

1995 VALE0004

Numéro d'Ordre : 95-10

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Emmanuelle LE STRUGEON

Maître ès Sciences



**UNE MÉTHODOLOGIE D'AUTO-ADAPTATION
D'UN SYSTÈME MULTI-AGENTS COGNITIFS.**

Soutenue le 17 janvier 1995 devant la commission d'examen composée de :

Mme	Claudette	SAYETTAT	<i>Rapporteur</i>
et MM :	Jacques	FERBER	<i>Rapporteur</i>
	Arnaud	FRÉVILLE	
	Gaëtan	LIBERT	<i>Co-directeur de thèse</i>
	René	MANDIAU	
	Patrick	MILLOT	<i>Directeur de thèse</i>

THÈSE

présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Emmanuelle LE STRUGEON

Maître ès Sciences

**UNE MÉTHODOLOGIE D'AUTO-ADAPTATION
D'UN SYSTÈME MULTI-AGENTS COGNITIFS.**

Soutenu le 17 janvier 1995 devant la commission d'examen composée de :

Mme	Claudette	SAYETTAT	<i>Rapporteur</i>
et MM :	Jacques	FERBER	<i>Rapporteur</i>
	Arnaud	FRÉVILLE	
	Gaëtan	LIBERT	<i>Co-directeur de thèse</i>
	René	MANDIAU	
	Patrick	MILLOT	<i>Directeur de thèse</i>

*Cela le véritable humain le sait :
Les brins additionnés de multiples moyens
Tressent un câble d'une grande force
Et d'une grande détermination.*

Kerro Panille
Poésies complètes

(“L’incident Jésus”, Frank Herbert)

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, au sein de l'équipe Informatique Industrielle et Communication Homme-Machine dirigée par le Professeur Patrick MILLOT. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour m'avoir permis d'intégrer son équipe de recherche et pour la confiance qu'il m'a accordée au cours de ce travail.

Je tiens aussi à remercier madame le Professeur Claudette SAYETTAT, responsable du laboratoire "Systèmes coopératifs" à l'Ecole des Mines de St Etienne et monsieur le Professeur Jacques FERBER, du Laboratoire Formes et Intelligence Artificielle à l'université Pierre et Marie Curie de Paris, de me faire l'honneur d'être rapporteurs de ce mémoire.

J'adresse tout particulièrement mes remerciements au Professeur Gaëtan LIBERT, directeur du Laboratoire Parallélisme, Informatique et Processus de l'Université Polytechnique de Mons, et à monsieur René MANDIAU, maître de conférences à l'Université de Valenciennes, qui ont suivi mon travail et m'ont guidé durant la préparation de ce doctorat.

Mes remerciements vont également à monsieur le Professeur Arnaud FRÉVILLE, Directeur de l'Institut des Sciences et Techniques et du Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Valenciennes, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de siéger à la commission d'examen.

Je tiens à inclure dans ces remerciements mes amis du laboratoire : merci à Michèle pour sa générosité, à Isabelle pour sa disponibilité, à Christophe pour ses conseils, à Etienne pour ses chansons, à Fred pour sa "philosophie" et à toute l'équipe pour l'ambiance qui y règne.

Enfin, je remercie mes parents de m'avoir encouragée tout le temps qu'ont duré mes si longues études, ainsi qu'Iwan pour son dynamisme, Soizic pour son humour corrosif et Martial pour son expertise "Mac", ses relectures et sa patience durant la rédaction de ce mémoire.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	6
CHAPITRE I. LES ORGANISATIONS MULTI-AGENTS : CONTEXTE ET MOTIVATION DE L'ÉTUDE	8
Introduction	9
I.1 Description d'un univers multi-agents.....	12
I.1.1 Niveau Univers	13
I.1.2 Niveau Système	13
I.1.2.1 Le système multi-agents	14
I.1.2.2 L'environnement	14
I.1.3 Niveau Agent	15
I.1.4 Liens entre les niveaux.....	19
I.2 Réalisation d'une tâche par un système multi-agents	20
I.2.1 Perception	21
I.2.2 Cognition.....	22
I.2.3 Action.....	24
I.3 Organisation	26
I.3.1 Une définition double.....	26
I.3.2 Organisations à structure imposée.....	27
I.3.3 Organisations émergentes	28
Conclusion	31
CHAPITRE II. ETUDE DES ORGANISATIONS	33
Introduction	34
II.1 Adaptation organisationnelle.....	35
II.1.1 Evolution du nombre d'agents.....	35
II.1.2 Regroupement d'agents.....	36
II.1.3 Mécanismes de flux	37
II.1.4 Modification de la structure organisationnelle.....	38
II.2 Vers une classification des organisations	39
II.2.1 Représentation d'une structure organisationnelle.....	40
II.2.1.1 Les représentations existant en sociologie.....	40
II.2.1.2 Les représentations existant en I.A.D.....	41
II.2.2 Tentatives de classification	43
II.2.2.1 Classification selon trois critères	43
II.2.2.2 Classification par type de coordination	43
II.2.2.3 Classification par objectif.....	44
II.2.2.4 Classification par type de répartition de la prise de décision	44
II.2.2.5 Classification usuelle.....	44
II.2.2.6 Synthèse sur la classification.....	45
II.3 Des organisations appropriées.....	46
II.3.1 Comparaisons entre différentes structures organisationnelles.....	46
II.3.1.1 Comparaison entre organisations de type hiérarchique et de type marché	46
II.3.1.2 Comparaison d'organisations ayant différents types de décentralisation	47
II.3.1.3 Autres comparaisons effectuées sur des systèmes multi-agents	48
II.3.2 Synthèse.....	49
Conclusion	52

CHAPITRE III. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE D'ADAPTATION ORGANISATIONNELLE POUR UN S.M.A.	53
Introduction	54
III.1 Spécification de la tâche	56
III.1.1 Caractériser la tâche	57
III.1.1.1 Caractéristiques du plan	57
III.1.1.2 Caractéristiques de la tâche	60
III.1.1.2.1 Critère de connaissance	61
III.1.1.2.2 Critère d'action	62
III.1.1.2.3 Critère de coordination	63
III.1.1.2.4 Synthèse	64
III.1.2 Classer la tâche courante comme une tâche-type	65
III.2 Adaptation de l'organisation	67
III.2.1 Une bibliothèque de modèles d'organisation	68
III.2.1.1 Proposition d'un modèle d'organisation	69
III.2.1.1.1 Notion de composant	70
III.2.1.1.2 Notion de relation entre composants	71
III.2.1.2 Création de la bibliothèque	72
III.2.1.2.1 Hiérarchie	74
III.2.1.2.2 Communauté	74
III.2.1.2.3 Marché	74
III.2.1.2.4 Société	76
III.2.2 Choix d'une organisation	77
III.2.3 Organisation effective	79
III.2.3.1 Méthode "tout ou rien"	79
III.2.3.2 Méthode "économique"	80
III.2.3.3 Méthode itérative	81
Conclusion	82
CHAPITRE IV. APPLICATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE : CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DE SYGMA, UN S.M.A. À ADAPTATION ORGANISATIONNELLE	84
Introduction	85
IV.1 Architecture de SYGMA : un SYstème orGganisationnel Multi-Agents	86
IV.1.1 Conception du S.M.A. : choix méthodologiques et techniques	86
IV.1.2 Niveau Univers	88
IV.1.3 Niveau Système	88
IV.1.3.1 Le S.M.A.	89
IV.1.3.1.1 Représentation et structure du système	89
IV.1.3.1.2 La communication dans le système	90
IV.1.3.2 L'environnement	92
IV.1.4 Niveau Agent	96
IV.2 Mise en oeuvre de la méthode d'organisation dans SYGMA	98
IV.2.1 Spécification de la tâche	98
IV.2.1.1 Tests sur le critère K	99
IV.2.1.2 Première série de tests sur les critères A et R	101
IV.2.1.3 Deuxième série de tests sur les critères A et R	103
IV.2.1.4 Troisième série de tests sur les critères A et R'	106
IV.2.2 Adaptation de l'organisation	108
IV.2.2.1 Adaptation de l'organisation	108
IV.2.2.2 Comportement des agents	109
IV.2.2.2.1 Ordre	110
IV.2.2.2.2 Information	114
IV.2.2.2.3 Requête	114
IV.2.2.2.4 Réponse	114

IV.2.2.2.5 Organisation	114
IV.2.2.2.6 Comportement.....	114
IV.2.2.3 Comportement organisationnel réactif d'un agent cognitif.....	115
IV.2.3 Illustration par la simulation de l'activité d'une équipe de robots.....	115
Conclusion	119
CHAPITRE V. PERSPECTIVES.....	120
Introduction.....	121
V.1 Perspectives d'évolution de la méthode proposée.....	122
V.1.1 Améliorations directes	122
V.1.1.1 Introduction de nouveaux modèles d'organisation	122
V.1.1.2 Pondération des critères	123
V.1.1.3 Amélioration de la méthode de propagation	124
V.1.2 Intégration de travaux sur l'architecture interne d'un agent	124
V.1.2.1 Planification partagée	124
V.1.2.2 Niveaux de comportement.....	125
V.1.3 Vers un S.M.A. temps réel.....	127
V.2 Domaines d'application	129
V.2.1 Conception de S.M.A.....	129
V.2.2 Interactions hommes-machines	129
V.2.2.1 Un agent intelligent qui apprend et s'adapte à l'utilisateur.....	130
V.2.2.2 Travail coopératif supporté par ordinateur.....	131
V.2.2.3 Organisations multi-agents humains et artificiels	131
V.2.3 Simulation.....	133
Conclusion	135
CONCLUSION GÉNÉRALE	136
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	138
INDEX DES FIGURES ET DES TABLEAUX	148

Introduction générale

Pour faciliter leur travail et en améliorer à la fois le rendement et la qualité, les hommes utilisent des machines de plus en plus perfectionnées. En particulier, les techniques issues de la recherche en Intelligence Artificielle contribuent depuis quelques années, à rendre ces machines douées, dans une certaine limite, de raison et de la faculté d'agir en fonction des résultats de ce raisonnement. Non seulement la machine agit, mais elle décide elle-même des actions à effectuer.

Cette forme d'autonomie semble très avantageuse lorsque la machine est seule. Mais elle peut devenir source de conflit lorsque plusieurs machines autonomes partagent un même environnement. En se basant sur notre expérience de la société humaine, la meilleure solution serait que les machines coordonnent leurs actions. Encore faut-il que les machines possèdent cette forme particulière d'intelligence qui permet la coopération. Il en va de même lorsque, parmi les entités intelligentes en présence, se trouvent des humains. Malgré leur supériorité cognitive, ils sont désormais confrontés à des entités pourvues d'une certaine autonomie de décision et d'action, avec lesquelles il leur faut compter.

L'étude de la coopération parmi des ensembles d'entités intelligentes, indépendamment de la nature humaine ou artificielle de celles-ci, est un des principaux objets de la recherche en Intelligence Artificielle Distribuée. Parmi les systèmes développés dans ce domaine, la grande majorité est dédiée à l'accomplissement d'un type unique de tâche. Or, le développement de l'intelligence de tels systèmes passe par celui de leur capacité à réagir différemment selon les événements. En particulier, les entités intelligentes, appelées "agents", doivent être capables de s'organiser en fonction de la tâche qui leur incombe.

L'étude des moyens à donner aux groupes d'agents pour qu'ils adaptent leur organisation en fonction du contexte, est l'objectif de la recherche présentée dans ce mémoire. Ce dernier comporte cinq chapitres organisés comme suit et illustré par la figure 1 ci-dessous :

Un premier chapitre définit les divers éléments utilisés en I.A.D., introduit la notion d'organisation multi-agents et la problématique à la base de nos recherches.

Le deuxième chapitre expose une étude approfondie des organisations, afin d'en extraire les connaissances nécessaires à la poursuite de notre objectif.

Sur la base de ces connaissances, une méthode d'adaptation organisationnelle pour un système multi-agents est proposée dans le troisième chapitre.

Cette méthode est mise en oeuvre et testée dans le quatrième chapitre.

Enfin, les améliorations et applications possibles de la méthode proposée sont exposées dans le cinquième chapitre.

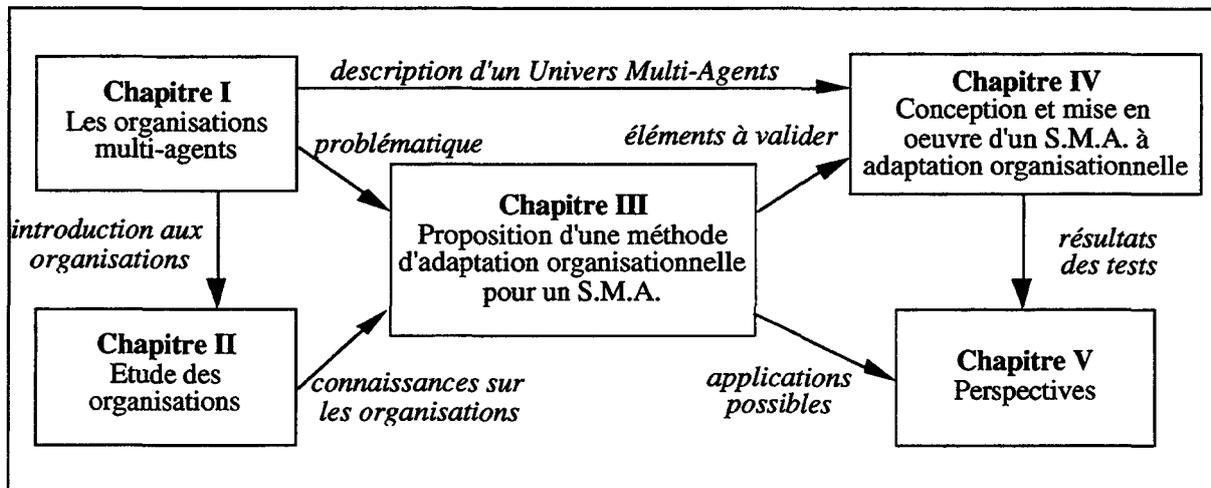


Figure 1 : Plan du mémoire.

