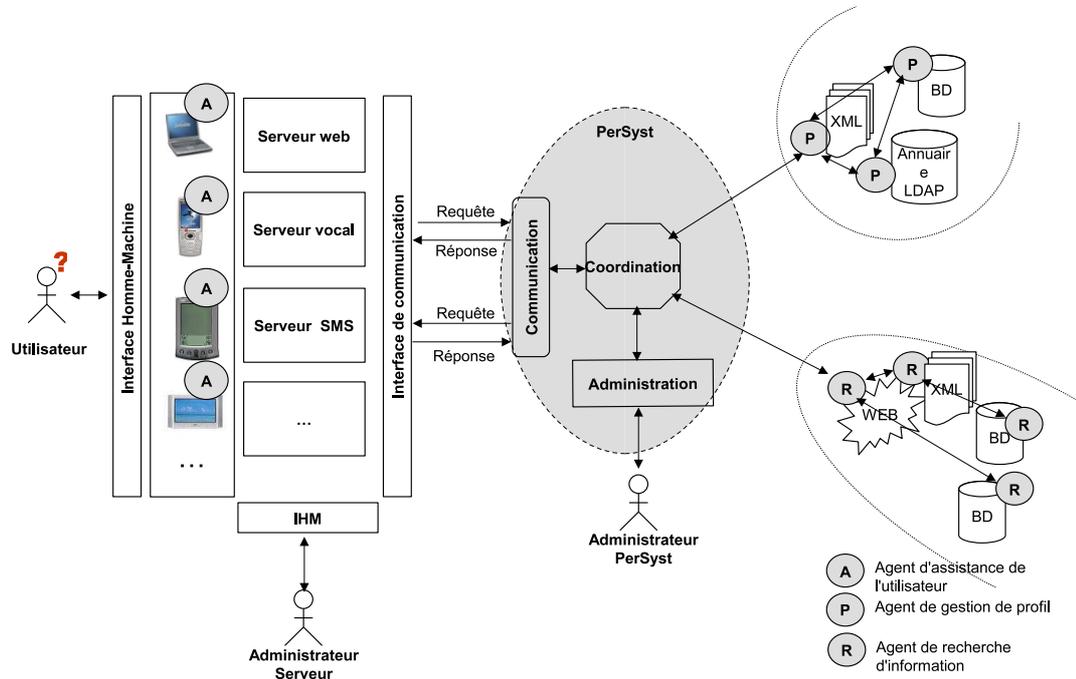


FIGURE 4.3 – architecture de PerSys (*Personalized information system*) [Anli, 2006]

réponses fournies permettent une première (*semi-*)*personnalisation* par la sélection d'un stéréotype d'utilisateur. Ce premier modèle est ensuite enrichi au fil des observations réalisées lors des interactions entre l'utilisateur et le système. L'incertitude vis-à-vis de certaines données est représentée afin de faciliter la prise de décision et l'apprentissage des informations concernant les utilisateurs.

Plus précisément, les utilisateurs sont modélisés de la manière suivante.

Notons \mathcal{D} le domaine du système d'information et \mathcal{D}' , l'ensemble des données contenues dans un formulaire de requête. $\mathcal{D}' \not\subset \mathcal{D}$ mais \mathcal{D}' dépend de \mathcal{D} . En effet, \mathcal{D}' représente la liste des "catégories" de \mathcal{D} . Toutes les catégories ne sont pas nécessairement utilisées lors des requêtes. \mathcal{R} est l'ensemble de toutes les requêtes possibles. Une requête est définie comme un n-uplet tel que : $\forall r \in \mathcal{R}, r = \langle d'_1, d'_2, \dots, d'_n \rangle$ avec $d'_i \in \mathcal{D}'$, et \mathcal{A} , est l'ensemble de tous les résultats possibles. Un élément de cet ensemble correspond à l'ensemble de tous les résultats possibles pour une requête donnée.

Une solution particulière est définie comme étant un k-uplet tel que :

$$\forall a \in \mathcal{A}, a = \{A_j\} \text{ avec } A_j = \langle d_1, d_2, \dots, d_k \rangle \text{ et } d_k \in \mathcal{D}$$

Notons \mathcal{U} l'ensemble des utilisateurs gérés par le système de personnalisation, et \mathcal{Q} l'ensemble des critères et préférences définis dans le but de personnaliser les données (en fonction du domaine d'application).

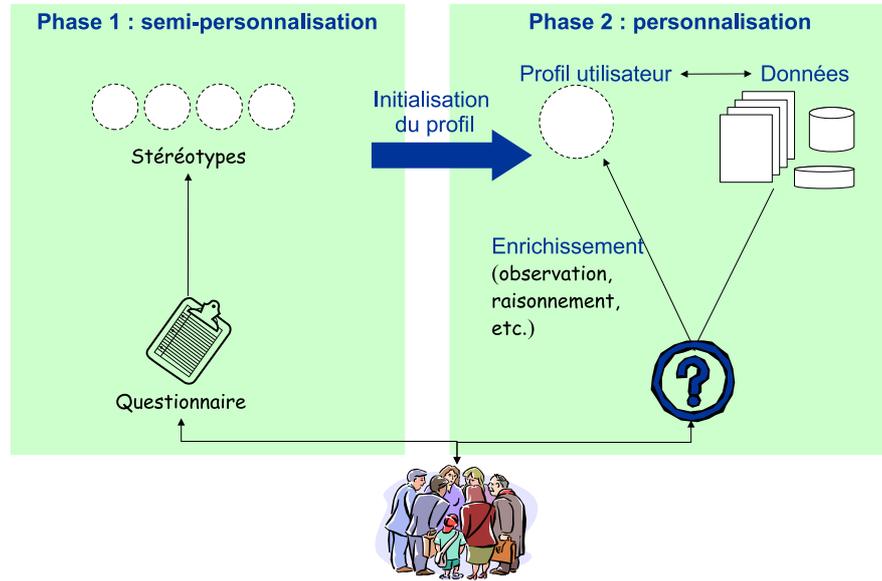


FIGURE 4.4 – Personnalisation des réponses fournies sur la base des modèles d'utilisateurs [Petit-Roze *et al.*, 2003c]

Un utilisateur est défini par son profil. Notons \mathcal{M}_u le profil d'un utilisateur u de \mathcal{U} :

$$\mathcal{M}_u = \mathcal{S}_u \cup \mathcal{P}_u \cup \mathcal{H}_u \text{ avec } \begin{cases} \mathcal{S}_u & \text{l'ensemble des données statiques} \\ \mathcal{P}_u & \text{l'ensemble des données pondérées} \\ \mathcal{H}_u & \text{l'historique de ses requêtes} \end{cases}$$

Les données statiques incluent les informations de type coordonnées, numéros, etc., permettant d'identifier et de prévenir les utilisateurs. Une donnée pondérée est un critère auquel le système associe deux valeurs représentant l'intérêt que porte l'utilisateur sur la prise en compte de ce critère dans ses recherches :

$$\mathcal{P} = \{(x_q, y_q) \mid \forall q \in \mathcal{Q}\} \text{ tel que } \begin{cases} x_q & \text{la valeur importance entre 0 et } \alpha \\ y_q & \text{la valeur validité entre 0 et } \alpha \end{cases}$$

L'historique contient l'ensemble des requêtes résolues : $\mathcal{H} = \{(r, a, u), r \in \mathcal{R}, a \in \mathcal{A}, u \in \mathcal{U}\}$

Posons A_r l'ensemble de toutes les solutions satisfaisant la requête r . Un système d'information "classique" fournira une solution quelconque ; par exemple la première solution trouvée de A_r . Par contre un système personnalisé fournira une solution pertinente pour l'utilisateur en fonction de sa requête, de ses besoins et de ses préférences. Plusieurs méthodes peuvent permettre de déterminer les solutions appropriées, citons par exemple :

- les méthodes de type filtrage cognitif [Salton et McGill, 1983, Krulwich et Burkey, 1997], qui déterminent la meilleure solution en se basant sur le profil de l'utilisateur. Par exemple en utilisant la fonction $\text{coef} : \mathcal{A} \times \mathcal{Q} \rightarrow \mathbb{R}$ qui évalue une solution

a par rapport à un critère donné q et proportionnellement à l'ensemble A_r des solutions possibles :

solution : $\mathcal{R} \times \mathcal{P} \times \mathcal{A} \rightarrow A_r$

$$(r, \mathcal{P}_u, A_r) \mapsto \text{solution}(r, \mathcal{P}_u, A_r) = \max_{a \in A_r} \left\{ \sum_{q \in \mathcal{P}_u} (x_q * y_q * \text{coef}(a, q)) \right\}$$

Une méthode de ce type et applicable au domaine de l'information transport a été étudiée dans le cadre de la thèse de C. Petit-Rozé [Petit-Rozé, 2003].

- les méthodes de type filtrage social [Goldberg *et al.*, 1992, Chau *et al.*, 2003], par exemple par le choix de la solution la plus fréquemment validée :

$$\text{solution}(r, \mathcal{P}_u, A_r) = \max_{a \in A_r} \{ |(r, a)| \in \mathcal{H} \}$$

- une méthode combinant les deux précédentes : si l'utilisateur a un profil permettant de sélectionner la solution la plus pertinente alors la méthode cognitive est appliquée ; dans le cas contraire, ce sera la méthode sociale.

Une méthode de ce type et applicable au domaine de l'information transport a été étudiée dans le cadre du stage de Master Recherche d'E. Boidin [Boidin, 2005].

Ici le besoin d'adaptation correspond à une différence entre le comportement prédit de l'utilisateur et son comportement effectif. En particulier, le système propose des solutions selon l'ordre supposé des préférences de l'utilisateur. La différence apparaît dès lors que l'utilisateur ne choisit pas la première solution proposée, et elle s'accroît parallèlement à l'augmentation du rang de la solution validée : plus la solution choisie est loin dans le classement, plus les connaissances du système ont besoin d'être révisées.

À chaque solution proposée à l'utilisateur, le système attend une validation et enregistre la solution choisie dans l'historique de son profil. La fonction `valid` est une fonction booléenne retournant le choix de l'utilisateur :

valid : $\mathcal{R} \times \mathcal{A} \times \mathcal{U} \rightarrow \text{bool}$

$$(r, a, u) \mapsto \text{valid}(r, a, u) = \begin{cases} \text{true} & \text{si l'utilisateur } u \text{ accepte la solution } a \\ & \text{à la requête } r \\ \text{false} & \text{sinon.} \end{cases}$$

D'une manière générale :

- si l'utilisateur accepte la première solution choisie, cela signifie que le profil reflète correctement le comportement de l'utilisateur. Dans ce cas, cela se représente par un renforcement de la **validité** du profil (les valeurs y_q).
- à l'inverse, si l'utilisateur refuse la solution, cela signifie que le profil ne reflète pas correctement le comportement de l'utilisateur. Dans ce cas les valeurs **importance** (x_q) doivent être modifiées.

Cependant, ce raisonnement peut (et doit) être affiné. Quand un utilisateur refuse une solution, cela ne signifie pas forcément qu'il remet en cause son profil dans son intégralité, mais juste les valeurs associées aux critères représentés par la solution voire

uniquement une partie de ces critères. C'est pourquoi, dans un système de personnalisation, il ne suffit pas de représenter une solution par un ensemble de données mais il faut également représenter une solution comme un ensemble de critères.