Chapitre I

**Les organisations multi-agents :
contexte et motivation de l'étude.**

Introduction

L'intelligence est dite artificielle lorsqu'elle est la propriété d'une machine, par opposition à l'intelligence "naturelle" d'un être vivant. Bien qu'il soit, dans une certaine mesure, contestable de parler d'intelligence pour une machine, il est indiscutable que l'Intelligence Artificielle constitue un domaine scientifique à part entière. Que signifie l'ajout du qualificatif "distribuée" à cette appellation ? Nous verrons qu'il s'agit d'un point de vue étendu sur le même objet, les machines intelligentes, ainsi que les raisons à l'origine de cette extension. Malgré la relative jeunesse de la discipline, quelques domaines d'application envisageables seront énumérés.

A l'origine, le terme "intelligence artificielle" a été inventé pour qualifier une machine qui réussirait à passer le test de Turing¹. Ce terme englobe actuellement un vaste domaine de recherche, qui peut être défini ainsi :

"L'intelligence artificielle est l'ensemble des disciplines informatiques tendant à faire que des ordinateurs imitent des comportements intelligents humains." [Delahaye 88].

En Intelligence Artificielle (I.A.) "classique", pour imiter les comportements intelligents humains, les modules informatiques sont dotés de la plus grande intelligence possible : ces entités possèdent des connaissances et sont capables de raisonnement. Cette discipline a produit, notamment, les systèmes experts.

En Intelligence Artificielle Distribuée (I.A.D.), le sujet d'étude n'est pas *une* mais *un ensemble* d'entités intelligentes. L'intelligence y est recherchée, non par le raisonnement individuel d'une entité, mais par l'interaction entre les différents raisonnements et connaissances de plusieurs d'entre elles. L'I.A.D. concerne la façon dont des entités intelligentes s'entendent pour atteindre leur(s) but(s) [Singh 93]. En effet, un des postulats sur lesquels reposent les travaux en I.A.D., est que l'intelligence d'un groupe d'entités coopérantes est au moins égale, voire supérieure, à la somme des intelligences individuelles de ses membres. Certains auteurs limitent les entités intelligentes étudiées aux entités informatiques [Singh 93 ; Gasser 92a], tandis que d'autres conçoivent d'y inclure également les humains [Chang 87 ; Grant 92²].

¹ Une machine qui réussirait le test de Turing serait impossible à distinguer d'un être humain par la seule teneur de ses réponses à un questionnaire, en l'absence de contact sensoriel.

² Ce dernier émet même l'idée d'un test de Turing inversé, dans lequel humain et ordinateur échangeraient leurs rôles respectifs.

En regard de la définition de l'I.A. donnée ci-dessus, une variation propre à l'I.A.D. serait donc la suivante :

L'intelligence artificielle distribuée est l'ensemble des disciplines informatiques tendant à faire que des ensembles d'entités imitent des comportements intelligents humains.

L'I.A. "classique" ne suffit-elle donc pas pour qu'un nouveau domaine soit apparu ? Non, car il existe des situations dans lesquelles il est préférable de placer raisonnement et connaissances au niveau du groupe plutôt que de l'individu. Issues de telles situations, les principales raisons à l'origine de la distribution de l'intelligence sont celles-ci :

- Tous les problèmes réels sont à la fois ouverts et distribués [Davis 80 ; Hewitt 91]. Notre univers, par exemple, est ainsi soumis non seulement à nos actions, mais également à celles des autres.
- Les entités intelligentes ont une capacité individuelle limitée de résolution de problèmes — les limitations rencontrées par les systèmes experts en sont un exemple —. En effet, comme l'énonce Kirn [92], "[...] il est souvent difficile et même impossible de mener la résolution d'un problème collaboratif à partir d'un point de vue global." Un problème compliqué est résolu plus facilement s'il est décomposé en plusieurs petits problèmes simples, ceux-ci pouvant être résolus simultanément par des entités différentes. La puissance est apportée par l'interaction entre les entités [Haton 89].
- Un même problème gagne à être envisagé sous ses divers aspects [Haton 89], comme différents points de vue sur un même sujet enrichissent un débat, même et surtout, s'ils sont contradictoires. Les problèmes de cohérence se posent alors en terme de consensus entre différentes bases de connaissances, et non en terme de cohérence interne d'une base unique. Ceci a donné lieu à divers travaux traitant de la multi-expertise.
- Même en cas de défaillance d'une des entités, l'ensemble reste capable de réaliser la tâche demandée. Cela autorise également le système à évoluer par l'ajout ou le retrait d'entités.

A partir de ces différentes raisons, les domaines concernés par la distribution de l'intelligence sont identifiés par les critères suivants :

- une distribution (fonctionnelle ou matérielle) naturelle,
- l'incapacité d'une entité unique à réaliser la tâche demandée,
- un besoin de "robustesse" du système.

Peu de réels outils basés sur des techniques d'I.A.D. ont été développés à ce jour. Ils ont cependant été appliqués à de nombreux domaines, dont l'aide à la surveillance et à la régulation de réseaux (DVMT [Lesser 83] ; CNet [Smith 80]; trafic aérien : [Cammarata 83]), la supervision (projet IDEAL [Benhamou 90]), la gestion de production (CIMES [Ayel 91]), la conception

d'architectures robotiques ([Crowley 87] ; [Georgeff 89] ; [Ferber 92]), le diagnostic médical (TELEMAC [Gleizes 91]), l'imagerie (VAPS [Boissier 92] ; PROTEAN [Hayes-Roth 89]) et la simulation (interactions entre équipements électroniques OSIME [Laborie 93] ; éthologie [Drogoul 93]). Dans le cadre des interactions hommes-machines, les techniques I.A.D. sont également capables d'apporter des améliorations grâce à l'étude, la mise en oeuvre et la simulation des échanges parmi des entités intelligentes (systèmes participants de [Chang 87]).

Afin de situer nos travaux dans leur contexte, ce chapitre introduit leur sujet — les organisations multi-agents — selon une progression en trois parties. La première partie aborde les éléments fondamentaux de l'I.A.D., du plus gros, l'univers multi-agents, au plus fin, l'entité intelligente. La seconde partie présente quel est le comportement de ces entités en situation de réalisation de tâche. La troisième partie détaille les organisations qu'elles sont susceptibles d'adopter dans une telle situation.

L'I.A.D. est une discipline relativement neuve. La terminologie en ce domaine n'étant pas à ce jour complètement établie, il nous a paru nécessaire de préciser la signification que nous donnons aux divers éléments traités par la suite. Le lecteur est ainsi invité à entrer dans le domaine de l'I.A. Distribuée par la description de l'élément le plus général qui y soit traité : l'univers multi-agents.

1.1 Description d'un univers multi-agents

C'est à l'aide d'un microscope "virtuel" sur lequel seront adaptées des lentilles de plus en plus grossissantes, que nous allons observer l'univers multi-agents.

Différents niveaux d'observation sont, en effet, concevables : le niveau de l'architecture (système) et celui de la structure interne (l'agent) [Grant 92]. Ces deux niveaux représentent les points de vue externe et interne d'un observateur du système, tels que les conçoivent également Werner [92], Demazeau [91b] et les chercheurs de l'équipe PLEIAD [92]. Pour avoir une vision complète des différents aspects d'un univers multi-agents, nous ajouterons un troisième niveau, de manière à avoir les trois points de vue suivants : externe au système ; interne au système et externe à l'agent ; interne à l'agent. L'observation de l'univers multi-agents sera ainsi réalisée selon trois niveaux de précision (figure I.1), le niveau *Univers* décrivant l'univers multi-agents, le niveau *Système* décrivant le système multi-agents et son environnement et le niveau *Agent* décrivant l'architecture d'un agent du système.

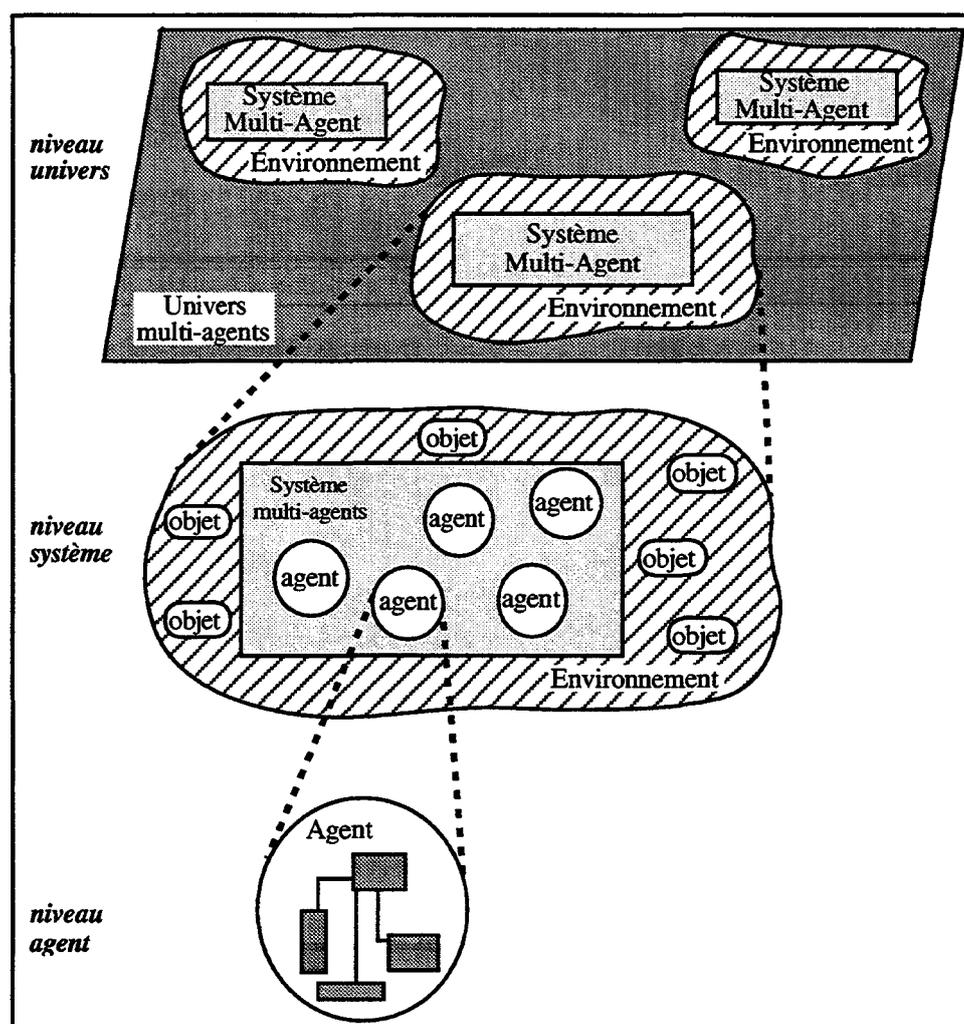


Fig. I.1 : Description d'un univers multi-agents selon trois niveaux.

Les explications relatives à chacun de ces trois niveaux constituent les paragraphes suivants. Un quatrième paragraphe met en évidence les liens entre ceux-ci.

Le premier niveau de description, le niveau “univers”, est maintenant abordé.

1.1.1 Niveau Univers

Un univers multi-agents est formé d’un (ou plusieurs) système(s) multi-agents et de son (leur) environnement. Voici quelques exemples d’univers multi-agents possibles : une fourmilière et son territoire ; une base de données distribuée ; l’équipe de surveillance d’une centrale nucléaire. Plusieurs systèmes multi-agents (S.M.A.) appartenant au même univers multi-agents sont envisageables, si il existe un critère autorisant leur regroupement, comme par exemple, le partage d’une ressource commune ou l’implantation sur une même zone physique. Trois situations de partage d’un même univers par des système multi-agents sont identifiables (figure I.2) : la simple coexistence (aucune interaction), le partage de quelques éléments de l’environnement (interaction faible) et le partage d’éléments de l’environnement avec conscience de leur existence mutuelle (interaction forte). Par exemple, des entreprises peuvent ignorer leur existence mutuelle dans le même environnement géographique et économique, ou, au contraire, se partager le même bâtiment, passer des contrats ou se faire concurrence.

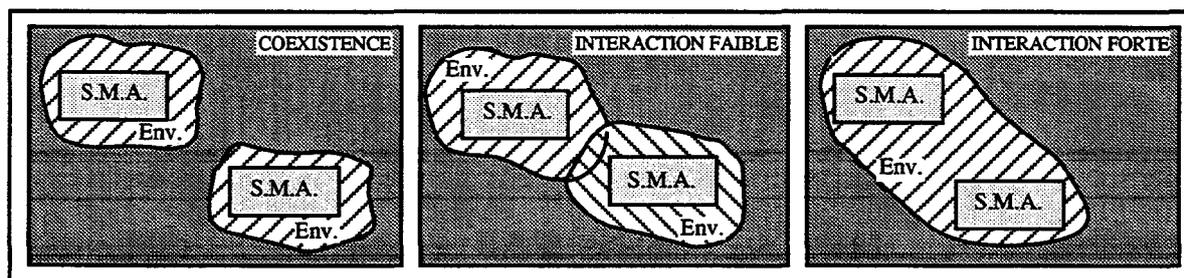


Fig. I.2 : Interactions entre systèmes multi-agents partageant un même univers.

A ce premier niveau de description, qui est le moins précis, système multi-agents et environnement sont vus comme des “boîtes noires”. Cette représentation trouve son utilité dans la description du comportement général d’un S.M.A. vis-à-vis de son environnement. Des recherches futures pourraient également étudier les interactions entre systèmes multi-agents.

Les détails d’un S.M.A. particulier et de son environnement sont visibles au second niveau de description, le niveau Système, détaillé dans le paragraphe suivant.

1.1.2 Niveau Système

Les deux composants de l’univers multi-agents, le système multi-agents et son environnement, sont formés d’éléments plus fins, visibles au niveau Système. Ils sont abordés successivement.

I.1.2.1 Le système multi-agents

Un S.M.A est un ensemble d'entités imitant des comportements intelligents humains. Plus précisément, un système multi-agents est *“un ensemble d'entités qui coordonnent leurs connaissances, buts, expériences et plans pour agir ou résoudre des problèmes, incluant le problème de la coordination inter-agents lui-même.”* [Bond 88]. *“Un monde artificiel peuplé de processus interagissants est appelé système multi-agents.”* [Ferber 92]. Les entités composant le système sont des agents. En reprenant les exemples précédents, les agents seraient les fourmis de la fourmilière, les modules de la base de données, les personnes membres de l'équipe de surveillance de la centrale. Par la suite nous utiliserons indifféremment les termes “groupe” d'agents et “système” multi-agents.

L'ensemble des agents forme un groupe parce qu'ils interagissent. Selon les objectifs qu'ils poursuivent et leurs capacités à les atteindre, l'interaction entre les membres du groupe est plutôt une relation de totale coopération, de conflit, ou toute autre relation intermédiaire entre ces deux extrêmes. Dans le but de qualifier les diverses sortes d'interaction, Demazeau [91b] classe les comportements des agents selon un critère de localité de la tâche (tâche globale ou locale à un agent) et un critère de capacité de l'agent à l'accomplir. Nous prenons pour hypothèse le cas d'agents ayant à réaliser une tâche globale, qu'aucun d'eux n'est capable d'achever seul : c'est la situation de “distribution” de la classification de Demazeau. Cette situation génère des problèmes de répartition et de coordination de tâches entre les agents.

Alors qu'au niveau univers, le comportement du S.M.A. est décrit de l'extérieur du système, le niveau système permet de l'observer de manière interne. Les comportements des agents, les interactions entre eux, et celles entre agents et objets de l'environnement y sont descriptibles. L'environnement y est défini, lui aussi, de façon plus précise. Ceci fait l'objet du paragraphe suivant.

I.1.2.2 L'environnement

Le système multi-agents est plongé dans un environnement. Ce peut être l'environnement géographique, social, informatique, etc., selon le système dont il s'agit et le but de la description. En ce sens, le système est entouré par plusieurs environnements, concrets ou abstraits, liés à différentes facettes du système. Cependant, les différentes significations sont regroupés sous le vocable unique d' “environnement”.

La frontière entre système et environnement est difficilement discernable. Certains auteurs, comme [Boy 88], considèrent, par exemple, l'environnement des agents pris individuellement. Dans ce cas, “l'environnement” signifie l'environnement d'un agent, les autres agents y compris. Pour éviter toute ambiguïté, nous précisons donc que l'environnement signifie, ici, *l'environnement du système*, et non celui d'un agent.

Dans une première approximation, l'environnement (du système) englobe tout ce qui n'appartient pas au système. Cependant, les S.M.A. considérés ici, ne sont pas capables de modéliser un environnement ouvert. De plus, ils affectent et ne sont réellement affectés que par une partie restreinte de ce qui les entoure. Ils se limitent, par conséquent, à la modélisation de leur environnement immédiat. L'environnement d'un S.M.A. est donc défini, plus précisément, comme l'ensemble des objets n'appartenant pas au système, qu'il peut percevoir et sur lesquels, éventuellement, il peut agir. Notons qu'en I.A. distribuée, le terme "objet" est utilisé pour désigner toute entité passive, par opposition au terme "agent" qui désigne une entité active, actrice. Cette signification contextuelle ne doit pas être confondue avec celle des "objets" en informatique (orienté objet, programmation objet).

Les systèmes cités pour exemples ci-dessus peuvent avoir, entre autres, les environnements suivants : la zone de forêt où a été construite la fourmilière [Werber 91] ; les périphériques d'utilisation de la base de données ; les pupitres de commande de la centrale ; la situation du marché dans la branche économique de l'entreprise. Les objets sur lesquelles agissent les différents systèmes multi-agents sont alors : la nourriture aux alentours de la fourmilière ; les primitives de saisie et d'affichage de données ; les vannes du circuit de refroidissement ; le prix de vente des produits ; etc.

Après avoir étudié les niveaux univers et système, réglons à nouveau plus finement notre microscope afin de détailler les entités intervenant sur les objets de l'environnement : les agents.

I.1.3 Niveau Agent

Les entités fondamentales de l'I.A.D. sont les agents. Il est plus aisé de décrire un agent par ce qu'il fait (son comportement) que par ce qu'il est. Ainsi, la définition d'un agent généralement retenue est celle-ci :

"Un agent est une entité intelligente, rationnelle, autonome, capable de communication et d'action."

La distinction entre les deux écoles classiques de l'I.A.D. se fait usuellement par opposition entre les comportements — cognitifs vs. réactifs — des agents modélisés. L'approche cognitive privilégie le comportement réfléchi au détriment de la rapidité. Au contraire, l'approche réactive privilégie le comportement réflexe et la rapidité, au détriment du raisonnement. En fait, ces approches représentent deux façons d'aborder un problème.

Pour illustrer les principales différences entre les deux approches, considérons l'exemple d'un groupe d'agents, dont la tâche est de trier divers cubes colorés sur le critère de leur couleur.

Une première méthode peut être de mettre les cubes bleus à tel endroit, les cubes rouges à côté et ainsi de suite. Puis chaque agent prend un cube, reconnaît sa couleur grâce à un procédé de vision et de comparaison de couleurs par rapport à une palette connue, se remémore l'emplacement choisi pour les cubes de cette couleur et le place à l'endroit prévu. Des variantes peuvent exister : la reconnaissance des couleurs peut être effectuée par des agents spécialisés, par exemple ; un agent qui découvre un tas composé uniquement de cubes rouges, peut demander une aide ponctuelle à d'autres agents afin d'accélérer le processus ; une reconnaissance globale du terrain peut être faite afin de déterminer les zones qui sont en majorité de telle ou telle couleur, afin de choisir des lieux pertinents pour les couleurs.

Selon une seconde méthode, les agents peuvent simplement avoir la consigne de séparer l'un de l'autre deux cubes de couleurs différentes, sans reconnaître celles-ci précisément et sans fixer de place spécifique pour chacune d'entre elles. Des variantes existent aussi dans ce cas, la consigne peut être de s'occuper uniquement des cubes appartenant à une zone géographique limitée, par exemple.

Ces deux façons d'aborder le tri des cubes colorés sont radicalement différentes et pourtant le résultat obtenu après un certain temps, sera le même. La première méthode s'inspire de l'approche cognitive. Les agents cognitifs possèdent des représentations d'eux-mêmes et de leur environnement. Ils réfléchissent avant d'agir. Leur comportement est par conséquent relativement intelligent, mais lent à cause du temps pris par la phase de raisonnement. La seconde méthode appartient à l'approche réactive. Les agents réactifs réagissent aux perturbations en provenance de l'environnement. Ils sont rapides car leurs actions ne résultent pas d'un processus de réflexion. Mais ils n'ont pas de modèle d'eux-mêmes, des autres agents, ni de l'environnement. Le tableau 1 résume ces différences.

Tableau I.1 : Les agents cognitifs vs réactifs [Reichgelt 90].

Systèmes d'agents cognitifs	Systèmes d'agents réactifs
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son historique
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/réponse
Petit nombre d'agents	Grand nombre d'agents

La plupart des chercheurs en I.A.D. appartenaient traditionnellement à l'une de ces deux écoles, mais la tendance est actuellement à essayer de combiner ces deux facettes, opposées mais complémentaires, de la conception des agents. Cette combinaison est nécessaire. Il suffit de prendre exemple sur l'agent le plus intelligent existant (jusqu'à maintenant) pour en être convaincu : l'agent-humain. Les humains sont-ils des agents cognitifs ou réactifs ? Ils possèdent clairement les deux aspects. Prenons pour exemple, le conducteur d'un véhicule. D'une part, il est capable de construire un itinéraire complexe pour aller d'un lieu à un autre, en respectant diverses

contraintes — comportement cognitif. D'autre part, il est capable de freiner brusquement si un autre véhicule vient à lui couper la route — comportement réactif. L'assemblage des deux types de comportements permet aux humains de faire face à de nombreuses situations différentes. Il est donc naturel d'essayer de reproduire ceci parmi les agents artificiels. Quelques équipes de recherches s'y consacrent actuellement ([Pollack 92] ; [Chaïb-Draa 94] ; Schnepf 91, cité par [Drogoul 93]).

La définition d'un agent donnée précédemment n'englobe plus la totalité des travaux dans ce domaine, puisque les agents réactifs ne sont pas rationnels. De plus, les entités étudiées en I.A.D. vont désormais de celles basées sur des modèles empruntés à l'éthologie (agents-fourmis) aux humains. Actuellement, la communauté de l'I.A.D. ([PLEIAD 92], [Grant 92]) tend donc à adopter une nouvelle définition, incluant à la fois les aspects cognitifs et réactifs. Elle présente l'agent par ce qu'il est :

“Un agent est un système I.A. ou un humain.” [Demazeau 90].

En plus de cette définition, précisons ce qu'un agent n'est pas. Les agents ne sont pas des objets, au sens informatique du terme “objet”. *“Les objets ne savent pas réfléchir sur leur comportement, sur les liens qu'ils entretiennent avec d'autres objets, ni sur la nature des communications qui leur sont adressées.”* [Ferber 87]. Ce ne sont pas non plus des acteurs, dans le sens utilisé par les langages “acteur” [Hewitt 91], qui sont des objets évolués, capables d'émettre et de recevoir des messages, mais ne raisonnent pas sur le contenu de ces messages.

De l'aspect externe (observable au niveau système), nous sommes passés à l'aspect interne des agents (niveau agent). Cette distinction entre l'être et le paraître est à rapprocher de la distinction, faite précédemment, entre la structure et le comportement d'un système. Une modélisation alliant ces deux aspects est proposée par Burmeister [90], comme le triplet (intentions, ressources, comportement) : un agent a des intentions (c'est-à-dire : des buts, préférences, etc.), il a besoin de ressources pour réaliser ses intentions et il exhibe un comportement.

Au niveau “agent”, l'architecture d'un agent particulier est donc décrite. Les interactions intervenant à ce niveau sont celles qui apparaissent entre les différents modules composant l'agent. Un agent est conçu en fonction du comportement qui en est attendu. Un agent cognitif possède des modèles de l'environnement, de lui-même et des autres agents. Ces modèles se composent, dans la plupart des cas, de connaissances (faits avérés) et de croyances (faits déduits), lesquels nécessitent l'emploi de logiques adaptées, comme, par exemple, celle proposée par Shoham [93]. Les actions de l'agent sont fonction de ses capacités à communiquer et à agir sur son entourage. Ses interactions avec les autres agents nécessitent une représentation interne de ses propres plans et buts, de ses intentions et engagements ([Cohen 90], [Bouron 93]), ainsi que ceux des autres. Les

agents réactifs, plus simples, sont généralement composés d'un ensemble de règles et de divers mécanismes contrôlant leur déclenchement.

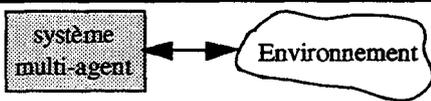
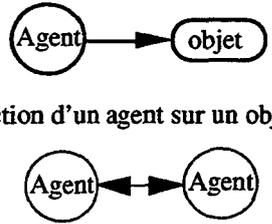
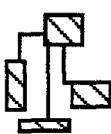
Les agents dont il sera question dans ce mémoire, sont supposés être plutôt cognitifs, sans pour autant les restreindre à certains types de comportement. L'hypothèse de départ est simplement que ce sont des agents ayant, au moins, les capacités suivantes :

- ils sont capables de communiquer les uns avec les autres (capacité communicationnelle) ;
- ils possèdent certaines capacités d'action sur les objets de l'environnement (capacités opérationnelles) ;
- ils sont capables de modéliser en partie l'environnement et les autres agents, et de raisonner sur ces informations (déduction d'informations, planification).

Dans le cas d'agents artificiels, ces capacités sont concrétisées au niveau interne, par les modules informatiques correspondants : système de communication ; bases de données (faits, croyances) sur l'environnement, les autres agents et eux-mêmes ; module de raisonnement ; planificateur.

En résumé, une synthèse des divers niveaux évoqués est proposée tableau I.2.

Tableau I.2 : Classification des éléments étudiés.

niveau d'abstraction	entités en interaction	éléments observables	utilisation
niveau Univers	 <p>interactions entre S.M.A. et environnement</p>	comportement global du système multi-agents vis à vis de son environnement : <ul style="list-style-type: none"> • perception de l'existence d'un environnement • actions sur l'environnement 	conception du comportement du système vis-à-vis de son environnement
niveau Système	 <p>action d'un agent sur un objet</p> <p>interactions entre agents</p>	perception de l'état d'un objet ; action sur un objet communication } coordination } = organisation attribution de tâches }	conception des processus d'actions des agents conception des interactions entre les agents
niveau Agent	 <p>interactions entre les modules internes d'un agent</p>	intervention des modules de connaissances/croyances, du raisonnement et des capacités d'action	conception de l'intelligence des agents

I.1.4 Liens entre les niveaux

Les composants des trois niveaux décrivant l'univers multi-agents s'influencent mutuellement. Les trois niveaux sont liés, en particulier, les caractéristiques d'un niveau ont des effets sur celles du niveau immédiatement supérieur. Doran [89] estime ainsi qu' "*une considération clé dans l'étude de tout système [...] est la façon dont les processus de bas niveau autorisent et contraignent ceux appartenant à des niveaux plus élevés d'abstraction.*"

Le niveau agent influence le niveau système, car la conception interne d'un agent conditionne ses actions et relations avec son entourage. Si les agents, tels qu'ils sont décrits au niveau agent, ne possèdent pas de base de connaissances sur leur entourage, alors un agent particulier n'a aucune "conscience" de l'existence de ses semblables et leur regroupement au sein d'un système multi-agents est purement arbitraire. Pour obtenir des échanges entre agents au niveau système, il faut que chacun d'eux possède les capacités nécessaires à la réalisation de ces échanges. Ainsi, des agents coopératifs ayant conscience d'appartenir à un groupe, créent des échanges mutuels, par la communication d'informations portant sur les caractéristiques des agents, sur celles de l'environnement et sur ce qui est en cours de réalisation.