La fonction f détermine les critères q satisfaits par une solution a pour un utilisateur u donné : $f(P_u, a) = \{q, q \in \mathcal{Q}\}$. Cette fonction nous permet de définir plus finement les fonctions d'ajustement du profil des utilisateurs. Les deux cas exprimés de manière générale ci-dessus sont déclinés relativement aux critères concernés :

- dès que l'utilisateur valide une solution ($\text{valid}(r, a, u) = \text{true}$), les valeurs associées aux critères satisfaits par cette solution (les critères $q \in f(Q)$) seront renforcées. S'il s'agit de la première solution proposée ($\text{choix}(a, r) = 1$), le renforcement est réalisé sur les valeurs de **validité**; sinon (c'est-à-dire lorsque $\text{choix}(a, r) > 1$), le renforcement s'effectue sur les valeurs **importance** de ces critères.
- de même, si l'utilisateur refuse une solution ($\text{valid}(r, a, u) = \text{false}$), les valeurs **importance** des critères satisfaits par la solution refusée seront modifiées.
- toute modification des valeurs **importance** est associée à une diminution des valeurs **validité** afin de refléter le manque de confiance du système en ces nouvelles valeurs.

La difficulté réside dans l'ajustement des valeurs des critères. Cette tâche revient aux agents **profil**. La fonction de modification du profil d'un utilisateur associée à (P_u, a, r) le nouveau profil \mathcal{P}'_u de l'utilisateur u , dans lequel les valeurs x_q et y_q des critères $q \in f(Q)$ sont remplacées par leurs nouvelles valeurs x'_q et y'_q de la façon suivante (γ étant une constante servant à renforcer ou relâcher un critère)¹ :

$\text{valid}(r, a, u)$	$\text{choix}(a, r)$	x'_q	y'_q
<i>true</i>	1	x_q	$\begin{cases} \alpha \text{ si } y_q = \alpha \\ y_q + \gamma \text{ sinon} \end{cases}$
	> 1	$\begin{cases} \alpha \text{ si } x_q = \alpha \\ x_q + \gamma \text{ sinon} \end{cases}$	$\begin{cases} \alpha/2 \text{ si } x'_q \neq x_q \text{ et } y_q = \alpha \\ y_q - \gamma \text{ si } x'_q \neq x_q \text{ et } 1 < y_q < \alpha \\ y_q \text{ sinon} \end{cases}$
<i>false</i>	-	$\begin{cases} 1 \text{ si } x_q = 1 \\ x_q - \gamma \text{ sinon} \end{cases}$	

Dès que l'utilisateur u valide une solution a à la requête r , le triplet (r, a, u) est ajouté à \mathcal{H}_u . Cependant, l'historique peut contenir des incohérences en raison de facteurs autres que ceux pris en compte par les agents. Ces facteurs caractérisent le contexte [Mucchielli, 2000] de prise de décision de l'utilisateur. Par exemple, le contexte peut représenter l'ensemble des conditions pour lesquelles l'utilisateur a effectué sa demande : une requête peut être faite dans un cadre professionnel, culturel, etc. C'est pourquoi il a été proposé de dupliquer \mathcal{P}_u , afin de refléter les comportements de l'utilisateur relativement à un contexte donné : $\mathcal{P}_u = \bigcup \mathcal{P}_{uc}$, c représentant le contexte.

1. Notons qu'il serait possible de distinguer la valeur de γ utilisée pour x de celle utilisée pour y .

Cette approche a été approfondie au cours de la *thèse de A. Anli*. La prise en compte du contexte a conduit à modifier certains points du modèle. En particulier, les préférences \mathcal{P}_u et l'historique \mathcal{H}_u :

$\mathcal{P}_u = \{(p_1, \alpha_1), (p_2, \alpha_2), \dots, (p_n, \alpha_n)\}$, où p_i est un “type de préférence” (une déclinaison des “critères” dans les travaux précédents, par exemple : « préfère la marche ») et α_i , une fonction déterminant la valeur de p_i selon le contexte (les données de contexte dépendent de p_i). Par exemple, une valeur numérique dépendant de la température, du taux d'humidité et du lieu donnera la préférence de l'utilisateur concernant la marche : $\alpha_i(20, 20, Valenciennes) = 9; \alpha_i(7, 20, Valenciennes) = 2$).

Dans un contexte fixé, nous supposons qu'à chaque type de préférence p_i est associée une valeur numérique V_{u_i} correspondant à la préférence de l'utilisateur u , l'ensemble de ses préférences formant le vecteur V_u .

$\mathcal{H}_u = \{(h_1, \beta_1), (h_2, \beta_2), \dots, (h_n, \beta_n)\}$, où h_i est le type d'action (but, objectif, requête, etc.) souhaitée, et β_i un ensemble de données associée dépendant de h_i . Concernant une action fixée p , les choix de l'utilisateur u seront représentés par B_{u_p} .

Le profil de l'utilisateur est modélisé sur la base des deux hypothèses suivantes :

1. L'ensemble des choix est totalement ordonné suivant les contextes. Pour chaque type d'action h_i , l'ensemble des choix possibles est totalement ordonné et il est possible de déterminer le rang d'un choix (comportement) de l'utilisateur par rapport à un type de contexte c_j^i . β_i est une matrice dont chaque élément représente une valeur de rang par rapport à un type de préférence et un type de contexte.
2. Les préférences sont modélisées suivant les contextes. Pour chaque critère p_i , sa valeur a_i est un vecteur de IR^n dont chaque élément représente une valeur de préférence pour un type de contexte c_j^i . La valeur de a_i est calculée relativement à l'historique de l'utilisateur selon un calcul de moyenne.

Les informations collectées sur l'utilisateur ont été exploitées selon deux méthodes de personnalisation basées sur le filtrage collaboratif.

La première méthode consiste à prédire le comportement de l'utilisateur par comparaison avec les comportements des autres utilisateurs ayant les mêmes préférences pour un contexte donné. Elle se base sur la définition d'une mesure de similarité entre contextes et d'une mesure probabiliste (Bayes), qu'on ne détaillera pas ici (Cf. [Anli, 2006]). Le principe consiste à estimer, par rapport à un type d'action h_i , les probabilités $P(s_u = s_d | V_u)$ qu'un utilisateur u ayant les préférences V_u fasse le choix s_d (avec $1 \leq d \leq k$), connaissant les préférences des autres utilisateurs et leurs choix respectifs. La solution proposée à l'utilisateur est estimée par :

$$s = \max_{s_d} \left(\frac{\text{NbUtilisateurs}(s_d, h_i)}{\text{TotalUtilisateurs}(h_i)} \prod_{p=1}^n \frac{1 + \text{NbUtilisateurs}(V_p = V_{up} | s = s_d)}{n + \text{TotalUtilisateurs}(s_d)} \right)$$

Cette méthode nécessite de déterminer les préférences pertinentes pour l'estimation des comportements des utilisateurs, mais elle permet à des utilisateurs n'appartenant pas aux mêmes domaines d'activités de participer à la recommandation d'un choix.

Ces caractéristiques sont à l'opposé de celles présentées par la seconde méthode. Celle-ci se base sur les comportements passés (l'historique) des utilisateurs et donc sur une mesure de similarité entre deux historiques : on dénombre les utilisateurs ayant la même historique que l'utilisateur u et ayant effectué le type d'action h_i . La solution proposée à l'utilisateur est estimée par (voir [Anli, 2006] pour plus de détails) :

$$s = \max_{s_d} \left(\frac{\text{NbUtilisateurs}(s_d, h_i)}{\text{TotalUtilisateurs}(H_u, h_i)} \prod_{p=1}^n \frac{1 + \text{NbUtilisateurs}(B_p = B_{up} \mid s = s_d)}{n + \text{TotalUtilisateurs}(p, s_d)} \right)$$

Comme c'est le cas de la plupart des méthodes de personnalisation, les avantages et inconvénients des deux méthodes ci-dessus les rendent complémentaires. Nous avons proposé de rendre les agents de profil capables de mettre en oeuvre des méthodes adaptées aux circonstances de la recherche (connaissances des agents sur l'utilisateur, nombre d'utilisateurs dans la base, contenu de la requête) ; ceci a été appliqué dans le cadre du projet MOUVER.PERSO (Cf. partie 4.3.3).

4.3.2 Proposition d'une méthode de développement de SMA d'information

Suite à ces premiers travaux, nous avons voulu tirer profit de notre première expérience relative à la conception de SMA pour les SI pour en extraire quelques éléments méthodologiques. Ceci s'est déroulé dans le cadre de la thèse d'A. Anli [Anli, 2006].

En effet, il apparaît que l'existant est caractérisé, entre autres, par la tendance au développement *ad hoc* pour satisfaire les exigences d'une application spécifique (voir par exemple ce qu'en dit [Montaner *et al.*, 2003] concernant les agents de recommandation sur internet).

Aussi, plutôt que de développer une nouvelle méthode de conception de SMAI, nous proposons de mettre l'accent sur les étapes spécifiques permettant au SMA d'offrir de nouvelles fonctionnalités à un SI existant. Les objectifs sont, d'une part, d'éviter les développements ad-hoc, et d'autre part, de faciliter les modifications du comportement du système pour l'adapter à de nouvelles exigences. De plus, nous nous sommes limités à l'ensemble de fonctionnalités qui concerne la personnalisation de l'information, telle que nous l'avons définie précédemment.

La méthode proposée, appelée *PerMet* (*Personalization Methodology*), a pour but de fournir des services de personnalisation, c'est-à-dire des ensembles de fonctionnalités spécifiques liés à la personnalisation, aux SI en utilisant les capacités d'adaptation d'un SMA. PerMet doit répondre à un double but d'adaptation :

- l'adaptation aux futures modifications du système. En particulier, l'idée est de faciliter les modifications des services fournis par le système. Sa réalisation repose sur les possibilités de réorganisation et d'adaptation du comportement des agents.
- l'adaptation aux SI existants. L'idée est de permettre l'amélioration du comportement des SI existants sans occasionner d'importantes modifications sur ces systèmes.

La caractéristique principale de *PerMet* consiste en la séparation de la partie SMA de celle du SI, de façon à permettre la réutilisation et des modifications indépendantes dans chacun d'elles. La conception est ainsi formée de deux phases parallèles et indépendantes : l'une pour la conception du SI, qui est aussi le point d'entrée du processus, et l'autre pour la conception du SMA. Les deux phases suivent des étapes classiques en génie logiciel, et se rejoignent en une troisième phase, qui intègre les résultats des phases précédentes (voir figure 4.5). Cette phase d'intégration sert à créer les conditions nécessaires au dialogue entre les deux parties du système : connaissance des conditions de demande de service de la part du SI, et de la fourniture des services appropriés de la part du SMA. Enfin, la dernière phase est une phase d'évaluation qui peut mener à réaliser un nouveau cycle de conception. Le processus est itératif et incrémental, chaque cycle est destiné à réaliser une nouvelle fonctionnalité.