De même, le niveau système influence le niveau univers, car les actions entreprises sur l'environnement seront de nature différente selon que le groupe est organisé ou non. Le résultat des actions peut être le même, mais les moyens pour y parvenir seront totalement différents, comme l'exemple du tri des cubes colorés l'a montré ci-dessus. L'influence du niveau système sur le niveau supérieur intervient aussi pour les aspects efficacité (temps de traitement, par exemple) et qualité (résultat complet ou non) des actions effectuées. L'efficacité avec laquelle les tâches sont réalisées et la qualité du résultat obtenu dépendent de la répartition des tâches parmi les membres du groupe, des communications passées, etc.

Par ailleurs, un phénomène peut apparaître au niveau Univers alors qu'il n'est pas explicitement programmé chez les agents, au niveau Agent. L'accumulation de comportements réactifs spécifiques conduit un observateur à reconnaître une structure englobant la totalité de ceux-ci. C'est le phénomène d'émergence étudié par Steels [90], Ferber [92], Drogoul [93], et qui sera présenté plus loin (§I.3.3).

En raison des liens d'influence entre les niveaux d'abstraction, il importe de concevoir les interactions entre les modules composant un agent (niveau Agent) dans l'optique d'obtenir tel résultat à l'échelle du groupe (niveau Système). De même, les interactions entre agents doivent être conçues en vue d'obtenir tel résultat à l'échelle de l'univers multi-agents (niveau Univers).

Nous nous intéressons aux moyens à donner aux agents (niveau Agent) pour qu'ils gèrent les interactions entre eux (niveau Système), en vue d'obtenir de la globalité du système multi-agent (au niveau Univers) une bonne "compréhension" de la tâche à réaliser et une réponse satisfaisante

par rapport à ce qui est attendu. Notre travail se situe donc plutôt au niveau comportemental des agents. L'objectif est global, les moyens relèveront à la fois du global et de l'individuel.

Dans ce cadre et après avoir déterminé ce que sont les agents, les méthodes qu'ils emploient pour agir sur l'environnement sont maintenant étudiées. La partie suivante présente le contexte de réalisation de tâche par un système multi-agents.

I.2 Réalisation d'une tâche par un système multi-agents

L'objectif est d'améliorer la réalisation d'une tâche par le système multi-agents. La tâche provient, soit d'une requête ponctuelle, donnée de l'extérieur du S.M.A. (par un humain ou par un autre S.M.A.), soit d'une responsabilité qui incombe au système pendant une durée déterminée (par exemple, surveillance d'un procédé, respect d'une consigne, traitement à lancer périodiquement). Afin d'introduire les particularités de la réalisation d'une tâche par un groupe, nous effectuerons une comparaison de celle-ci avec la réalisation de tâche par une seule entité (réalisation "mono-agent").

De manière générale, la réalisation d'une tâche par un agent se déroule schématiquement en trois phases (figure I.3) :

- 1) une phase de perception : l'agent prend "conscience" du fait qu'il a une tâche à réaliser,
- 2) une phase de cognition : l'agent détermine quelle est sa tâche et décide quand et comment la réaliser,
- 3) une phase d'action : réalisation effective de la tâche.

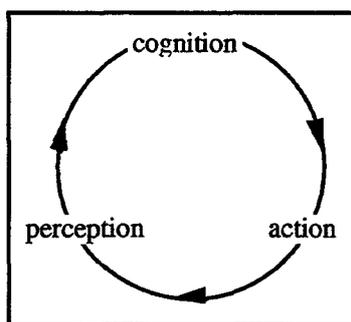


Fig. I.3 : Cycle de réalisation d'une tâche¹.

¹ Le cycle de réalisation reflète ce qui se passe dans la majorité des cas. Cependant, des cas particuliers existent (tâche simple et réalisée aussitôt ; tâche déjà vue dont le plan est mémorisé ; tâche irréalisable), dans ces cas, le cycle comprend des raccourcis entre les différentes étapes.

Ces trois phases forment un cycle par le bouclage de la phase action sur la phase perception. En effet, l'environnement évolue continûment et offre donc à tout moment, au système, de nouvelles données à percevoir et de nouvelles tâches à réaliser.

Le déroulement de la réalisation d'une tâche par plusieurs agents coopérants possède également ces trois phases, bien que celles-ci reflètent une réalité plus complexe. En effet, des problèmes supplémentaires se posent, dus à la "pluralité" de l'élément résolveur. Ceux-ci sont abordés dans les paragraphes suivants, qui présentent successivement les trois phases de perception, cognition et action.

I.2.1 Perception

La phase de perception est sensiblement la même que dans le cas d'un agent unique. La réception d'une tâche se fait selon trois canaux possibles : par communication (éventuellement au moyen d'une interface), par perception de son environnement, ou par fonctionnement interne.

La tâche reçue par communication est ponctuelle : elle parvient au système à un instant précis. De plus, elle suppose l'existence d'une entité capable de communication : l'émetteur est donc, soit un humain, soit un agent-machine appartenant à un autre système multi-agent. Par exemple, un étudiant demande à un système d'E.A.O. de lui démontrer un théorème.

Une tâche provient d'une perception lorsqu'une situation particulière est reconnue par les agents, dans l'environnement. Un ou plusieurs objets sont perçus comme étant dans des états indésirables et inacceptables par le système. Dans ce cas, les agents vont essayer d'agir sur les objets de l'environnement pour revenir à une situation acceptable.

Enfin, une tâche peut être déclenchée par fonctionnement interne. Il peut s'agir d'une tâche que le système sait devoir effectuer à telle et telle date ou lorsque le système se trouve dans telle situation interne. Par exemple, si un agent est ôté du système, celui-ci doit se reconfigurer.

Les trois situations de déclenchement de tâche sont susceptibles d'apparaître tour à tour pour un système. Par exemple, un groupe de robots se trouve en terrain inconnu, son objectif étant de ramasser certains minerais (cette situation est connue sous le nom des "robots fourrageurs"). Le groupe peut recevoir la demande directe et explicite de l'opérateur humain chargé de les piloter, de ramasser telle pierre (tâche provenant de l'extérieur et communication avec l'environnement) ; il peut repérer lui-même les minerais et décider des pierres à rapporter (tâche "intériorisée" et perception de l'environnement) ; le groupe peut devoir se reconfigurer suite à l'arrivée d'un agent-membre supplémentaire ou suite à la chute d'une pierre détruisant un des robots (tâche "intériorisée" et fonctionnement interne).

La réception d'une tâche est similaire pour un et pour plusieurs agents. La seule différence qui pourrait intervenir est celle du récepteur. En multi-agents, le récepteur peut être unique ou multiple.

Dans le cas de plusieurs agents récepteurs, un problème risque de se poser s'ils sont en désaccord à propos de la tâche à effectuer. En effet, les agents rendent intelligibles ce qu'ils perçoivent de l'environnement, grâce au filtre procuré par leurs connaissances. Des agents possédant des connaissances différentes vont interpréter différemment les informations reçues et leurs objectifs vont diverger. Par conséquent et afin de réduire notre champ d'étude, nous posons comme hypothèse que les agents ont une tâche commune à réaliser.

Les différences entre le *mono-* et le *multi-*agents apparaissent surtout à partir de la seconde phase, dite de "cognition", du cycle de réalisation.

I.2.2 Cognition

La seconde phase est appelée phase de *cognition*, car elle comprend un aspect traitement des connaissances. Des connaissances sont utilisées pour déterminer ce qu'il faut faire, quand et qui va le faire. Les problèmes que cela engendre seront exposés succinctement, ainsi que les solutions qu'il est possible d'y apporter.

Que le contexte soit mono- ou multi-agents, décider de ce qui est à faire, revient à produire l'ensemble des actions à effectuer pour réaliser la tâche. Le processus de génération de ces actions est la planification. C'est un domaine de recherche à part entière (une étude complète est proposée par Regnier [91]), dont ce travail ne fait qu'utiliser certains résultats. Le principe fondamental est la réduction de la complexité du problème par sa décomposition en petites parcelles plus simples. Pour un agent isolé, ces petites parcelles sont les actions qu'il a à effectuer pour modifier son environnement, afin d'obtenir la situation voulue. En contexte multi-agents, la tâche globale est décomposée en tâches plus simples, chacune d'elles nécessitant l'intervention d'un nombre moindre d'agents, jusqu'à l'obtention de tâches connues comme étant réalisables par un seul agent. Celles-ci sont qualifiées de "primitives". Le résultat du processus de décomposition est un graphe¹ de tâches, représentant des tâches de plus en plus simples du sommet au pied du graphe.

Les contraintes temporelles sur les tâches ne sont pas représentées directement dans le graphe mais elles existent néanmoins. Certaines actions nécessitent l'achèvement d'autres pour être réalisées ; certaines peuvent être réalisées en parallèle. Le plan de réalisation d'une tâche est donc un ensemble structuré de tâches plus simples qui, exécutées selon certaines contraintes chronologiques, permettent d'obtenir son accomplissement. La figure I.4 illustre un exemple de représentation d'un plan par l'arbre de tâches correspondant. Supposons un système dont les agents sont capables d'effectuer des calculs de dérivées. Si la tâche globale est : "Calculer la dérivée du polynôme $P = 4 + 3x + x^2/(2x - 1) - 1/x^3$ " et que le système a pour consigne de réaliser cette tâche rapidement, le mieux est de la décomposer en quatre sous-tâches (T1, T2, T3,

¹ Le graphe obtenu est connexe et non cyclique : il s'agit donc d'un arbre.

T4) correspondant aux quatre éléments composant P. Le troisième élément (T3) est à nouveau décomposé en deux éléments (T31 et T32). T1, T2 et T4 sont réalisables directement. Pour réaliser T3, il faut achever T31 et T32. Le calcul des éléments de bas niveau — les tâches primitives T1, T2, T31, T32 et T4 — peut se faire indépendamment et en parallèle, tandis que leur synthèse — tâches T3 et P — est réalisée par des agents ayant connaissance des différents résultats obtenus. En particulier, la réalisation de la tâche T3 nécessite l'utilisation d'une formule spécifique, tandis que la tâche P de regroupement global ne demande qu'une simple addition. Les seules contraintes temporelles présentées dans cet exemple sont la réalisation des tâches T31 et T32 avant T3, et celle de T1, T2, T3 et T4 avant P. Les tâches non primitives comme P et T3, comprennent généralement l'aspect coordination entre celles du niveau inférieur.

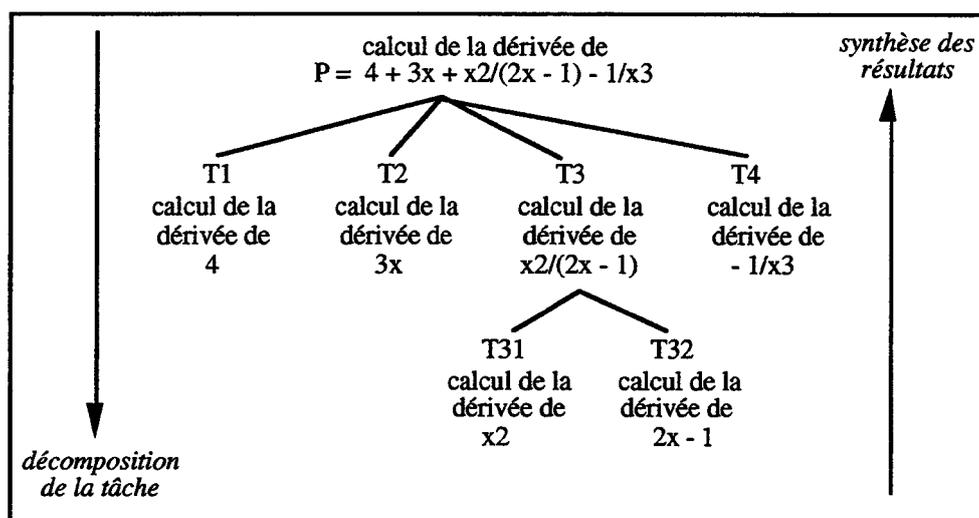


Fig. I.4: Exemple de décomposition d'une tâche globale.

Pour un agent isolé, la planification est un acte de raisonnement individuel. Par contre, plusieurs agents raisonnant simultanément sur le même problème, peuvent aboutir à deux situations : une situation d'harmonie, si les résultats de leurs réflexions sont identiques ; ou une situation discordante, si leurs résultats diffèrent. La situation discordante apparaît comme étant la plus plausible des deux. En effet, les agents basent leur raisonnement sur les connaissances qu'ils ont de l'environnement et des autres agents. Or, dans un système distribué, les connaissances personnelles des agents diffèrent. Les agents doivent donc trouver un moyen de s'accorder. Dans ce but, trois méthodes existent : (I) la communication, (II) le raisonnement sur autrui et (III) la centralisation de la planification. (I) Par l'échange de connaissances sur eux-mêmes, sur l'environnement et sur l'état d'avancement de leur raisonnement, les agents peuvent parvenir à réaliser une oeuvre en commun (par exemple, grâce à l'utilisation de plans partiels [Durfee 90]). (II) Un autre moyen est le raisonnement sur autrui, fondé sur l'utilisation d'une logique manipulant des croyances mutuelles [Mandiau 93]. (III) En dernier recours, la solution est de faire créer le plan par un seul agent, qui le diffuse ensuite aux autres agents [Georgeff 83].