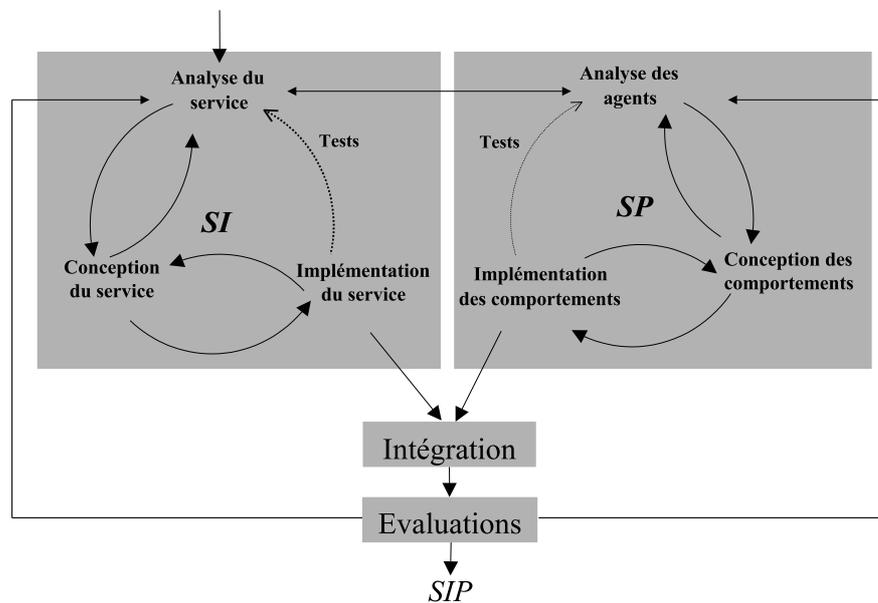


FIGURE 4.5 – Principe général de la méthodologie *PerMet* de conception de SMAI [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2006a].

Comparé aux méthodes orientées agent existantes (voir [Arazy et Woo, 2002] pour une analyse détaillée de celles-ci), l'objectif n'est pas d'étudier comment concevoir des SI sur la base de SMA mais plutôt d'étudier comment un SMA peut être utilisé pour améliorer un SI usuel. Le principe de séparation décrit ci-dessus a pour but de faciliter l'ajout de nouvelles fonctionnalités à des SI existants. Dans le cas d'un SI déjà existant, la conception consiste soit à créer un SMA qui fournira les fonctionnalités de personnalisation, soit de le connecter à un système existant fournissant déjà ces fonctionnalités. De même, l'indépendance des deux parties de la conception permet d'améliorer si besoin le comportement du système en modifiant uniquement les méthodes des agents, à condition qu'aucun changement n'affecte l'interface de communication entre elles.

Toutefois, l'inconvénient de ce principe de séparation se trouve dans les opérations d'intégration qu'elle requiert :

- des premiers échanges doivent être réalisés au niveau des étapes de conception afin de préciser quels types de services sont attendus du côté du SI, et en retour, ceux que le SMA peut réellement offrir ;
- une étape d'intégration est nécessaire pour détailler la communication entre les deux parties. Il ne s'agit pas seulement de mettre en oeuvre les techniques nécessaires à l'échange des données (telles que les services web) mais, plus généralement, de s'assurer que le SI enverra les données nécessaires au SMA et inversement, que les données reçues par le SI répondent aux besoins et pourront être incluses correctement dans le processus d'information.

Enfin, il est important de noter que la méthode ne prétend pas guider le complet développement du SI et du SMA. Elle est focalisée sur les étapes spécifiques à la conception de fonctionnalités de personnalisation en tant qu'améliorations apportées à un SI existant. Le SMA n'est pas réellement développé *ex nihilo* puisqu'un modèle d'organisation est proposé. Le travail du concepteur consiste à adapter les modèles aux exigences d'une application particulière. La notation AUML [Bauer *et al.*, 2001] est utilisée pour décrire le système aux différentes étapes du développement. Seul un stéréotype d'association a été ajouté (le stéréotype « require »), afin de représenter le fait que le comportement d'un agent peut requérir l'exécution d'un autre comportement.

Les étapes spécifiques de conception de la partie SI du système concerne le service qui est ajouté. Notons que la notion de service diffère ici de celle donnée dans la méthodologie Gaia [Wooldridge *et al.*, 2000] par le niveau auquel elle est utilisée. Dans PerMet, un service est défini en tant que fonctionnalité globale fournie par le SMA, alors que dans Gaia, un service est lié à un rôle spécifique. Du côté du SI, le but est d'analyser les exigences particulières liées à la mise en place de ce service, et de permettre son intégration aux éléments existants.

Analyse de service. L'objectif de cette étape est d'analyser les fonctionnalités du système, en prenant en compte les exigences spécifiques des utilisateurs de SI en terme de personnalisation de services. Le résultat de cette analyse est utilisée pour diriger l'étape symétrique d'analyse dans la partie agents de la conception. Les données qui seront échangées entre le SI et le SMA sont également spécifiées. En sortie de cette étape se trouve la spécification du service attendu en prenant en compte les actions de personnalisation réalisées par le SMA.

Conception de service. A partir de la spécification précédente, l'architecture du système est détaillée, des choix techniques sont faits, l'interface utilisateur est conçue, etc. En sortie de cette étape est fourni un ensemble de modèles décrivant les modifications ou développements réalisés côté SI en vue d'intégrer le nouveau service.

Implémentation de service. Durant cette étape, le service est développé selon les modèles conceptuels définis précédemment. Cela inclut également les tests sur ce nouveau service. L'application correspondant au nouveau service est fournie en sortie de cette étape.

La base de l'organisation multi-agent est fournie (voir ci-dessus). Les étapes d'analyse de la méthode consistent en la spécification des rôles dédiés à chacun des modèles d'agents, ainsi qu'en les ajustements dépendants de l'application. La proposition est orientée par l'organisation hiérarchique sous-jacente et le modèle d'interaction décrit précédemment. Le SI, les sources de données et les utilisateurs forment l'environnement du SMA. Les étapes spécifiques à la conception du SMA sont les suivantes.

Analyse des agents. L'objectif de cette étape est de modéliser les agents qui seront utiles à la personnalisation requise. Cela consiste principalement à décrire les tâches du SMA et spécifier les rôles des agents auxquelles elles sont assignées. La spécification doit détailler, pour chaque rôle, les buts, compétences et connaissances des agents. Nous proposons de partir des trois catégories de tâches décrites en partie 4.3.1 : interaction avec les utilisateurs, interaction avec les sources de données et traitement des données. Les prototypes d'agents correspondants sont donnés, le travail consiste à les adapter aux besoins spécifiques du SMAI à réaliser. En sortie de cette étape, la spécification des modèles d'agents est donnée pour le service défini. Lorsque cela semble nécessaire, il est possible de reboucler vers l'étape d'analyse de service afin de proposer des fonctionnalités additionnelles.

Conception de comportement. Cette étape concerne la conception des méthodes et connaissances nécessaires à la réalisation du comportement attendu de la part de chaque modèle d'agent spécifié précédemment. L'objectif est de détailler ce que chaque modèle d'agent est capable de faire et ce qu'il doit connaître pour réaliser sa tâche. Ensuite, les solutions techniques doivent être examinées en fonction de chaque comportement. Les protocoles d'interaction sont écrits. En sortie de cette étape se trouvent les contenus détaillés des agents, la représentation de leurs activités, et les modèles d'interaction entre eux.

Implémentation des comportements. Les comportements sont réalisés et testés durant cette étape. Les agents sont créés et déployés. Le comportement des agents et leur interaction sont testés.

Intégration. Il s'agit de l'étape d'intégration du SI et du SMA afin d'obtenir le SMAI. Le but est de créer les liens nécessaires pour permettre au SI et au SMA de communiquer et d'échanger des données. Nous proposons d'utiliser le paradigme des services web pour générer le lien de communication entre eux. Du côté SI, une application d'interface doit être développée pour rendre possible l'utilisation des services proposés par le SMA.

Evaluation. Lors de cette dernière étape, les évaluations finales sont réalisées, avec une influence possible en retour vers la conception du SI ou du SMA. Il est possible d'envisager trois types d'évaluation : ergonomique, technique ou qualitative. Chacun d'eux peut amener à des modifications des modèles issus des étapes précédentes de conception.

Ce travail fait l'objet d'une partie de la thèse d'A. Anli [Anli, 2006] et a été publié plus particulièrement dans [Anli et al., 2004b, Grislin–Le Strugeon et al., 2006a].

4.3.3 Application

Les propositions précédentes ont été appliquées à la personnalisation de l'information fournie aux usagers des transports terrestres, dans le cadre d'une collaboration avec G. Uster de l'INRETS (équipe ESTAS, Villeneuve d'Ascq). Outre un premier projet, prospectif, financé par le GRRT et ayant pour objectif l'étude de solutions multi-agents dans ce domaine d'application [Petit-Rozé *et al.*, 2001], deux projets ont plus particulièrement été l'occasion de mettre en oeuvre les propositions qui avaient été faites.

Projet AgenPerso

Un premier projet, le projet AgenPerso, financé par le PREDIT, nous a permis d'appliquer l'architecture multi-agents et la méthode de personnalisation proposées en partie 4.3.1. L'application est le prototype d'un système de recherche d'itinéraire combinant plusieurs modes de transport. L'utilisateur fait une demande de recherche d'itinéraire classique ; le système retourne un ensemble de solutions de déplacement multi-modes de transport et classées selon les préférences supposées de l'utilisateur. Un ensemble de points devaient être étudiés, d'ordre institutionnel autant que technologique.

1. la réalisation du système : développement du SMA, création des interfaces homme-machine.
2. l'apprentissage des préférences de l'utilisateur en matière de transport
3. la construction d'un itinéraire à partir de données hétérogènes en provenance des différents exploitants des transports

Le premier point a été abordé sur la base de l'architecture proposée en partie 4.3.1.1, la réalisation ayant été effectuée à l'aide de la plate-forme Madkit (MultiAgent Development Kit)². Les interfaces ont été développées en partenariat avec la société Archimed (Lille).

Concernant le second point, un ensemble de données utiles à stocker et exploiter, spécifiques à l'application, a été défini, comprenant des éléments tels que le lieu de travail de l'utilisateur ou ses handicaps éventuels, l'apprentissage se faisant selon le principe évoqué en partie 4.3.1.2.

Le dernier point n'a pu être étudié en grandeur réelle faute d'accès à des bases de données réelles, cependant il est apparu qu'un effort de démonstration de l'intérêt de tels outils devait être accompli afin d'intégrer les exploitants dans le processus de mise à disposition des données transport.

Ce projet a constitué le support d'application et de validation pour l'architecture de SMA et la méthode de personnalisation de l'information développées par C. Petit-Rozé durant sa thèse [Petit-Rozé, 2003]. Pour plus de détails, voir le rapport [Petit-Rozé *et al.*, 2003].

2. [http : //www.madkit.org](http://www.madkit.org)

The screenshot shows a web browser window displaying the 'MON-SERVICE-TRANSPORT.COM' website. The page is titled 'Mon agenda' and shows the date 'Vendredi 22 Octobre 2004'. The main content area displays a 'Détail du déplacement du : 22/10/2004' for a 'Réunion'. The itinerary includes:

	Heure	Mode	Durée	Prix	Exploitant
Porte des Postes	13:57		19 min	1.30 euros	Transpole
4 Cantons	14:16				
4 Cantons	14:16		14 min	0 euros	
INRETS-GRRT	14:30				

Summary statistics:

- Nombre de correspondance : 2
- Durée totale : 00h33
- Coût total : 1.3 euros

A message states: 'Le SP vous propose cette solution car vous l'avez préférée, la dernière fois'. There are 'Imprimer' and 'Modifier' buttons at the bottom.

Calendar view on the right shows events for the week:

- Lundi 18/10/2004: Rédiger Article (Début à 08:30)
- Mardi 19/10/2004: Préparer l'exposé (Début à 08:30)
- Mardi 19/10/2004: Réunion (Début à 14:30)
- Samedi 23/10/2004: Balade (Début à 14:30)

FIGURE 4.6 – Proposition de solution adaptée aux besoins et préférences de l'utilisateur

Projet Mouver.Perso

Ces travaux ont été poursuivis afin d'offrir un cadre applicatif aux travaux évoqués en partie 4.3.1. La méthode PerMet a été appliquée à la personnalisation d'informations dans le domaine du transport, dans le cadre du projet MOUVER.PERSO financé par le PREDIM (Cf. partie 4.3.2).

Pour ce projet, la personnalisation consiste à recommander des itinéraires adaptés afin de faciliter les déplacements au quotidien des étudiants du Valenciennois. L'application visée est plus exactement un agenda capable de proposer une assistance à la planification liée à l'offre de transport. L'agenda proposé fonctionne par l'intermédiaire de pages oueb (figure 4.6) ainsi que via un PDA (figure 4.7). Son originalité réside en la proposition de solutions de transport correspondant aux rendez-vous planifiés. En effet, l'ajout d'un événement lié à un déplacement, dans l'agenda, déclenche le calcul d'un itinéraire correspondant. De plus, cet itinéraire est choisi en fonction du profil de l'utilisateur enregistré dans le système.

Concernant le SI, l'étape d'analyse des besoins a donné lieu à la définition d'un ensemble de fonctionnalités attendues, détaillant l'objectif initial, et représentées par autant de cas d'utilisation. Chacun d'eux a été précisé lors de l'étape suivante, utilisant une représentation par diagrammes d'activité. Il a été décidé de modifier un agenda



FIGURE 4.7 – Exemple d'ajout d'un événement dans l'agenda MOUVER

existant afin d'intégrer les nouvelles fonctionnalités. Celles-ci ont été développées lors de l'implémentation du service, ainsi que leur application spécifique au support PDA.

Concernant le SMA, l'étape d'analyse a permis de mettre en évidence les compétences que devaient détenir les agents au vu des fonctionnalités attendues, ainsi que la définition des rôles associés. Des précisions quant à l'activité des agents et de leurs compétences ont fait l'objet de l'étape suivante. Ceci a fait ressortir des compétences partagées par plusieurs rôles d'agents, et des compétences utilisant d'autres compétences, ceci étant représenté en utilisant le stéréotype « *require* » défini précédemment.

Des choix ont été faits quant à la méthode de personnalisation à implanter, la solution retenue présente l'originalité de combiner plusieurs méthodes existantes (voir figure 4.8) : lorsque l'utilisateur est inconnu du système, la solution est issue d'un filtrage social (fonction des préférences de tous les autres utilisateurs), sinon elle provient soit du dernier choix réalisé par l'utilisateur sur cette même requête, soit des choix réalisés par les utilisateurs ayant un profil similaire.

La réalisation effective des compétences s'est effectuée lors de l'étape d'implémentation. Le SMA a été développé sur la base de la plate-forme multi-agents Magique [Routier *et al.*, 2001].

Enfin, l'étape d'intégration a vu la mise en oeuvre des moyens nécessaires à l'utilisation par le SI des recommandations fournies par le SMA. Nous avons choisi d'utiliser

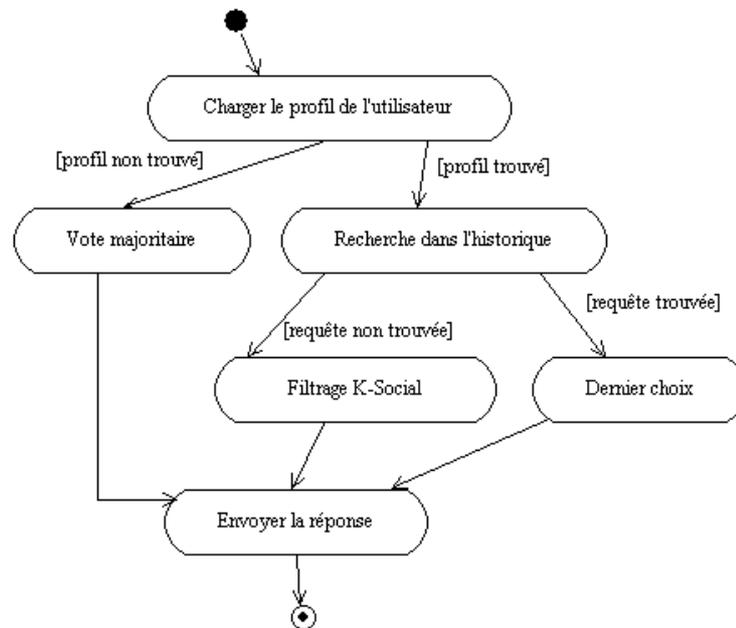


FIGURE 4.8 – Représentation générale de l’activité de personnalisation d’itinéraire des agents de gestion de profil dans MOUVER.

le format SOAP³ pour les échanges entre les différents éléments du système. Nous nous en sommes servis en tant qu’élément d’interfaçage entre l’agenda et le SMA.

Le système a fait l’objet de premières évaluations avec des usagers étudiants et une base de données de test. Les évaluations ont été effectuées selon les points de vue qualitatif (la qualité de la personnalisation réalisée) et quantitatif (la performance globale du SIP, les montées en charge). Les évaluations montrent que les fonctionnalités de personnalisation prévues ont été réalisées (voir l’exemple en tableau 4.2), mais mettent également en évidence les points à améliorer. Ceux-ci concernent en particulier les performances du système développé, qui démontrent un besoin d’optimisation des algorithmes de recherche et de filtrage avant d’envisager un déploiement à plus grande échelle que celle du prototype.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet nous a permis d’appliquer, de valider et d’améliorer l’architecture multi-agents de systèmes d’information Persyst et la méthodologie de conception de systèmes d’information personnalisée PerMet, développées durant la *thèse d’A. Anli* [Anli, 2006]. Pour plus de détails, voir le *rapport* [Grislin–Le Strugeon et al., 2006b].

3. SOAP (Simple Object Access Protocol) est un protocole d’échange entre applications, indépendant de toute plate-forme, et basé sur le langage XML. Il s’agit d’appels de services encadrés par des balises XML et transmis selon le protocole HTTP.

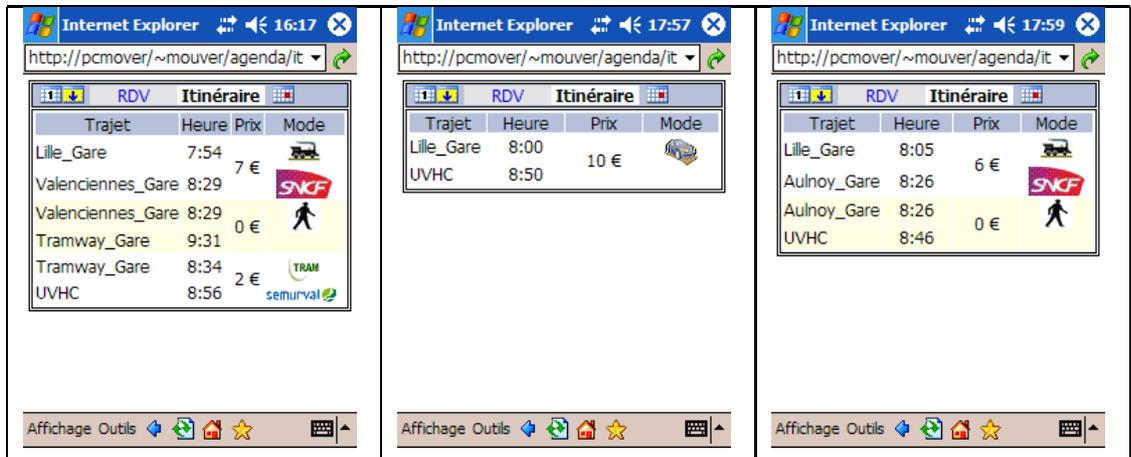


TABLE 4.2 – Itinéraires proposés suite à l’ajout, dans leur agenda, d’un événement identique, par trois utilisateurs aux profils différents.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté nos travaux dans le domaine de la conception de systèmes interactifs orientés agents et à base d’agents.

Concernant les systèmes interactifs orientés agents, nous nous sommes intéressés à la modélisation des interactions de l’interface avec les autres entités agissantes (modules d’assistance, autres interfaces, agents humains) selon un schéma multi-agents.

Concernant les systèmes interactifs à base d’agents, nous avons étudié l’interaction Humain-SMA et les systèmes multi-agents d’information. Dans cette dernière thématique, le travail a concerné en particulier la personnalisation de l’information dans le cadre d’une architecture et d’une méthodologie spécifiques.

Cette thématique a fourni le cadre au co-encadrement de deux thèses et à la participation à plusieurs projets de recherche GRRT et PREDIT.

Conclusion générale et Perspectives

Nous avons abordé la question de la conception de systèmes auto-adaptatifs posée en introduction de ce document selon différents angles d'approche : une approche globale, au niveau du système et des méthodes d'organisation des agents ; une approche unitaire, individuelle, au niveau d'un agent et de ses méthodes de prise de décision ; une approche méthodologique, enfin, qui considère le SMA inclus dans un système interactif.

Adaptation organisationnelle

L'approche système nous a mené à une tentative de modélisation des organisations multi-agents et de leur dynamique. La difficulté consiste à garantir certaines propriétés du système, telles que sa robustesse ou sa fiabilité, sachant qu'il est susceptible de modifier de lui-même son organisation afin de s'adapter aux changements affectant son environnement.

Bien que nous ayons abordé cette thématique dès nos premiers travaux dans le domaine, elle nous semble encore d'actualité pour deux raisons : les tentatives actuelles de standardisation des modèles organisationnels et l'absence, à ce jour et selon nous, de modèle unanimement reconnu de la dynamique organisationnelle dans les SMA. De plus, une analyse proposée par le groupe européen AgentLink [Luck *et al.*, 2005] montre que les technologies basées agents n'en sont qu'aux premières phases de leur diffusion industrielle. Un des freins à la diffusion des approches orientées agents consisterait en la difficulté à établir un équilibre acceptable entre l'adaptabilité des systèmes et le déterminisme de leur comportement. En ce sens, créer un SMA capable d'adapter son organisation présente un intérêt à condition que cela permette d'assurer la persistance de certaines propriétés du système quels que soient les changements qui surviennent dans son environnement ou parmi les agents.