Le plan étant fixé, il s'agit de décider qui fait quoi. Pour un seul agent, ceci est rapidement décidé : l'agent réalise toutes les tâches de son plan d'action. En multi-agents, les tâches sont attribuées aux agents qui ont les capacités nécessaires à leur réalisation. Précisément, l'attribution d'une tâche est l'action d'associer à cette tâche un agent responsable de sa réalisation. L'attribution est faite par les agents entre eux : ce sont eux qui doivent s'arranger pour que toutes les tâches à réaliser le soient effectivement et le plus efficacement possible. Le problème qui se pose ici est celui de déterminer l'agent qui est le plus compétent pour effectuer telle tâche. Puisqu'a priori, aucun des agents ne connaît toutes les compétences de tous ses congénères, ils doivent s'informer les uns les autres des actions qu'ils sont capables de faire.

La façon dont les tâches sont attribuées aux agents est basée sur les liens communicationnels existant entre eux.

Si l'agent A connaît l'agent B (B fait parti des accointances de A), il peut entrer en contact avec lui et lui proposer d'effectuer la tâche T. Ensuite,

- si B est capable de réaliser T, il peut, soit ajouter directement T à la liste des tâches qui lui sont attribuées, soit informer qu'il est, en effet, capable de faire T s'il le faut (il s'engage à le faire) ;
- si B n'est pas capable de faire T, il peut, soit simplement informer A de son incapacité, soit propager la requête vers une de ses propres accointances.

Il existe ainsi de nombreuses solutions possibles au problème de l'attribution des tâches parmi les agents, incluant ou n'incluant pas réponse aux requêtes, propagation et engagement. Ces solutions dépendent fortement de la structure du réseau formé par les liens entre agents au sein du système.

La phase de cognition comprend donc, en contexte multi-agents, une phase de planification et une phase d'attribution des tâches. Lorsqu'un plan de réalisation existe et que les tâches du plan sont attribuées aux agents compétents, les agents peuvent agir. Cette nouvelle étape est présentée au paragraphe suivant.

I.2.3 Action

Le troisième phase est celle de la réalisation effective de la tâche. La tâche a été décomposée en sous-tâches réalisables. Leur réalisation se concrétise par des actions sur l'environnement. En accord avec [Jacopin 93], une action signifie, dans notre contexte, ce qui est utilisé, pour modifier un élément de l'environnement, par un agent selon ses capacités.

Toutefois, l'environnement considéré est celui du système. Par conséquent, les actions sont des actions "physiques" ou des actes de communication. Les actions "physiques" modifient l'état d'objets de l'environnement. Les actes de communication sont utilisés par les agents entre eux ou

vers l'extérieur du système, lorsqu'il existe un autre système multi-agents dans l'environnement, qui soit capable de recevoir cette communication. Les tâches primitives sont assimilables à des actions et sont donc de nature concrète.

Deux actions peuvent avoir des effets incompatibles sur l'environnement. Ces actions sont dépendantes l'une de l'autre et seront donc exécutées dans un ordre spécifique pour obtenir les effets désirés. Il suffit à un agent isolé de respecter l'ordre temporel adéquat entre les différentes actions, pour achever, séquentiellement, son plan. En multi-agents, les agents peuvent aboutir plus vite au résultat désiré, car ils peuvent effectuer des actions en parallèle. C'est un avantage qui a son revers. En effet, les actions à forte contrainte temporelle doivent être coordonnées.

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, la coordination entre les tâches et donc entre ceux qui les réalisent, est nécessaire, afin de respecter l'ordre temporel dans lequel les actions vont être faites. Dans l'exemple précédent (figure I.4), à cause de la contrainte "réaliser T32 avant T3", les agents doivent coordonner leurs actions pour que T31 et T32 soient réalisées dans cet ordre ; par ailleurs, rien n'empêche la réalisation simultanée des tâches T1 et T2. Supposons que les tâches T32 et T3 aient été attribuées à deux agents différents. Une façon de coordonner les tâches T32 et T3 est de décider que lorsque T32 sera réalisée, l'agent chargé de T32 préviendra l'agent chargé de T3 qu'il a l'autorisation de démarrer ses actions. Une autre façon de procéder est de choisir un agent qui fera le lien entre les agents chargés de T32 et de T3, qui donnera la permission à ceux-ci de démarrer leur travail. Il existe bien sûr d'autres possibilités pour coordonner T32 et T3 que ces deux exemples. Il faut donc choisir dans quel "cadre" ou "structure" les actions seront effectuées, cette structure déterminant la manière dont seront coordonnées les actions et la nature des messages échangés au sein du groupe. Cette structure est une *organisation*.

L'étude de la réalisation d'une tâche par un système multi-agents nous a permis d'aborder les notions de planification, d'attribution de tâches et de coordination. La nécessité d'une structure d'organisation au sein du système est apparue. L'organisation des agents, dans le but de réaliser un plan, contient les deux aspects : attribution de tâches aux agents compétents et coordination entre agents. Elle fait l'objet de dernière partie de ce chapitre.

I.3 Organisation

L'étude de l'organisation d'un système multi-agents est divisée en trois paragraphes. Un premier paragraphe définit l'organisation selon deux perspectives. Chacune d'elles est ensuite exposée en détail, dans chacun des paragraphes suivants.

I.3.1 Une définition double

Pour un système multi-agents, la phase cognition du cycle de réalisation d'une tâche, comprend des étapes de planification, d'attribution de tâches et de coordination. L'attribution de tâches aux agents et la coordination entre ces tâches sont des phases d'organisation entre les agents. Elles déterminent par qui et quand la tâche va être réalisée. La structuration des échanges supportant la recherche des agents compétents et la coordination entre ceux-ci, est envisageable suivant divers procédés. Lorsque cette recherche est explicitée du point de vue d'un agent particulier, les procédés utilisés sont dénommés "modes de coopération". Hautin [86] en a retenu trois¹ :

- le mode commande : un agent (maître) décompose le problème et répartit les sous-tâches parmi les autres agents (esclaves).
- le mode appel d'offre : un agent (maître) diffuse à tous une demande de réalisation de tâche ; des agents lui répondent en offrant leurs compétences ; le maître en sélectionne certains, qui deviennent momentanément ses esclaves.
- le mode compétition : tous les agents proposent des solutions à toutes les sous-tâches, un agent maître opérant une sélection finale entre les différentes réponses.

Ces modes de coopération sont des méthodes permettant de déterminer qui va faire quoi et comment. La coopération entre les agents y est structurée par certaines règles de comportement. Par exemple, un agent maître a le droit d'ordonner d'exécuter la tâche T à un agent esclave qu'il sait posséder la compétence nécessaire. Les modes de coopération sont les méthodes employées ponctuellement par tel ou tel agent. Il s'agit d'un point de vue individuel. Reprenons l'exemple ci-dessus, l'agent esclave peut faire "sous-traiter" une partie de son travail par un autre agent, par rapport auquel il devient un agent maître. Si ce schéma est répété, les relations entre les agents seront de type hiérarchique. Du point de vue d'un observateur externe au système, les agents composent une hiérarchie. Le mode de coopération observable entre deux agents est donc une vue "interne" de l'organisation observable à l'échelle du système global.

¹ Par la suite, Potet [90] a étudié deux modes supplémentaires (les modes négociation et diffusion).

L'organisation — façon dont les échanges sont structurés et dont la répartition des tâches est faite entre les agents — est le résultat de ... l'organisation. En effet, le terme "organisation" désigne à la fois l'action d'organiser et la structure résultante. En cas d'ambiguïté, nous donnerons l'appellation de "structure organisationnelle" à cette dernière. Nous proposons par conséquent une double définition pour ce terme en contexte multi-agents, prenant en compte les aspects "résultat" et "action" qui le composent :

L'organisation d'un système multi-agent est la structure supportant les liens de communication et de contrôle entre les agents et l'action de constitution de cette structure.

L'organisation d'un système multi-agents varie selon le type des agents qui le composent. Les agents de type cognitif composent généralement des *organisations à structure imposée* dès la conception du système. Des ensembles d'agents de type réactifs forment diverses organisations dites *émergentes*.

I.3.2 Organisations à structure imposée

Les relations entre agents cognitifs sont régies par des règles différentes selon l'importance de la décentralisation du contrôle et des connaissances. Gasser [92a] a classé les organisations distribuées en quatre catégories : centralisée, de marché, en communauté pluraliste et en communauté à règles de comportement.

L'organisation centralisée est la plus évidente des quatre, car usuelle dans les groupes humains. C'est une configuration hiérarchique, les liens entre agents sont de type maître-esclave. A chaque niveau, les "maîtres" centralisent les pouvoirs de prise de décision et de contrôle.

Les organisations de marché sont basées sur le principe du contrat : un agent (le "manager") diffuse une offre au groupe (ou à une partie du groupe). Certains des agents proposent leurs services. L'agent manager choisit l'un d'entre eux et conclut un contrat. Les organisations de ce type sont donc formées d'agents indépendants qui résolvent leurs tâches individuelles en soumettant des sous-tâches aux autres. L'exemple de référence est le "Contract-NET" [Smith 80].

Les communautés pluralistes sont composées d'agents indépendants. Ils préparent des solutions aux problèmes et communiquent leurs résultats aux autres membres de la communauté. Ceux-ci vérifient, invalident ou améliorent les propositions de leurs pairs ([Kornfeld 81], [Lesser 83]).

Le dernier type d'organisation, la communauté à règles de comportement, est une communauté de spécialistes qui interagissent selon des protocoles définis. Les systèmes multi-experts et multi-sources de connaissances [Gleizes 90] appartiennent à cette catégorie. Le contrôle et la

communication entre les spécialistes sont le plus souvent réalisés par la technique du tableau noir, dont les réalisations et outils les plus connus ont pour noms : Hearsay (le précurseur, [Erman 80]), GBB [Corkill 86] et BB1 [Hayes-Roth 88]. Des règles (hiérarchie, priorités) gèrent l'accès aux différents niveaux du tableau.

Ces quatre types de structures sont basés sur des modèles d'organisations humaines. Les groupes humains les plus représentatifs du modèle hiérarchique sont l'armée et le clergé. L'organisation de marché reflète la méthode appel d'offre et passation de contrat qui existe dans l'univers économique réel. La communauté scientifique est donnée comme exemple pour le modèle de communauté pluraliste. Enfin, les règles de comportement du dernier type d'organisation sont similaires aux lois d'une société humaine. Dans le cadre de l'étude d'organisations multi-agents, il semble par conséquent pertinent de s'intéresser à certains domaines des sciences humaines tels que la sociologie des organisations ou l'économie d'entreprise, afin d'essayer d'en retirer des résultats utiles.

Par ailleurs, pour toutes les configurations citées, le mode d'organisation est imposé au départ. Les agents ont une façon et une seule de coordonner leurs tâches. Ceci limite leurs possibilités quant à la diversité des tâches qu'elles sont capables de prendre en compte. Elles sont conçues dans l'optique de la réalisation d'un type particulier de tâches. Cela limite leurs possibilités d'adaptation à la survenance de tâches imprévues. Ces organisations sont fondées sur un principe, énoncé par Gasser [92a] : *“Une organisation fournit un schéma pour l'activité et l'interaction par la définition des rôles, comportements et relations d'autorité (contrôle).”* Si le schéma est fixé dès le départ et reste le même quoiqu'il arrive, le système se trouve incapable de s'adapter aux changements intervenant dans son environnement.

Après avoir détaillé les organisations à structure imposée, les organisations émergentes sont maintenant présentées.

I.3.3 Organisations émergentes

D'autres travaux proposent des groupes qui ne sont pas organisés dès l'origine et où les modes d'organisation émergent du comportement des membres du groupe. Chaque agent est une entité très simple, programmée pour réagir à certains stimuli en provenance de l'environnement. Et, à l'image des cellules constituant un organisme vivant, l'ensemble des réactions des agents donne l'impression (dans certains cas) qu'il s'agit d'un seul système complexe (par exemple l'Homme). Le principe de base semble d'une stupéfiante évidence en raison des nombreux exemples de systèmes de ce type fournis par la nature.

A partir de ce principe, différentes voies ont été explorées, dont les plus importantes sont celles-ci :

- Minsky [80] considère le cerveau comme étant composé de nombreux agents partiellement autonomes. Cette idée a servi de base aux travaux sur les réseaux de neurones artificiels (le connexionnisme). Un réseau (artificiel) de neurones fonctionne sur le principe du “renforcement du chemin le plus emprunté”. Cependant, ceux-ci ne sont pas encore véritablement utilisables en multi-agents. Les robots de Brooks [86] fonctionnent sur un principe plus complexe, toutefois apparenté, car utilisant des liens d’inhibition entre tâches de niveau de priorité différente.
- La notion d’action “réactive” a conduit, notamment, à la génération “réactive” de plan, ou encore : “planification courante”. Un exemple de ce type d’activité est fourni par le système Pengi [Agre 87], sous forme d’un jeu vidéo dans lequel un pingouin doit se débrouiller, dans un labyrinthe formé de blocs, pour rechercher des diamants en évitant des abeilles. Le pingouin modifie constamment ses actions en fonction des changements intervenant dans son environnement.
- Une autre voie explorée est celle basée sur les actions d’attraction et de répulsion. Ferber [92] définit de cette manière des éco-agents dont le comportement est guidé par une attraction vers les états qui satisfont ses buts et une répulsion pour les autres états. Les modifications de son environnement forcent l’agent à réagir. Zeghal [93] utilise un principe similaire, dans le contexte du trafic aérien. Les agents-avions sont amenés à s’éviter, par un système de vecteurs de force, lorsque leurs aires de sécurité deviennent trop proches.