Or, la *formalisation de la dynamique organisationnelle des SMA* me paraît être une des voies qui permettront de mettre en évidence, de façon théorique et non plus expérimentale, certaines propriétés des méthodes d'organisation des SMA. La formalisation d'une stratégie d'organisation a ainsi pour but de vérifier que la méthode utilisée répond à un ensemble de critères, tels que la flexibilité du système, définie en tant que sa capacité à adapter son organisation relativement à un certains événements, ou sa robustesse,

définie par sa capacité à assurer sa fonction indépendamment de l'évolution de son environnement. Nous souhaitons poursuivre dans le sens d'une formalisation qui s'avérerait suffisante pour démontrer les caractéristiques adaptatives, mais aussi les limites, des solutions de changements d'organisation proposées. A cette fin, nous envisageons de préciser la modélisation proposée selon ses aspects statiques et dynamiques.

Modélisation statique

Notre modèle a pour le moment été utilisé afin de décrire un SMA de type holonique dans un objectif de conception de système, mais notre objectif est de le rendre également applicable à l'observation du comportement organisationnel de systèmes émergents. Or, au niveau le plus abstrait du modèle, la définition des rôles est la "clé" permettant de distinguer les modèles d'organisation les uns des autres. C'est pourquoi la définition d'un rôle par ses relations vis-à-vis des autres rôles de l'organisation doit être approfondie. Nous avons évoqué des "types de buts", en distinguant en particulier les buts managériaux : il doit être possible de mettre en évidence un ensemble de buts managériaux élémentaires (tels que "allouer des buts aux détenteurs des autres rôles", "coordonner les actions", "informer", par exemple) pour décrire un rôle en particulier.

De plus, la définition des modes d'interaction entre rôles doit être précisée sur la base de concepts normatifs tels que les "droits et devoirs" relatifs aux rôles correspondants (Cf. groupe D2A2⁴). Ceci permettrait également de préciser la mise en application d'un modèle organisationnel donné au niveau de la structure du SMA, et les ajustements réalisés par rapport à ce modèle considéré en tant que référence.

Modélisation dynamique

Concernant la dynamique organisationnelle du système, deux axes de réflexion sont envisagés.

Le premier axe de recherche envisagé vise à concevoir des agents capables de se réorganiser selon les différents types d'adaptation proposés, à savoir en utilisant différentes possibilités de modifications compositionnelles et structurelles. En effet, comme cela a été évoqué précédemment, la plupart des systèmes ne met en oeuvre qu'une seule de ces possibilités. Un système complètement flexible d'un point-de-vue organisationnel pourrait être capable de choisir la méthode de réorganisation adaptée aux circonstances. Dans ce but, il nous faut déterminer précisément les circonstances réclamant telle ou telle modification organisationnelle. Les étapes envisagées sont :

1. la mise en évidence des types de situations de "non-adéquation" organisationnelle, sur la base des compétences, capacités et buts des agents du système ;
2. la mise en correspondance de ces situations et des différents types de modifications organisationnelles évoqués.

Ce dernier point n'est pas trivial, car il n'existe pas de solution unique face à une situation donnée. Deux pistes nous semblent possibles : la première, basée sur l'analyse,

4. <http://d2a2.emse.fr>

consiste à étudier les avantages et inconvénients de chaque type de modification en fonction des caractéristiques du système en termes de ressources (compétences, temps imparti, par exemple) ; la seconde consiste à permettre aux agents de raisonner sur leur propre organisation, et à les doter de la capacité d'apprendre quelles sont les modifications appropriées.

Le second axe de recherche envisagé concerne la représentation de la dynamique organisationnelle. En particulier, la notation temporelle utilisée rend difficilement compte de la durée des actions de réorganisation : les états intermédiaires, lorsque la modification de l'organisation est en cours de réalisation, ne sont pas représentés.

Adaptation comportementale individuelle

L'approche agent a été centrée sur la résolution du problème de la sélection d'action à l'aide de votes, avec une application en navigation autonome. Comme précédemment, la difficulté consiste à garantir certaines propriétés du système, par exemple le respect de contraintes ou l'atteinte d'objectifs, tout en autorisant une forme d'autonomie comportementale nécessaire à l'évolution de l'agent en milieu dynamique.

Simulation de piétons

A moyen terme, nos perspectives dans cette thématique concernent l'amélioration de la solution proposée, en vue de revenir à l'objectif initial de simulation de piétons. L'approche par mécanisme de vote proposée possède des atouts indéniables, principalement dûs à la dynamique de l'espace d'actions et l'absence de pondération. Toutefois, le caractère essentiellement réactif du modèle comportemental développé ne s'accorde pas totalement à l'objectif de simulation de piéton qui est visé. Doté de comportements plus complexes, autorisant certaines formes d'anticipation par exemple, le modèle gagnerait certainement en réalisme. Les travaux initiés dans le sens de son intégration au sein d'une architecture hybride constituent une première contribution à cet objectif. De plus, la participation au groupe de travail COPIE⁵ nous permet d'envisager de poursuivre les collaborations dans le cadre de la simulation de piétons.

Méthode de sélection d'action

A plus long terme, l'objectif est de définir plus précisément les caractéristiques du mécanisme de vote proposé, la problématique de la granularité des comportements et de leur indépendance vis-à-vis du domaine d'application. En effet, il reste du travail à faire afin de montrer plus formellement l'intérêt et les limites de la méthode de sélection d'action proposée. De plus, l'objectif d'obtention de comportements de grain équivalent n'est pas totalement atteint, et il convient d'étudier le mécanisme de génération de comportements dans d'autres domaines d'application.

Enfin, comme ce qui concerne l'organisation au niveau collectif, la *sélection d'action* peut faire l'objet d'un méta-traitement de la part des agents au niveau individuel. En

5. <http://pfi-copie.inrets.fr>

effet, la problématique du comportement global résultant des interactions élémentaires se retrouve de façon similaire au sein du système et au sein de l'architecture d'un agent. Celle-ci comporte une organisation (de type communautaire) et un mécanisme de coordination (par le vote). La méthode d'organisation n'évolue pas mais l'environnement change, ainsi que les membres du groupe (les comportements composant l'architecture). Pourquoi ne pas mettre à profit les descriptions réalisées au niveau du SMA, mais cette fois au niveau de l'agent ? Le but est, lui aussi, similaire : il s'agit de s'affranchir, à terme, des contraintes inhérentes aux validations uniquement expérimentales.

Conception de systèmes interactifs à base d'agents

L'approche méthodologique a porté sur l'étude de la conception de systèmes d'information à base d'agents et sur la prise de décision dans le système humain-SMA.

Systeme multi-agents d'information

Concernant les systèmes multi-agents d'information, l'architecture et la méthodologie proposées pourraient être complétées par la création d'un outil de développement de tels systèmes (couplé à un atelier de génie logiciel existant par exemple), ainsi que par la fourniture d'une bibliothèque de comportements dédiés à la personnalisation de l'information. Une méthode permettant de modifier, en ligne mais manuellement, la compétence de personnalisation utilisée par les agents de profil a également été proposée dans la thèse d'A. Anli. Il est envisageable d'aller plus loin, en particulier vers l'adaptation autonome du comportement de ces agents en fonction des connaissances acquises, des réponses des utilisateurs et des contextes.

Interaction Humain-SMA

Concernant la prise de décision dans le système Humain-SMA, la difficulté est, de nouveau, liée au comportement d'un système constitué des éléments autonomes que sont le SMA et l'utilisateur. La prise en compte de l'utilisateur dans la conception de SMA reste et restera l'une de nos préoccupations. A ce titre, la collaboration avec des collègues issus des domaines des IHM et de la coopération Humain-Machine s'est révélée fructueuse. C'est, selon moi, la démarche qui doit être suivie concernant la conception de systèmes interactifs basés ou orientés SMA.

En outre, la formalisation de la dynamique organisationnelle et l'introduction des concepts normatifs dans la modélisation offrent des perspectives concernant les interactions Humain-SMA. Ils permettraient en effet de représenter des changements de comportements relatifs au schéma organisationnel initial. Dans le contexte de l'aide à la décision en particulier, un champ d'investigation commun serait la modélisation des organisations émergentes issues de la co-adaptation humain/système à base d'agents. Ce type d'approche pourrait par exemple être utilisée dans un but de conception participative de systèmes. Le projet ANR TTT (Table d'interaction avec des objets Tangibles

et Traçables) en cours de démarrage pourra offrir le cadre à une première étude en ce sens.

Par ailleurs, les études orientées Génie Logiciel nous ont montré qu'elles offraient, entre autres, l'intérêt de contribuer à la diffusion des solutions multi-agents en direction du monde industriel, par le biais des projets et contrats qui s'y rattachent.

Pour conclure, quelle que soit l'approche prise, la difficulté en conception de systèmes formés d'agents autonomes (plus précisément : présentant certaines formes d'autonomie) reste le couplage entre les niveaux microscopique et macroscopique. Cette problématique est cruciale dans l'environnement informatique actuel et, sans doute, futur. Or, si le domaine des SMA fournit des éléments de réponse à cette problématique, il reste un vaste champ de recherche des moyens permettant de concilier l'autonomie d'une part, et les nécessités de prédiction, validation et vérification du comportement issu des interactions des agents d'autre part.

Références

- [Adam, 2000] ADAM, E. (2000). *Modèle d'organisation multi-agent pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprise : application aux systèmes administratifs complexes*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Adam et Mandiau, 2005b] ADAM, E. et MANDIAU, R. (2005b). Roles and hierarchy in multi-agent organizations. In *Proceedings of Multi-Agent Systems and Applications IV, 4th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems, CEEMAS 2005*, volume LNAI-3690, pages 539–542. Springer-Verlag.
- [Aebischer et Oberle, 1990] AEBISCHER, V. et OBERLE, D. (1990). *Le groupe en psychologie sociale*. Dunod, Paris.
- [Agimont, 1996] AGIMONT, G. (1996). *Modélisation et simulation des organisations multi-agents*. Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons.
- [Agimont et al., 1995] AGIMONT, G., GRISLIN-LE STRUGEON, E. et LIBERT, G. (1995). Self organizing agents using petri nets. In *7th International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems Applications (Expersys)*, San Francisco, USA.
- [Agimont et al., 1996] AGIMONT, G., GRISLIN-LE STRUGEON, E., MANDIAU, R. et LIBERT, G. (1996). Parameterized petri nets for organizational simulation and systems design. In *COOP'96 Second International Conference on the design of cooperative systems*, pages 261–277, INRIA, Rocquencourt.
- [Anli, 2006] ANLI, A. (2006). *Méthodologie de développement des systèmes d'information personnalisés - Application à un système d'information au service des usagers des transports terrestres de personnes*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Anli et al., 2003] ANLI, A., ABED, M., GRISLIN-LE STRUGEON, E. et KOLSKI, C. (2003). Méthodologie de conception et d'évaluation de système d'information au service des usagers dans les transports collectifs. Rapport de convention LAMIIH-ARCHIMED, LAMIIH, Valenciennes.
- [Anli et al., 2005b] ANLI, A., GRISLIN-LE STRUGEON, E. et ABED, M. (2005b). Une plate-forme de personnalisation basée sur une architecture multi-agents. *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information (RNTI-E)*, (5):95–100.

- [Anli *et al.*, 2004b] ANLI, A., PETIT-ROZÉ, C. et GRISLIN-LE STRUGEON, E. (2004b). Plate-forme d'intégration de services personnalisés à base d'agents logiciels. *Génie Logiciel*, 71:34–39.
- [Arazy et Woo, 2002] ARAZY, O. et WOO, C. (2002). Analysis and design of agent-oriented information systems. *Knowledge Engineering Review*, 17(3):215–260.
- [Arkin, 1998] ARKIN, R. (1998). *Behavior-based robotic*. The MIT Press.
- [Arnaud, 2000] ARNAUD, P. (2000). *Des Moutons et des robots*. Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- [Aubert *et al.*, 2003] AUBERT, G., CHARRON, C., JUNG, S., GRANIÉ, M., GRISLIN-LE STRUGEON, E., LEPOUTRE, F. et PUDLO, P. (2003). RES-RFI. Rapport final du projet PREDIT RESPECT.
- [Avila-Garcia *et al.*, 2003] AVILA-GARCIA, O., CANAMERO, L. et TE BOEKHORST, R. (2003). *Analyzing the Performance of Winner-Take-All and Voting-Based Action Selection Policies within the Two-Resource Problem*, volume Lecture Notes in Computer Science 2801, pages 733–742. Springer Verlag.
- [Bauer *et al.*, 2001] BAUER, B., MULLER, J. et ODELL, J. (2001). *Agent UML : a formalism for specifying multiagent interaction*, pages 91–103. Springer.
- [Bernon *et al.*, 2004] BERNON, C., COSSENTINO, M., GLEIZES, M., TURCI, P. et ZAMBONELLI, F. (2004). A study of some multi-agent metamodels. *In Agent-Oriented Software Engineering V : 5th International Workshop, AOSE 2004*, volume Lecture Notes in Computer Science 3382, pages 62–77. Springer Verlag.
- [Boidin, 2005] BOIDIN, E. (2005). Apprentissage automatique pour la personnalisation : Application aux transports terrestres de personnes. Rapport technique, Rapport de Master Recherche, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Bouzeghoub, 2003] BOUZEGHOUB, M. (2003). Action Spécifique sur la personnalisation de l'information. Rapport technique, CNRS-1S98/RTP9.
- [Brooks, 1986] BROOKS, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2:14–23.
- [Bryson, 2000] BRYSON, J. (2000). Cross-paradigm analysis of autonomous agent architecture. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence (JETAI)*, 12(2):165–189.
- [Camps, 1998] CAMPS, V. (1998). *Vers une théorie de l'auto-organisation dans les systèmes multi-agents basée sur la coopération - Application à la recherche d'information dans un système d'information réparti*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [Capera *et al.*, 2003] CAPERA, D., GEORGÉ, J., GLEIZES, M. et GLIZE, P. (2003). The AMAS Theory for Complex Problem Solving Based on Self-organizing Cooperative Agents . *In 1st Int. Workshop on Theory And Practice of Open Computational Systems@WETICE 2003, Linz, Austria*. IEEE CS.
- [Carabelea *et al.*, 2003] CARABELEA, C., BOISSIER, O. et FLOREA, A. (2003). Autonomie dans les systèmes multi-agents : tentative de classification. *In Actes des 11èmes*

- Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*, Hammamet, Tunisie.
- [Carley et Gasser, 1999] CARLEY, K. M. et GASSER, L. (1999). Computational organization theory. In WEISS, G., éditeur : *Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, pages 299–330. MIT Press.
- [Cassell et Vilhjálmsson, 1999] CASSELL, J. et VILHJÁLMSOON, H. (1999). Fully embodied conversational avatars : Making communicative behaviors autonomous. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2(1):45–64.
- [Castelfranchi et al., 1993] CASTELFRANCHI, C., CESTA, A., MICELI, M. et CONTE, R. (1993). *Advances in Artificial Intelligence*, chapitre Foundations for interaction : The dependence theory. P. Torasso ed. Springer-Verlag.
- [Castro et al., 2000] CASTRO, J., KOLP, M. et MYLOPOULOS, J. (2000). Tropos : Toward agent-oriented information systems engineering. In *2nd Int. Bi-Conference W. on Agent-Oriented Information Systems AOIS 2000*.
- [Chandrasekaran et Johnson, 1993] CHANDRASEKARAN, B. et JOHNSON, T. (1993). Generic tasks and task structures : history, critique and new directions. In *Proceedings of Second generation expert systems*, pages 232–271. Springer-Verlag.
- [Chau et al., 2003] CHAU, M., ZENG, D., CHEN, H., HUANG, M. et HENDRIAWAN, D. (2003). Design and evaluation of a multi-agent collaborative web mining system. *Decision Support Systems*, 35(1):167–183.
- [Chen et Sycara, 1998] CHEN, L. et SYCARA, K. (1998). Webmate : A personal agent for browsing and searching. In *Proceedings of AGENTS'98*, pages 132–139. ACM Publishers.
- [Chevaleyre et al., 2007] CHEVALEYRE, Y., ENDRISS, U., LANG, J. et MAUDET, N. (2007). A short introduction to computational social choice. In *Proceedings of the 33rd Conf. on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM-2007)*.
- [Crow et Shadbolt, 1998] CROW, L. et SHADBOLT, N. (1998). Imps - internet agents for knowledge engineering. In GAINES, B. et MUSEN, M., éditeurs : *Proc. of the 11th Workshop on Knowledge Acquisition, Modelling and Management*. SRDG Publ., Calgary.
- [Decker et Sycara, 1997] DECKER, K. et SYCARA, K. (1997). Intelligent adaptive information agents. *Journal of Intelligent Information Systems*, 9:239–260.
- [Deloach et al., 2007] DELOACH, S., OYENAN, W. et MATSON, E. (2007). A capabilities based theory of artificial organizations. *Journal of Autonomous Agents and Multiagent Systems*, to appear.
- [Devillers et al., 2002] DEVILLERS, F., DONIKIAN, S., LAMARCHE, F. et TAILLE, J. (2002). A programming environment for behavioural animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 13:263–274.
- [Dignum, 2000] DIGNUM, F. (2000). *Agent Communication and Cooperative Information Agents*, volume LNCS-1860, pages 191–207. Berlin : Springer-Verlag.

- [Dignum *et al.*, 2005a] DIGNUM, V., DIGNUM, F., FURTADO, V., MELO, A. et SONENBERG, L. (2005a). Towards a simulation tool for evaluating dynamic reorganization of agent societies. *In Proc. of the workshop on Socially Inspired Computing@AISB Convention, Hatfield, England.*
- [Dignum *et al.*, 2004] DIGNUM, V., DIGNUM, F. et SONENBERG, L. (2004). Towards dynamic reorganization of agent societies. *In Proc. of CEAS workshop on Coordination in Emergent Agent Societies @ECAI 2004, Valencia, Spain.*
- [Dignum *et al.*, 2005b] DIGNUM, V., VÁZQUEZ-SALCEDA, J. et DIGNUM, F. (2005b). *OMNI : Introducing Social Structure, Norms and Ontologies into Agent Organizations*, volume LNCS-3346, pages 181–198. Berlin : Springer-Verlag.
- [Drogoul et Ferber, 1992] DROGOUL, A. et FERBER, J. (1992). Multi-agent simulation as a tool for modeling societies : Application to social differentiation in ant colonies. *In Proceedings of MAAMAW'92, Viterbo.*
- [Faci *et al.*, 2006] FACI, N., GUESSOUM, Z. et MARIN, O. (2006). Dimax : A fault-tolerant multi-agent platform. *In 5th Int. W. on Software Engineering for Large-Scale Multi-Agent Systems (SELMAS'06), May, Shanghai, China.*
- [Ferber, 1995] FERBER, J. (1995). *Les systèmes multi-agents*. Interéditions.
- [Ferber et Gutknecht, 1998] FERBER, J. et GUTKNECHT, O. (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. *In DEMAZEAU, Y., éditeur : Proc. 3rd Int. Conf. on Multi-Agent Systems*, pages 128–125. IEEE, Paris.
- [Ferber *et al.*, 2004] FERBER, J., GUTKNECHT, O. et MICHEL, F. (2004). *From Agents to Organizations : an Organizational View of Multi-agent Systems.*, volume LNCS 2935, pages 214–230. P. Giorgini, J.P. Müller and J. Odell (eds.). Springer-Verlag.
- [FIPA : Foundation for Intelligent Physical Agents, 2002] FIPA : FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS (2002). Fipa iterated contract net interaction protocol specification. Rapport technique, Document SC00030H. Available at : <http://www.fipa.org/specs/fipa00030/SC00030H.pdf>.
- [Fox, 1981] FOX, M. (1981). An organizational view of distributed systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 11(1):70–79.
- [Fuxman *et al.*, 2004] FUXMAN, A., LIU, L., MYLOPOULOS, J., PISTORE, M., ROVERI, M. et TRAVERSO, P. (2004). Specifying and analyzing early requirements in tropos. *Requirements Engineering Journal*, 9(2):132–150.
- [Gasser, 1992] GASSER, L. (1992). An overview of dai, distributed artificial intelligence : Theory and praxis. *In AVOURIS et GASSER, éditeurs : Eurocourses*, pages 9–30. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [Gasser et Ishida, 1991] GASSER, L. et ISHIDA, T. (1991). A dynamic organizational architecture for adaptive problem solving. *In AAAI*, pages 185–190.
- [Georgeff et Lansky, 1987] GEORGEFF, M. et LANSKY, A. (1987). Reactive reasoning and planning. *In Proc. of AAAI-87*, pages 677–682, Seattle, WA.
- [Gleizes et Glize, 2002] GLEIZES, M. et GLIZE, P. (2002). Abrose : Multi agent systems for adaptive brokerage. *In Proc. AOIS-2002@CAISE'02*, Toronto, Canada.