Une synthèse des principaux travaux portant sur ces types d’agents est effectuée dans [Drogoul 93]. L’auteur y trace un portrait d’ensemble et simule différents comportements réactifs. Selon les règles implantées, les agents forment des types d’organisation différents. Les comportements varient ainsi des agents-fourmis spécialisés, qui effectuent un tri collectif, aux robots fourrageurs (dans la lignée de ceux de Steels [90]), qui laissent des traces de leur passage à la manière du “petit Poucet”, jusqu’aux robots dockers capables de former une chaîne afin d’améliorer l’efficacité de leur travail.

Ces modes de comportements sont plus flexibles que les organisations d’agents cognitifs évoquées au paragraphe précédent. En effet, ces systèmes mettent généralement en jeu un nombre assez important d’individus. Leur nombre, ajouté au fait qu’ils n’ont pas conscience de leur appartenance à un groupe, conduit à une grande souplesse du système. C’est l’adaptabilité de chaque agent qui se répercute au niveau supérieur. Il suffit que les conditions environnementales varient, pour que chaque individu réagisse différemment et que, par conséquent, des changements soient observables au niveau du groupe.

Cependant, les études en ce domaine sont, pour l'instant du moins, assez empiriques car il est très difficile, par la programmation de tel comportement individuel, de prédire son impact sur le comportement global du système. La répartition et la coordination des tâches n'est pas représentée explicitement dans le système ; les agents ne possèdent pas le niveau d'abstraction correspondant à la modélisation des échanges parmi eux. C'est pourquoi, parmi ces agents, l'organisation résulte non d'une volonté commune, mais de la somme de leurs comportements individuels. Il est donc difficile d'obtenir un comportement global spécifique de la part du système. Les études n'en étant qu'à leurs débuts, nous attendons de voir quelles seront les retombées de cette démarche. Cette voie semble prometteuse et complémentaire de la première.

Dans cette troisième partie, deux perspectives sur les organisations ont été exposées. Ces perspectives diffèrent par la façon de considérer l'organisation. L'une d'elles considère l'organisation selon l'angle "résultat" : ce sont les organisations à structure imposées. L'autre perspective aborde l'organisation par l'angle "action" : ce sont les organisations émergentes. De même que ces deux aspects permettent de définir complètement le terme "organisation", ils sont également tous deux utiles en conception de systèmes multi-agents.

Conclusion

L'étude présentée dans ce mémoire concerne plus particulièrement des systèmes coopérant dans le but de réaliser une tâche. Pour que le système soit capable de réaliser des tâches variées, il importe que sa structure soit assez flexible pour s'adapter à des situations diverses. Gasser [92b] exprime ceci de la manière suivante : *“L'organisation qui peut s'adapter à des circonstances changeantes en modifiant les structures d'interaction entre ses constituants, a le potentiel pour obtenir la cohérence dans des environnements à degré élevé d'incertitude ou de changement.”* Au vu des limites et des avantages complémentaires des organisations imposées et de celles émergentes, il nous semble intéressant d'avoir un système capable de prendre, volontairement, différents modes d'organisation. En résumé, nous cherchons à rendre “réactif” à son environnement de tâche, un système composé d'agents “cognitifs” (figure I.5).

niveau d'abstraction	modèle de conception
niveau univers	comportement réactif
niveau système	modèle cognitif avec une composante organisationnelle réactive
niveau agent	architecture cognitive

Fig. I.5 : Des agents cognitifs formant un système réactif.

Notre objectif est donc de rendre un système multi-agents capable de décider de l'organisation à adopter en vue de réaliser au mieux sa tâche, et capable de s'organiser selon la structure choisie.

Les hypothèses posées sont les suivantes :

- les agents sont de type cognitif (§ I.2.4),
- ils coopèrent à la réalisation d'une tâche commune (§ I.2.2 et I.3.1),
- ils ont effectué la première phase, dite de planification (§ I.3.2).

La figure I.6 synthétise le chemin directeur de la démarche suivie. Le cycle de réalisation d'une tâche par un système multi-agent est décomposé plus finement en phases de perception, planification, organisation et action.

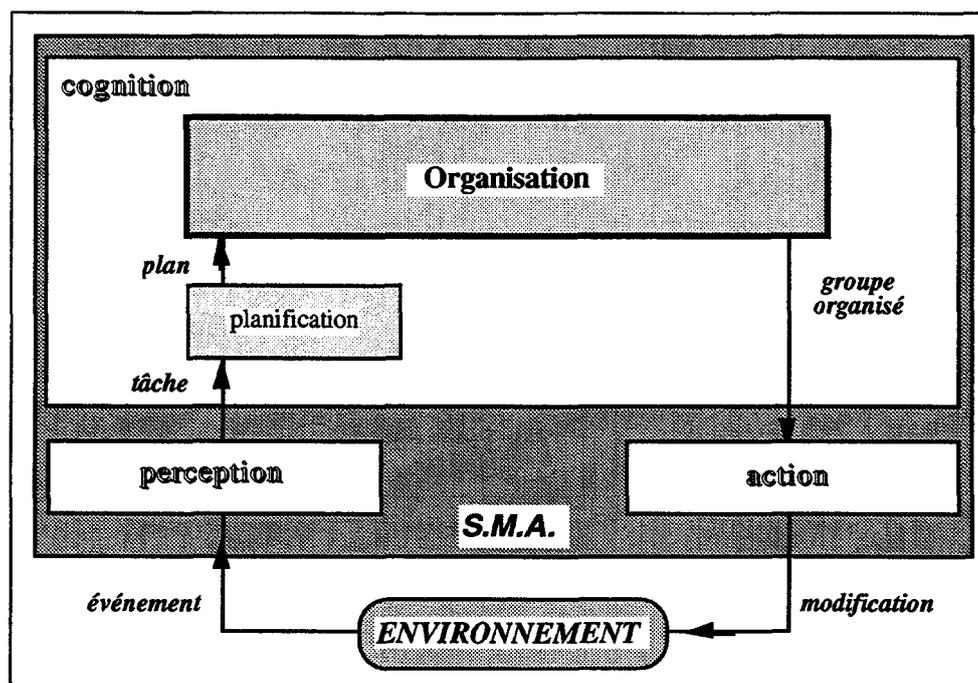


Fig. I.6 : Schéma général de réalisation d'une tâche par un S.M.A.

Les phases de perception et d'action sont identiques aux phases de la figure I.3 (§ I.2). Par contre, la phase de cognition est décomposée en deux étapes.

La première étape de la phase de cognition est la planification. Elle permet de créer un plan de réalisation de la tâche. Nous supposons cette phase réalisée¹, la planification étant déjà en elle-même un sujet complexe de recherche. Par la suite, un plan global de réalisation de la tâche sera supposé exister et être partagé par tous les agents.

La seconde étape est une étape d'organisation. D'après les caractéristiques du plan fourni par la précédente étape, les agents décident de l'organisation à adopter pour assurer la répartition des tâches parmi eux et la coordination entre elles. C'est une phase importante car, comme l'estime Sary [92], "*l'organisation du travail déterminera grandement le succès de la résolution de problème collaborative.*" L'étude et la mise en oeuvre de l'étape "organisation" du cycle de réalisation d'une tâche par un système multi-agents, constitue l'objectif de notre travail.

Dans ce premier chapitre, le contexte et la motivation de notre étude ont été exposés. La notion d'organisation multi-agents a été introduite. Le second chapitre se focalise sur cette notion essentielle.

¹ Pour une bonne synthèse des travaux en planification, le lecteur se référera aux travaux de Régner [94] et Jacopin [93].

Chapitre II

Étude des organisations

Introduction

Dans le premier chapitre, la complémentarité des approches réactives et cognitives dans la conception d'organisations multi-agents a été mise en évidence. En particulier, dans un contexte offrant des tâches variées à l'attention des agents, l'intérêt d'une forme de réactivité de leur organisation est apparu. Cette réactivité est vue comme l'adaptation du système à la situation courante, par le changement de sa structure organisationnelle.

En effet, deux types de solutions existent au problème de l'adaptation organisationnelle d'un groupe à différentes situations :

- La première solution repose sur un principe de généralisation selon lequel, si chaque membre du groupe s'adapte à son environnement local, il en sera de même pour l'ensemble du groupe. Ce principe est utilisé en I.A.D. réactive (cf. chapitre I).

Son inconvénient majeur réside selon nous, en l'incertitude sur le résultat, puisqu'il s'avère que le comportement global n'est absolument pas réductible à la somme des comportements individuels. Nous retiendrons cependant l'idée de l'obtention d'un état spécifique à un niveau supérieur (le niveau "univers" évoqué au chapitre I) grâce à un ensemble d'actions réalisées à un niveau inférieur (au niveau "système").

- La seconde solution consiste à modifier la structure même du système pour qu'il s'adapte aux nouvelles situations. La modification opère sur les relations entre les agents, sur la distribution des tâches parmi eux ou sur la composition du groupe.

Cette seconde solution semble plus "déterministe" que la première car les règles d'adaptation sont positionnées au niveau auquel le résultat est attendu. C'est la raison pour laquelle nous nous attacherons plus particulièrement aux méthodes de ce type.

Dans la première partie de ce chapitre, les principales méthodes existantes sont présentées et confrontées à celle que nous proposons. Afin de mener à bien la réalisation de cette nouvelle méthode d'adaptation du système multi-agents, il apparaît nécessaire de rechercher quels sont les types principaux d'organisations, les moyens de les représenter et leurs aptitudes en différents contextes. C'est dans ce but que la nature des organisations est étudiée dans une deuxième partie, la troisième partie étant consacrée au recensement de leurs caractéristiques relatives.

II.1 Adaptation organisationnelle

L'adaptation organisationnelle d'un système multi-agents est la faculté qu'a celui-ci de modifier sa propre structure organisationnelle, dans le but de s'adapter au contexte présent. Elle offre différentes possibilités de réalisation. Une organisation est en effet modifiable, par exemple, par variation du nombre de ses composants, par des regroupements différents entre ceux-ci ou par une redistribution des tâches qui leur sont affectées.

Trois méthodes sont ainsi exposées, elles offrent des moyens d'adaptation différents. Nous ajouterons à celles-ci une quatrième conception de l'adaptation d'un système, par modification de la structure organisationnelle. Cette dernière approche permet de respecter les contraintes concernant les systèmes multi-agents, telles qu'elles ont été posées au chapitre précédent.

II.1.1 Évolution du nombre d'agents

Selon l'approche O.S.D. (Organization Self-Design), les problèmes sont résolus par une société d'agents distribués solveurs de problème, dans le but d'atteindre une meilleure performance temps réel, à travers la réorganisation de la société.

Ishida [92], par exemple, conçoit les réorganisations par modification de la ressource "agents". Les ajouts d'agents rendent possible la division des tâches parmi eux, l'agrégation de tâches étant obtenue par retraits d'agents. Chaque agent calcule régulièrement son taux d'activité, à savoir le nombre de règles déclenchées durant un intervalle de temps de référence, et la performance du système, c'est-à-dire le temps d'exécution d'une tâche par rapport à un temps limite prédéfini. Lorsque ces valeurs, appelées statistiques locales et organisationnelles (voir figure II.1), atteignent des seuils donnés, des règles de réorganisation sont déclenchées. Si un agent P a déclenché une règle de composition, il recherche parmi les autres agents, un agent Q se trouvant dans la même situation de composition, lui transfère ses connaissances, puis se détruit. La décomposition consiste pour l'agent P à créer un nouvel agent Q et à lui transférer la moitié du contenu de sa base de connaissances.

Ainsi, leur diminution, par composition (combinaison) de deux agents en un, est un moyen de résoudre des problèmes de coordination entre tâches contraintes. Au contraire, la multiplication des agents, par décomposition d'un agent en deux, permet d'accroître l'exécution de façon concurrente des actions non contraintes.

Toutefois, cette solution ne peut s'appliquer à un système multi-agents qui peut être modifié par ajout ou retrait d'agents, mais qui ne possède pas les moyens d'effectuer ces changements lui-même. Or, nous posons l'hypothèse d'agents ne pouvant ni créer, ni détruire l'un des leurs de leur

propre initiative, par souci de réalisme, dans l'éventualité où le système comprendrait des humains.

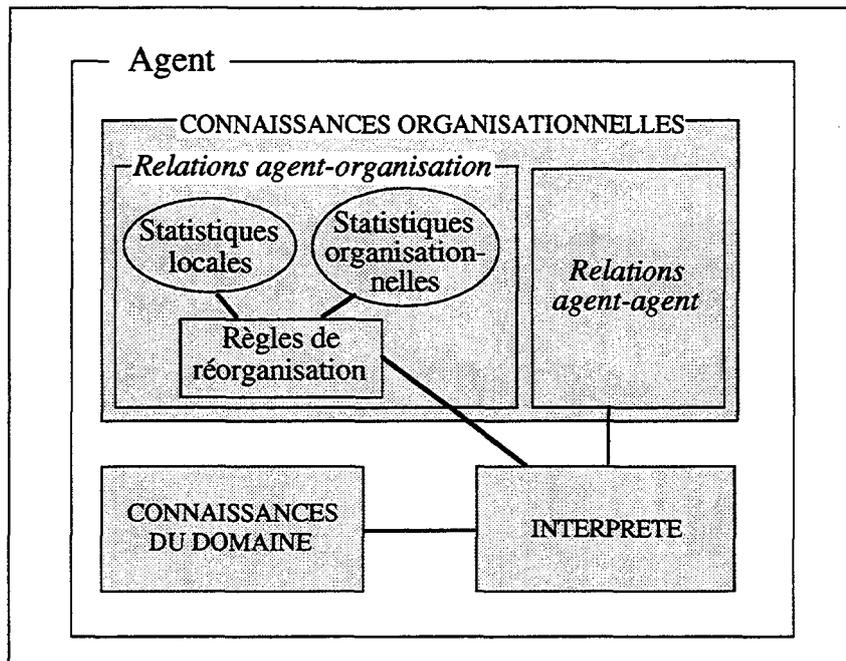


Fig. II.1 : Architecture d'un agent O.S.D. (adapté de [Ishida 92]).