- [Goldberg *et al.*, 1992] GOLDBERG, D., NICHOLS, D., OKI, B. et TERRY, D. (1992). Using collaborative filtering to weave an information tapestry. *Communications of the ACM*, 35:61–70.
- [Gracanin *et al.*, 1994] GRACANIN, D., SRINIVASAN, P. et VALAVANIS, K. (1994). Parameterized petri nets and their application to planning and coordination in intelligent systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24:1483–1497.
- [Grislin–Le Strugeon, 1995] GRISLIN–LE STRUGEON, E. (1995). Une méthodologie d’auto-adaptation d’un système multi-agents cognitifs. Mémoire de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Grislin–Le Strugeon, 2007] GRISLIN–LE STRUGEON, E. (2007). Modélisation de l’adaptation organisationnelle dans les systèmes multi-agents. *Revue d’Intelligence Artificielle, Numéro spécial Modèles multi-agents pour des environnements complexes*, 21(sous presse).
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2001] GRISLIN–LE STRUGEON, E., ADAM, E. et KOLSKI, C. (2001). Agents intelligents en interaction homme-machine dans les systèmes d’information. In *Environnements évolués et évaluation de l’IHM. Interaction Homme-machine pour les SI*, volume 2, pages 209–248. Hermès, Paris, C. Kolski édition.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1996a] GRISLIN–LE STRUGEON, E., AGIMONT, G., MANDIAU, R. et MILLOT, P. (1996a). Organisation évolutive d’un système multi-agents. Illustration par des agents-robots miniers. In *I.A. Distribuée et systèmes multi-agents*, pages 167–176. Hermès, Paris.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2006a] GRISLIN–LE STRUGEON, E., ANLI, A. et ADAM, E. (2006a). A methodology to bring mas to information systems. In *CAISE’06 The 18th International Conference on Advances Information Systems Engineering*, pages 64–75, Luxembourg. Presses Universitaires de Namur.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2006b] GRISLIN–LE STRUGEON, E., ANLI, A., PETIT-ROZÉ, C., SOUI, M., CONREUR, G., SANTOS, P. D., ABED, M., KOLSKI, C., USTER, G., WALBECQ, O. et ZIDI, M. (2006b). MOUVER.PERSO : MObilité et mUltimodalité Voyageurs Etudiants en Région Nord Pas de Calais - Système d’information multimodale personnalisée. Rapport final de projet PREDIT, LAMIH, Valenciennes.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1995] GRISLIN–LE STRUGEON, E., GRISLIN, M. et MILLOT, P. (1995). Toward the application of multiagent techniques to the design of human-machine systems organizations. In *6th IFAC Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, MIT, USA.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2005] GRISLIN–LE STRUGEON, E., HANON, D. et MANDIAU, R. (2005). Behavioral self-control of agent-based virtual pedestrians. In *Advanced Distributed Systems : 5th International School and Symposium, ISSADS 2005, Revised Selected Papers*, volume 3563 de *Lectures Notes in Computer Science*, pages 529–537. Springer-Verlag, Heidelberg, F.F. Ramos, V. Larios Rosillo and H. Unger édition.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 2002] GRISLIN–LE STRUGEON, E., HANON, D., PUDLO, P. et LEPOUTRE, F. (2002). Agent-based modelling of autonomous virtual humans.

- In Proceedings of 5th International Conference Computer Graphics and Artificial Intelligence (3IA'2002)*, pages 170–174, Limoges, France. Diazo1, Clermont-Ferrand.
- [Grislin–Le Strugeon et Mandiau, 1994] GRISLIN–LE STRUGEON, E. et MANDIAU, R. (1994). Adaptation organisationnelle d'un système multi-agents en fonction de la tâche courante. *In 2èmes Rencontres Nationales des Jeunes Chercheurs en I.A.*, Marseille, France.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994a] GRISLIN–LE STRUGEON, E., MANDIAU, R. et LIBERT, G. (1994a). Towards a dynamic multiagent organization. *In Methodologies for Intelligent Systems*, volume 869 de *Lectures Notes in AI*, pages 203–213. Springer-Verlag, Heidelberg, Z.W. Ras and M. Zemankova édition.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994b] GRISLIN–LE STRUGEON, E., MANDIAU, R. et MILLOT, P. (1994b). A multiagent organizational adaptation. *In Canadian Workshop on DAI*, Banff, Canada.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1994c] GRISLIN–LE STRUGEON, E., MANDIAU, R. et MILLOT, P. (1994c). Representation for an organization in a multiagent world. *In IFAC Conference on integrated systems engineering*, pages 41–46, Baden-Baden, Germany.
- [Grislin–Le Strugeon et Millot, 1999] GRISLIN–LE STRUGEON, E. et MILLOT, P. (1999). Specifying artificial cooperative agents through a synthesis of several models of cooperation. *In Proceedings of the 7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control CSAPC'99*, pages 73–78, Villeneuve d'Ascq, France. Presses Universitaires de Valenciennes, Valenciennes.
- [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 1998] GRISLIN–LE STRUGEON, E. et PÉNINOÙ, A. (1998). Interaction Homme-SMA : réflexion et problématiques de conception. *In Systèmes multi-agents, de l'interaction à la socialité. Actes des JFIADSMA '98*, pages 133–146. Hermès, Paris.
- [Grislin–Le Strugeon et Péninou, 2001] GRISLIN–LE STRUGEON, E. et PÉNINOÙ, A. (2001). Interaction with agents systems : problematics and classification. *In Usability evaluation and Interface design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, volume 1, pages 479–483. Lawrence Erlbaum Associate Publishers, London.
- [Grislin–Le Strugeon *et al.*, 1996b] GRISLIN–LE STRUGEON, E., TENDJAOUI, M., MANDIAU, R. et KOLSKI, C. (1996b). Intelligent agents concepts for computer-supported collaborative work systems in complex industrial systems - research directions. *In COOP'96 Second International Conference on the Design of Cooperative Systems*, pages 331–344, INRIA, Rocquencourt. Hermès, Paris.
- [Gruer *et al.*, 2002] GRUER, P., HILAIRE, V., KOUKAM, A. et CETNAROWICZ, K. (2002). A formal framework for multi-agent systems analysis and design. *Expert Syst. Appl.*, 23(4):349–355.
- [Hannoun *et al.*, 1999] HANNOUN, M., BOISSIER, O., SICHMAN, J. et SAYETTAT, C. (1999). Moïse : Un modèle organisationnel pour la conception de systèmes multi-agents. *In Ingénierie des systèmes multi-agents et applications - Actes des JFIADSMA '99*, pages 105–118. Hermès.

- [Hannoun *et al.*, 2000] HANNOUN, M., BOISSIER, O., SICHMAN, J. et SAYETTAT, C. (2000). *Moise : An organizational model for multi-agent systems*, pages 156–165. Springer.
- [Hannoun *et al.*, 1998] HANNOUN, M., SICHMAN, J. S., BOISSIER, O. et SAYETTAT, C. (1998). *Dependence Relations between Roles in a Multi-Agent System : Towards the Detection of Inconsistencies in Organization*, volume LNCS 1534, pages 169–182. Springer-Verlag.
- [Hanon, 2002] HANON, D. (2002). Génération de comportements autonomes pour la simulation de piétons virtuels. Rapport de D.E.A., Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Hanon, 2006] HANON, D. (2006). Agents intelligents pour la simulation de personnages virtuels : application à la sécurité du piéton enfant. Mémoire de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Hanon et Grislin–Le Strugeon, 2007] HANON, D. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (2007). Sélection d’actions en environnement continu et dynamique par vote de comportements. *In Systèmes Multi-Agents - Modèles de comportements. Actes des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA) 2007*, pages 223–231, Carcassonne. Cépaduès éd.
- [Hanon *et al.*, 2003] HANON, D., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et MANDIAU, R. (2003). A behavior based architecture for the control of virtual pedestrians. *In The second International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems CIRAS 2003*, pages 125–132, Singapore. CIC, University of Singapore.
- [Hanon *et al.*, 2005] HANON, D., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et MANDIAU, R. (2005). A behaviour based decisional model using vote. *In Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation - CIMCA’2005 (28-30 November 2005, Vienna, Austria)*. IEEE Computer Society.
- [Hanon *et al.*, 2006] HANON, D., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et MANDIAU, R. (2006). Un modèle décisionnel orienté comportement utilisant le vote, application à la navigation autonome en environnement simulé. *In Actes de RFIA 2006 15ème congrès francophone Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle (25-27 janvier 2006, Tours)*, Tours. Presses Universitaires François-Rabelais.
- [Hoc, 1996] HOC, J. (1996). *Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique*. P.U.G, Grenoble, Collection Sciences & Technologie de la connaissance.
- [Hoc et Lemoine, 1994] HOC, J. et LEMOINE, M. (1994). Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in air traffic control. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(1):1–32.
- [Horling et Lesser, 2005a] HORLING, B. et LESSER, V. (2005a). A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 19(4):281–316.

- [Hostetler et Karrney, 2002] HOSTETLER, T. et KARRNEY, J. (2002). Strolling down the avenue with a few close friends. *In Eurographics Ireland 2002 Workshop Proceedings*, pages 7–14, Dublin, Ireland.
- [Ishida *et al.*, 1992] ISHIDA, T., GASSER, L. et YOKOO, M. (1992). Organization self-design of distributed production systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 4(2):123–184.
- [Kay, 2001] KAY, J. (2001). *User Modeling for Adaptation*, pages 271–294. Lawrence Erlbaum Associates.
- [Kiss et Quinqueton, 2001] KISS, A. et QUINQUETON, J. (2001). Learning user preferences in multi-agent system. *In CEEEMAS*, pages 169–178.
- [Klusck, 2001] KLUSCH, M. (2001). Information agent technology for the internet : A survey. *Data and Knowledge Engineering*, 36:337–372.
- [Kolski et Grislin–Le Strugeon, 1998] KOLSKI, C. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (1998). A review of intelligent human-machine interfaces in the light of the arch model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3):193–231.
- [Kolski *et al.*, 2004a] KOLSKI, C., GRISLIN–LE STRUGEON, E., ADAM, E. et MATHIEU, P. (2004a). Conception des systèmes multi-agents : pistes de réflexion en vue de futures coopérations entre ergonomes et informaticiens. *In BASTIEN, C., LUCONG-SANG, R. et POULAIN, G., éditeurs : Actes du congrès ERGO-IA '2004 : Ergonomie et Informatique Avancée*, pages 147–154, ESTIA, Biarritz.
- [Kolski *et al.*, 1993] KOLSKI, C., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et TENDJAOU, M. (1993). Implementation of AI techniques for intelligent interface development. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 6(4):295–305.
- [Krulwich et Burkey, 1997] KRULWICH, B. et BURKEY, C. (1997). The InfoFinder agent : Learning User Interests through Heuristic Phrase Extraction. *IEEE Expert : Intelligent Systems and their Applications*, 12(5):22–27.
- [Laird et Rosenbloom, 1996] LAIRD, J. et ROSENBLOOM, P. (1996). *The evolution of the Soar cognitive architecture*, pages 1–50. Lawrence Erlbaum Associates.
- [Lesser *et al.*, 2000] LESSER, V. and HORLING, B., KLASSNER, F., RAJA, A., WAGNER, T. et ZHANG, S. (2000). Big : An agent for resource-bounded information gathering and decision making. *Artificial Intelligence*, 118:197–244.
- [Lieberman, 1995] LIEBERMAN, H. (1995). Letizia : an agent that assists web browsing. *In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, Canada.
- [Litterer, 1973] LITTERER, J. (1973). *The analysis of organizations*. Wiley and Sons.
- [Luck *et al.*, 2005] LUCK, M., MCBURNEY, P., SHEHORY, O., WILLMOTT, S. et the AGENTLINK COMMUNITY (2005). *Agent Technology : Computing as Interaction - A Roadmap for Agent Based Computing*. Report AgentLink III.
- [Maes, 1989] MAES, P. (1989). The dynamics of action selection. *In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence-'89*. Morgan Kaufmann, Detroit.

- [Malone, 1987] MALONE, T. (1987). Modeling coordination in organizations and markets. *Management Science*, 33(10):1317–1332.
- [Mandiau *et al.*, 1999] MANDIAU, R., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et AGIMONT, G. (1999). Study of the influence of organizational structure on the efficiency of a multi-agent system. *Networking and Information Systems Journal*, 2(2):153–179.
- [Mandiau *et al.*, 2000] MANDIAU, R., GRISLIN–LE STRUGEON, E. et AGIMONT, G. (2000). Study of the efficiency of multi-agent organizational structure : an approach based on an experiment. In *4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, Boston, USA.
- [Mathieu *et al.*, 2002] MATHIEU, P., ROUTIER, J. et SECQ, Y. (2002). Principles for dynamic multi-agent organizations. In *Proceedings of 5th Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRICAI2002/PRIMA2002)*, volume 2413, pages 109–122. Springer, Tokyo, Japan.
- [Matson et DeLoach, 2005] MATSON, E. et DELOACH, S. (2005). Formal transition in agent organizations. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Knowledge Intensive Multiagent Systems (KIMAS'05)*, Waltham, MA, USA.
- [Millot et Mandiau, 1995] MILLOT, P. et MANDIAU, R. (1995). *Men-Machine Cooperative Organizations : Formal and Pragmatic Implementation Methods*, chapitre 13, pages 213–228. J.M. Hoc, P.C. Cacciabue, E. Hoolnagel (eds.), Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey.
- [Mintzberg, 1986] MINTZBERG, H. (1986). *Structure et dynamique des organisations*. Editions d'Organisation.
- [Mintzberg et der Heyden, 2000] MINTZBERG, H. et der HEYDEN, L. V. (2000). A closer look - Re-viewing the organization. *Ivey Business Journal*, pages 1–6.
- [Montaner *et al.*, 2003] MONTANER, M., LOPEZ, B. et ROSA, J. L. D. L. (2003). A taxonomy of recommender agents on the internet. *Artificial Intelligence Review*, 19:285–330.
- [Morin, 1977] MORIN, E. (1977). *La méthode*. Le Seuil, Paris.
- [Mucchielli, 2000] MUCCHIELLI, A. (2000). *La nouvelle communication*. Armand Colin, Paris.
- [Müller, 1996] MÜLLER, J. (1996). *The Design of Intelligent Agents, A layered Approach*. Springer Verlag.
- [Nodine *et al.*, 2000] NODINE, M., FOWLER, J., KSIEZYK, T., PERRY, B., TAYLOR, M. et UNRUH, A. (2000). Active information gathering in infosleuth. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 9:3–28.
- [Ocello et Demazeau, 1997] OCCELLO, M. et DEMAZEAU, Y. (1997). Vers une approche de conception et de description récursive en univers multi-agents. In *Actes des Journées Francophones IAD & SMA'97*, pages 143–157. Hermès.
- [Odell *et al.*, 2004] ODELL, J., NODINE, M. H. et LEVY, R. (2004). A metamodel for agents, roles, and groups. In *Agent-Oriented Software Engineering V : 5th International Workshop, AOSE 2004*, volume Lecture Notes in Computer Science 3382, pages 78–92. Springer Verlag.

- [Pacaux-Lemoine et Grislin–Le Strugeon, 1998] PACAUX-LEMOINE, M. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (1998). Multiagent systems and human-machine cooperation. *In 17th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control (EAM)*, pages 101–110, Valenciennes, France.
- [Pacheco et Carmo, 2003] PACHECO, O. et CARMO, J. (2003). A role based model for the normative specification of organized collective agency and agents interaction. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 6(2):145–184.
- [Pattison *et al.*, 1987] PATTISON, H., CORKILL, D. et LESSER, V. (1987). Instantiating descriptions of organizational structures. *In HUHNS, éditeur : Distributed artificial intelligence*, volume 1, pages 59–96. Pitman, London.
- [Pelechano *et al.*, 2005] PELECHANO, N., O'BRIEN, K., SILVERMAN, B. et BADLER, N. (2005). Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication. *In Proc. First Int. Workshop on V-Crowds, Geneva, Switzerland*.
- [Petit-Roze et Grislin–Le Strugeon, 2005] PETIT-ROZE, C. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (2005). Modelisation d'interactions par et avec des agents en personnalisation d'information. *In Actes des Troisièmes Journées Francophones Modèles Formels de l'Interaction (MFI'2005), Caen, France, 25-27 Mai*. Cepadues-Editions.
- [Petit-Roze *et al.*, 2003c] PETIT-ROZE, C., KOLSKI, C., GRISLIN–LE STRUGEON, E., ANLI, A., ABED, M. et USTER, G. (2003c). AgenPerso : IHM à base d'AGENTS logiciels PERSONnels d'information aux usagers des transports collectifs. *In Proceedings of IHM 2003*, pages 260–263, Caen. International Conference Proceedings Series, ACM.
- [Petit-Rozé, 2003] PETIT-ROZÉ, C. (2003). *Organisation multi-agents au service de la personnalisation de l'information - Application à un système d'information multimodale pour le transport terrestre de personnes*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Petit-Rozé *et al.*, 2003] PETIT-ROZÉ, C., ANLI, A., GRISLIN–LE STRUGEON, E., ABED, M. et KOLSKI, C. (2003). AGENPERSONO : Interface homme-machine à base d'AGENTS Logiciels PERSONnels d'information aux usagers des TC. Rapport final de projet PREDIT, LAMIH, Valenciennes.
- [Petit-Rozé *et al.*, 2004] PETIT-ROZÉ, C., ANLI, A., GRISLIN–LE STRUGEON, E., ABED, M., USTER, G. et KOLSKI, C. (2004). Système d'information transport personnalisée à base d'agents logiciels. *Génie Logiciel*, 70:29–38.
- [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2002] PETIT-ROZÉ, C. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (2002). Systèmes d'information à base d'agents. *In Organisation et application des SMA*, pages 307–319. Hermès, Paris, R. Mandiau and E. Grislin-Le Strugeon and A. Péninou édition.
- [Petit-Rozé et Grislin–Le Strugeon, 2006] PETIT-ROZÉ, C. et GRISLIN–LE STRUGEON, E. (2006). MAPIS, a multi-agent system for information personalization. *Information and Software Technology*, 48:107–120.

- [Petit-Rozé *et al.*, 2001] PETIT-ROZÉ, C., GRISLIN-LE STRUGEON, E., ABED, M., USTER, G. et KOLSKI, C. (2001). Agents intelligents au service de l'information multimodale dans les transports de personnes. Rapport final de projet prospectif GRRT, LAMIH, Valenciennes.
- [Pirjanian, 2000] PIRJANIAN, P. (2000). Multiple objective behavior-based control. *Robotics and Autonomous Systems*, 31:53–60.
- [Péninou *et al.*, 1999] PÉNINOU, A., GRISLIN-LE STRUGEON, E. et KOLSKI, C. (1999). Multi-agent systems for adaptive multi-user interactive systems design : some issues of research. In *Human-Computer Interaction, Ergonomics and User Interfaces*, pages 326–330. Lawrence Erlbaum Associate Publishers, London.
- [Reynolds, 1999] REYNOLDS, C. (1999). Steering behaviors for autonomous characters. In *Game Developers Conference*.
- [Rosenblatt, 1996] ROSENBLATT, J. (1996). *DAMN : A Distributed Architecture for Mobile Navigation*. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [Routier *et al.*, 2001] ROUTIER, J. C., MATHIEU, P. et SECQ, Y. (2001). Dynamic skill learning : A support to agent evolution. In *Proceedings of the AISB'01 Symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, pages 25–32.
- [Salton et McGill, 1983] SALTON, G. et MCGILL, M., éditeurs (1983). *Introduction to modern information retrieval*. McGraw-Hill, New York.
- [Schmidt, 1991] SCHMIDT, K. (1991). *Cooperative Work : a conceptual framework*, pages 75–110. J. Rasmussen and B. Brehmer and J. Leplat (eds.). John Willey and Sons.
- [Schmidt, 1994] SCHMIDT, K. (1994). Cooperative work and its articulation : requirements for computer support work. *Le Travail Humain*, 57(4):345–366.
- [Scott, 1992] SCOTT, W. R. (1992). *Organizations : Rational, natural and open systems (3rd ed.)*. Englewood Cliffs. Prentice-Hall.
- [Serugendo *et al.*, 2006] SERUGENDO, G. D., GLEIZES, M.-P. et KARAGEORGOS, A. (2006). Selforganisation and emergence in mas : an overview. *Informatica*, 30(1):45–54.
- [Shakshuki *et al.*, 2003] SHAKSHUKI, E., GHENNIWA, H. et KAMEL, M. (2003). An architecture for cooperative information systems. *Knowledge-Based Systems*, 16:17–27.
- [Shin et Leone, 1990] SHIN, D. et LEONE, J. (1990). Am/ag model : a hierarchical social system metaphor for distributed problem solving. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 4(3):473–487.
- [Sibertin-Blanc *et al.*, 2005] SIBERTIN-BLANC, C., AMBLARD, F. et MAILLIARD, M. (2005). A coordination framework based on the sociology of organized action. In *OOOP 2005, From Organizations to Organization Oriented Programming in MAS ; Workshop within the AAMAS'05 Conference*, Utrecht (Nd).

- [Simons *et al.*, 2000] SIMONS, J., ARAMPATZIS, A., WONDERGEM, B., SCHOMAKER, L., van BOMMEL, P., van der WEIDE, T. et KOSTER, C. (2000). Profile - a multidisciplinary approach to information discovery. *In Agent-Oriented Information Systems 2000, Proceedings of the 2nd International Workshop at CAiSE*00*, Stockholm.
- [Smith, 1980] SMITH, R. (1980). The contract net protocol : high-level communications and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on computers*, C-29(12):1104–1113.
- [Sukthankar, 1997] SUKTHANKAR, R. (1997). *Situation Awareness for Tactical Driving*. Thèse de doctorat, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [Sukthankar *et al.*, 1998] SUKTHANKAR, R., BALUJA, S. et HANCOCK, J. (1998). Multiple adaptive agents for tactical driving. *International Journal of Artificial Intelligence*, 9:1–20.
- [Thalmann, 2003] THALMANN, D. (2003). Concepts and models for inhabited virtual worlds. *In First International Workshop on Language Understanding and Agents for Real World Interactions*, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- [Thomas, 1999] THOMAS, G. (1999). *Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation de piétons*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- [Thompson, 1967] THOMPSON (1967). *Organizations in action*. McGraw-Hill.
- [Trentesaux et Tahon, 1994] TRENTESAUX, D. et TAHON, C. (1994). Modèle de communication inter-agents pour une structure de pilotage temps réel distribuée. *Revue d'automatique et de productique appliquée*, 7(6):703–727.
- [Tyrrell, 1993] TYRRELL, T. (1993). *Computational Mechanisms for Action Selection*. Thèse de doctorat, university of Edinburgh.
- [Weyns *et al.*, 2004] WEYNS, D., SCHELFTHOUT, K., HOLVOET, T. et GLORIEUX, O. (2004). Role based model for adaptive agents. *In Fourth Symposium on Adaptive Agents and Multi-agent Systems at the AISB '04 Convention*, Leeds, UK.
- [Woodward, 1965] WOODWARD, J. (1965). *Industrial organization - Theory and practice*. Oxford University Press.
- [Wooldridge *et al.*, 2000] WOOLDRIDGE, M., JENNINGS, N. et KINNY, D. (2000). The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(3):285–312.