II.1.2 Regroupement d'agents

Dans la lignée O.S.D. mais plus centré sur la communication, le modèle organisationnel proposé par Maruichi [90] est conçu sur une transformation de la société. Des modifications dans les regroupements entre agents entraînent une structuration différente des échanges. En effet, des agents appartenant à un même groupe, comme A7 et A8 en figure II.2, partagent un ensemble de connaissances (appelé "environnement") et ont la possibilité de communiquer de manière privilégiée par diffusion d'un message à tous les membres du groupe et à eux seuls. Un agent donné peut appartenir à plusieurs groupes comme l'agent A2 en figure II.2. L'organisation est dite dynamique à partir du moment où un agent peut entrer ou sortir du groupe.

Ce mode de réorganisation est plus réaliste mais insuffisant, car il ne fait que modifier les interlocuteurs effectuant les échanges et non le contenu de ceux-ci. La réorganisation prend effet principalement sur les connaissances mises à la disposition d'un agent, alors que le besoin d'un changement dans leur mode d'utilisation peut se faire sentir. Par exemple, dans la configuration illustrée par la figure II.2, si l'agent A1 est le seul à détenir une information clé pour la tâche assignée au groupe composé de A7 et A8, la recherche de cette information va être longue en raison de la séparation qui est faite entre les différents groupes d'agents. Or, la connaissance possédée par A1 aurait dû faire de cet agent le membre principal du groupe chargé de résoudre la tâche correspondante.

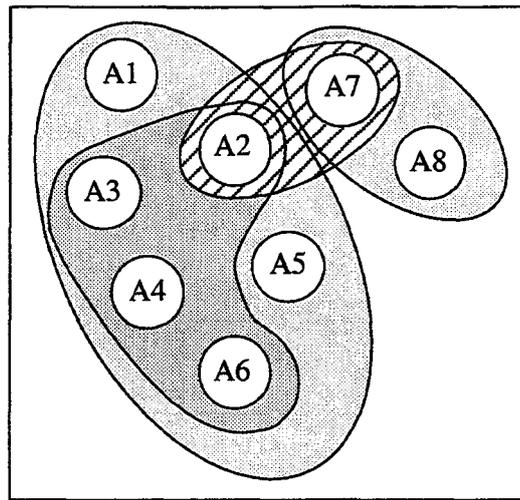


Fig. II.2 : Exemple d'organisation par regroupement d'agents
(adapté de [Maruichi 90]).

II.1.3 Mécanismes de flux

Dans le modèle AM/AG (Shin [90]), le traitement organisationnel n'est pas effectué sur les agents eux-mêmes mais sur les données qu'ils manipulent. En effet, le système de résolution de problème proposé est fondé sur des mécanismes de flux d'information, à partir d'une approche empruntée à la sociologie des organisations. Deux mécanismes sont appliqués aux tâches, à savoir un mécanisme d'amplification (AM) et un d'agrégation (AG). L'amplification résulte de la décomposition d'une tâche en un ensemble de sous-tâches ; l'agrégation est la combinaison et l'unification des résultats (figure II.3).

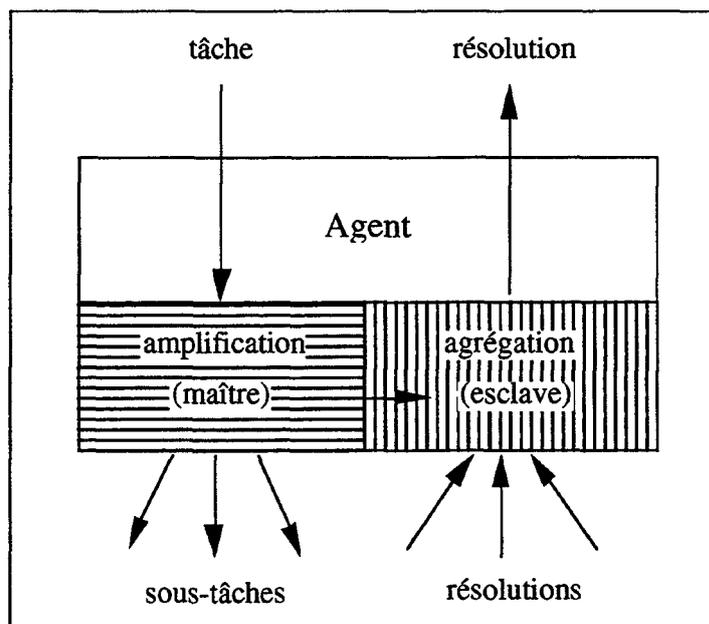


Fig. II.3 : Méthode AM/AG (d'après [Shin 90]).

Cette méthode consiste donc en une nouvelle décomposition de la tâche à réaliser. L'adaptation est recherchée en modifiant ce qui est à faire et non la façon de le faire. Il est bien évident qu'une tâche très "structurée", décomposable de manière unique, ne peut faire l'objet d'une telle modification. Nous considérons que le modèle AM/AG s'applique plutôt au domaine de la replanification que de la réorganisation.

II.1.4 Modification de la structure organisationnelle

Nous proposons une alternative aux précédentes méthodes, qui consiste à modifier la structure supportant les échanges et la coordination entre les agents. Par cette méthode, seuls sont modifiés les liens entre les agents et, par conséquent, leur manière d'utiliser leur potentiel en termes de connaissance et de capacité d'action, sans que ce potentiel ne soit modifié.

Cette quatrième approche s'inspire de la théorie des systèmes utilisée en physique. Elle considère que le S.M.A. apte à résoudre un problème se trouve dans un état stable, et que celui cherchant à s'adapter à une nouvelle situation se trouve dans un état instable. L'étude de la dynamique de l'organisation est donc l'étude de cet état passager au cours duquel la structure organisationnelle est modifiée (figure II.4).

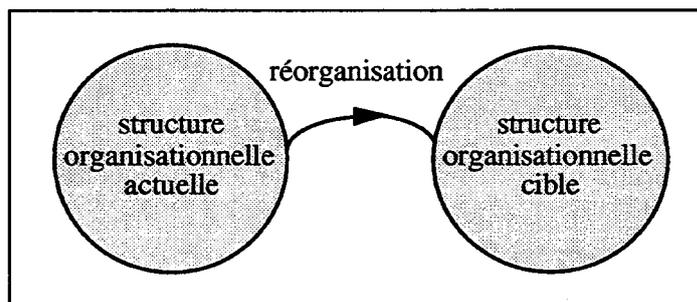


Fig. II.4 : La dynamique de l'organisation.

Une telle méthode suppose que le S.M.A. est capable de choisir quelle est la nouvelle structure à adopter étant donnée la situation courante [Le Strugeon 93]. Elle suppose, de plus, qu'il existe un moyen pour les agents de mettre en œuvre localement, pour chaque individu, la structure choisie au niveau global. Le processus d'adaptation organisationnelle passe donc nécessairement par les trois étapes suivantes (cf. figure II.5) :

- La première étape concerne la spécification de la situation courante. En effet, pour que le S.M.A. puisse s'adapter au contexte, il faut qu'il possède des connaissances sur celui-ci. Le problème est de concevoir une spécification qui extrait des informations pertinentes dans le but recherché, parmi celles qui sont perçues par le S.M.A.
- La deuxième étape vise le choix d'un élément parmi un ensemble de représentations d'organisations. Il faut donc décider quelles sont les organisations devant constituer cette base de données et définir une procédure de choix parmi elles.

- La troisième étape consiste à mettre en place la nouvelle organisation. Il s'agit du processus de réorganisation énoncé ci-dessus.

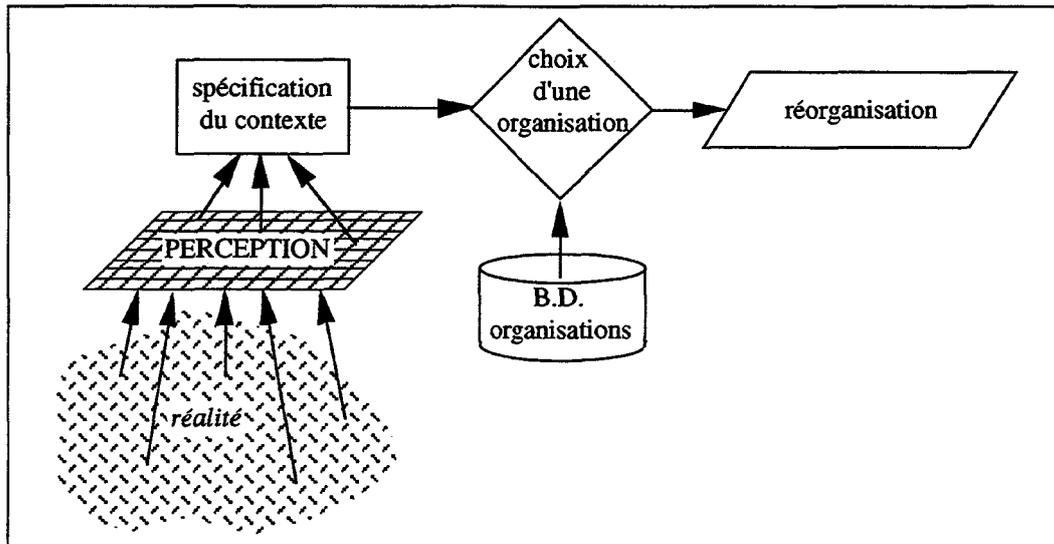


Fig. II.5 : Processus d'adaptation du S.M.A. par modification de la structure organisationnelle.

La mise en oeuvre du processus d'adaptation d'un S.M.A. par réorganisation que nous proposons, suppose que ces différents problèmes soient résolus. Parmi ces problèmes, la détermination des organisations à insérer dans la base de données et celle des critères de choix pour l'utilisation de celle-ci nécessitent des connaissances sur les organisations. C'est pourquoi l'étude préliminaire d'organisations (réelles ou simulées), nécessaire à la poursuite de notre objectif, fait l'objet de la partie suivante. Sur la base des informations mises en évidence, différentes études de comparaison entre organisations seront recensées en dernière partie. L'action de réorganisation des agents sera étudiée dans le chapitre III.

II.2 Vers une classification des organisations

L'objectif de cette deuxième partie est de dessiner les traits fondamentaux qui caractérisent les organisations et permettent de les distinguer les unes des autres. Dans ce but, un premier paragraphe expose différentes représentations qui mettent en évidence les caractéristiques des organisations. Des tentatives de classification utilisant certains de ces traits distinctifs existent, elles sont présentées dans le second paragraphe.

L'étude des organisations est présente dans la recherche en I.A.D., mais également en sciences humaines, principalement en sociologie des organisations et en économie. N'étant pas spécialistes en sciences humaines, nous nous contenterons d'en extraire quelques résultats significatifs en vue de notre objectif.

II.2.1 Représentation d'une structure organisationnelle

Les descriptions les plus représentatives fournies par la littérature, sont celles de Mintzberg et Bernoux, en sociologie, de Werner et Pattison en I.A.D. Les éléments composant la structure d'une organisation énoncés par ces auteurs offrent des recoupements, dont le modèle de Pattison propose une intégration pertinente pour notre objectif.

II.2.1.1 Les représentations existant en sociologie

Mintzberg [82] décrit les organisations humaines comme étant formées de cinq éléments (figure II.6). Ces éléments se distinguent par leur fonction dans l'organisation :

- le sommet stratégique s'occupe de la prise de décision à un niveau global,
- la ligne hiérarchique est formée par les décideurs et coordinateurs de niveaux "locaux",
- le centre opérationnel est directement lié aux fonctions de production,
- la technostructure a une fonction d'analyse et de standardisation,
- les fonctions de support logistique.

Selon l'importance relative de ces éléments, cinq formes d'organisations sont décrites. Elles reflètent des mécanismes de coordination différents associés à une décentralisation (verticale et horizontale) plus ou moins forte. L'auteur s'attache plus particulièrement à l'aspect "processus" dynamique, aux flux d'informations circulant entre les éléments qui forment l'organisation. Cette conception "dynamique" de l'organisation est utilisée en multi-agents, dans le modèle AM/AG présenté au paragraphe II.1.3.

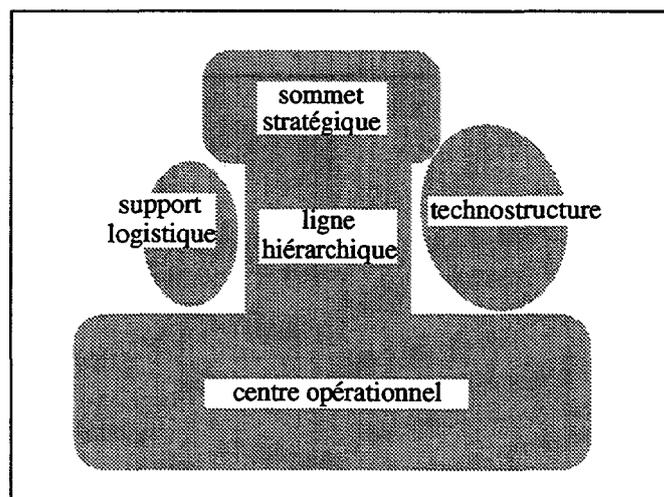


Fig. II.6 : Les cinq éléments fondamentaux d'une structure organisationnelle, d'après Mintzberg[86].

Selon Bernoux [85], les organisations sont généralement caractérisées par cinq critères : la division des tâches, la distribution des rôles, le système d'autorité, celui de communication et celui de contribution-rétribution. Ce dernier critère n'apparaît que dans les organisations humaines, aussi n'en tiendrons-nous pas compte. La division des tâches est inhérente à la distribution des rôles¹, puisqu'elle en dépend. L'auteur cite Jean-Louis Le Moigne : *“Il est aussi important d'identifier l'ensemble, la totalité des éléments et les relations entre les éléments que d'analyser indépendamment les attributs de chacun d'eux.”* Ceci s'accorde avec l'approche prise dans cette étude, qui conçoit l'organisation du système en entier et non celle de chacun de ses éléments séparément.

II.2.1.2 Les représentations existant en I.A.D.

Différemment, la structure d'une organisation peut être vue selon le mode de répartition des tâches parmi les intervenants. Ainsi, Fox [81] conçoit l'organisation comme étant formée d'une structure et d'un régime de contrôle. Les structures varient des hiérarchies strictes aux hétérarchies ; deux régimes de contrôle sont évoqués : le contrôle direct, où des agents sont directement contrôlés par d'autres, et le contrôle contractuel, résultant des obligations créées par le passage de contrats entre les agents.

Pour Werner [88], les éléments fondamentaux d'un groupe social — un groupe formé d'agents coopérant dans un but commun — sont la structure sociale et la distribution des rôles. Une structure sociale s'établit parmi des agents grâce à l'instauration de rôles sociaux. Lorsqu'un agent acquiert un rôle, ses activités sont contraintes par des “autorisions” et des “responsabilités”. Par cette méthode, la structure de l'organisation est vue et créée de “l'intérieur” du système. La structure globale est formée de l'assemblage d'éléments directement liés aux agents : *“La société générée par la structure sociale fonctionne parce que les agents prennent des rôles sociaux qui réalisent les buts sociaux”*. Ceci est applicable à petite échelle, en particulier entre deux individus (l'auteur donne l'exemple du groupe formé par un maçon et son apprenti), mais ne permet pas de définir l'organisation globale résultante pour un nombre plus important d'agents.

La notion de rôle existe également dans la méthode de description préconisée par Pattison [87]. Cette méthode est intéressante car elle décrit l'organisation de façon analytique, du global vers le particulier. En effet, elle spécifie une organisation par l'ensemble de ses composants et des relations entre eux. Un composant est défini par son type (individuel ou composite), ses responsabilités, ressources, connaissances et caractéristiques individuelles. Les relations les plus importantes sont les relations de communication et d'autorité, mais il en existe de nombreuses autres, telles que la relation de proximité. Un exemple d'utilisation de cette représentation est

¹Une discussion, exposée au chapitre III et relative à la distinction entre rôle et responsabilité, rejoint cette séparation entre rôle et tâche(s).

illustré par la figure II.7. Elle nécessite cinq descriptions de structures hiérarchiques. Selon une lecture descendante de la figure, l'intégrateur le plus élevé est relié à quatre autres intégrateurs d'un niveau inférieur, selon une organisation en hiérarchie. Chacun de ces intégrateurs est l'élément le plus élevé d'une sous-hiérarchie. Les quatre sous-hiérarchies sont décrites de la même manière, par leurs composants (intégrateurs, synthétiseurs et capteurs) et les relations entre ceux-ci (relations intégrateur-synthétiseur et synthétiseur-capteur).

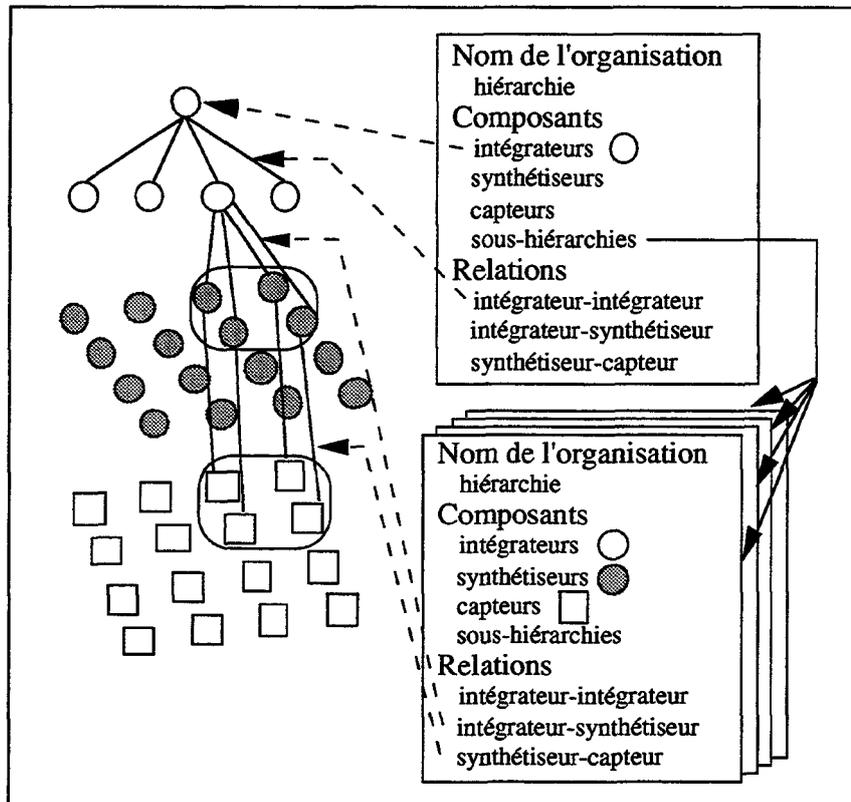


Fig. II.7 : Exemple de représentation d'une organisation, d'après Pattison [87].

Cette méthode correspond plus à nos attentes que les méthodes citées précédemment. Cependant, certaines caractéristiques apparaissent comme étant interdépendantes : les ressources nécessaires au composant pour réaliser ses tâches dépendent de ses responsabilités ; de même, ses connaissances et caractéristiques individuelles dépendent des agents particuliers qui sont les composants. La méthode apparaît donc plus comme un moyen de décrire une organisation existante ou d'en créer une nouvelle, de "l'extérieur" du système, que comme un moyen donné aux agents pour s'organiser eux-mêmes.

II.2.2 Tentatives de classification

La connaissance des organisations passe par celle de leurs similitudes et de leurs différences et donc par leur classification. Or, bien que, comme le dit Chanlat (cité par [Ballé 90], p.78), les recherches effectuées en “théorie des organisations” tentent d’établir une taxinomie des structures organisationnelles, celle-ci n’existe pas encore.

L’unité autour d’une classification n’étant pas encore établie, les critères utilisés à des fins de regroupement par type d’organisation diffèrent selon les auteurs. La classification la plus complexe est celle du sociologue Mintzberg, qui utilise trois critères de distinction des organisations. Celle proposée par un autre sociologue, Liu, selon le type de coordination, a également été retenue pour le travail de synthèse effectué sur les travaux antérieurs. A l’instar de Mintzberg évoqué ci-dessus, March constitue une référence quant à l’analyse des organisations. Son classement se base sur le type d’objectif poursuivi par l’organisation. En I.A.D., la classification proposée par Gasser et évoquée dans le chapitre I (§I.3.2) n’est pas unique, en particulier, un article de Fox datant de 1981 est une référence incontournable pour l’étude des organisations. Il les classe selon le mode de répartition de la prise de décision. Enfin, il sera fait mention de la classification usuelle, celle qui est la plus fréquemment évoquée malgré sa grande imprécision.

La présentation de ces différentes classifications est suivie d’une synthèse qui illustre les correspondances entre elles.

II.2.2.1 Classification selon trois critères

Mintzberg [82] distingue cinq configurations organisationnelles types : la structure simple (centralisation totale), la bureaucratie mécaniste (hiérarchie à décentralisation horizontale limitée), la bureaucratie professionnelle (à base de professionnels autonomes, décentralisation à la fois verticale et horizontale), la structure divisionnalisée (décentralisation verticale limitée) et l’adhocratie (fonctionnement par ajustements mutuels entre des groupes de projet). La distinction entre ces structures dépend du type de décentralisation, du type principal de coordination et des éléments principaux de l’organisation.

II.2.2.2 Classification par type de coordination

L’unique critère du type de coordination est utilisé par Liu [83] pour classer les organisations. Il regroupe les modèles d’organisation du travail en trois catégories : les modèles hiérarchiques, intermédiaires et non hiérarchiques. Les modèles hiérarchiques opèrent selon une séparation rigoureuse entre les fonctions de haut niveau comprenant les activités de conception, de coordination et de contrôle, et les fonctions de bas niveau, d’exécution. Les exécutants n’ont ni autonomie, ni responsabilité. Cette séparation n’existe pas dans les modèles non hiérarchiques.

Les modèles intermédiaires, comme leur nom l'indique, se situent entre les deux extrêmes. Selon l'auteur, la différence entre une organisation de type taylorien et une organisation à groupes autonomes (non hiérarchique) se situe au niveau des objectifs : le premier a un objectif purement économique, alors que le second ajoute à cet objectif celui de la qualité de vie au travail.

Une autre forme d'organisation, dite "matricielle", est présentée par Liu. Elle est inclassable, car le personnel y change d'organisation selon la situation et suivant les compétences des individus : "*l'organisation matricielle a une forme évolutive d'organisation*". "*La structure même de l'organisation change pour répondre aux conditions de la situation de travail.*" Cette forme d'organisation est très proche de ce que nous désirons obtenir pour le système multi-agents.

II.2.2.3 Classification par objectif

Différemment, la distinction entre les organisations effectuée par March [71], est fondée sur le type d'objectif poursuivi. Il a défini trois types d'organisations : unitaire, fédérale et composite. Une organisation dont l'activité est tournée vers un objectif opérationnel (c'est-à-dire réalisable immédiatement) unique est dite unitaire. Elle est fédérale si elle est composée d'organisations unitaires, composite si elle a plus d'un objectif opérationnel et si elle n'est pas composée de subdivisions unitaires.

II.2.2.4 Classification par type de répartition de la prise de décision

Les organisations évoquées par Fox [81] sont classées selon une progression dans la prise de décision. L'organisation la plus simple est composée d'un seul individu. Le groupe, c'est-à-dire une communauté d'individus indépendants et non coopérants, est juste un peu plus compliqué. Ensuite, viennent les organisations suivantes : hiérarchie simple (un chef commande à un ensemble d'exécutants), hiérarchie uniforme (plusieurs niveaux de prise de décision), hiérarchie multidivisionnelle (décisions réparties parmi des sous-divisions), "système de prix" (organisations disjointes qui négocient), organisation collective (négociation avec contrats à long terme), marché général (buts individuels).

II.2.2.5 Classification usuelle

De manière générale, les précurseurs étant Burns et Stalker [61], les organisations sont fréquemment décrites comme comprises entre les deux extrêmes que sont la structure "mécaniste" et la structure "organique". La structure "mécaniste" est stable et centralisée. L'exemple usuel de ce type d'organisation est fourni par le modèle taylorien, dans lequel à chaque tâche élémentaire correspond un individu, la partie la plus importante de la structure étant formée par la hiérarchie d'encadrement. La structure "organique" est changeante et basée sur des accords mutuels. Ces accords sont le fruit de négociations entre groupes autonomes. Un exemple de ce type d'organisation est une multinationale aux filiales indépendantes.

II.2.2.6 Synthèse sur la classification

Dans le tableau II.1 sont rassemblés les différents classements d'organisations évoqués dans les paragraphes précédents. Ils sont comparés sur la base de la classification des systèmes multi-agents évoquée dans le premier chapitre, comprenant les types : hiérarchie, marché, communauté et société. Les formes d'organisations correspondant à ces quatre types sont placées sur la même ligne du tableau.

Tableau II.1 : Tableau comparatif de cinq formes de classification des organisations.

	type de contrôle <i>Gasser</i>	trois critères <i>Mintzberg</i>	type de coordination <i>Liu</i>	type d'objectif <i>March</i>	type de répartition de la prise de décision <i>Fox</i>	usuelle
structures hiérarchiques	hiérarchie	bureaucratie mécaniste, structure simple	hiérarchique	unitaire	hiérarchie (simple, intermédiaire ou multidivisionnelle)	mécaniste
structures hétérarchiques	marché	structure divisionnalisée	intermédiaire	fédérale	marché général, système de prix	organique
	communauté	bureaucratie professionnelle	non hiérarchique	composite	organisation collective	intermédiaire entre mécaniste et organique
	société	adhocratie	intermédiaire	fédérale	système de prix, organisation collective	intermédiaire entre mécaniste et organique

Les critères de classification étant différents, il ne s'agit que d'une approximation. Cependant, elle met en évidence le caractère intermédiaire (par le nombre de classes) et générique (comparaison aisée avec les autres classifications) de la classification de Gasser en ce qui concerne les organisations d'agents. Cette dernière semble donc utilisable dans la constitution de la base de données sur les organisations faisant partie de notre objectif, énoncé au paragraphe II.1.4.

La connaissance des différents types d'organisations répertoriés permet d'appréhender leur évaluation dans de bonnes conditions. Kjaer-Hansen [91] met en lumière, à ce propos, l'aspect essentiel de la connaissance de la façon dont "les différentes relations structurelles supportent des

capacités différentes et imposent différentes contraintes sur des ensembles d'agents, et leur aptitude en résolution de problème.” La partie suivante a pour but de présenter les principales études concernant l'évaluation d'organisations selon le contexte de tâche.

II.3 Des organisations appropriées

Afin de pouvoir choisir une organisation qui soit appropriée dans la situation présente, des connaissances sur les caractéristiques des différentes organisations sont nécessaires. Nous verrons que cette connaissance est difficile à obtenir car les auteurs ne s'accordent, ni sur les types d'organisations à comparer, ni sur les critères de comparaison.

Dans un premier temps, différentes organisations sont recensées et comparées. Leur étude porte sur l'évaluation de leurs qualités respectives par la confrontation à diverses situations. Nous nous efforcerons, dans un second temps, de synthétiser ces éléments et de dégager des connaissances utiles, pour que le système puisse s'adapter à des tâches variées.

II.3.1 Comparaisons entre différentes structures organisationnelles

La comparaison entre structures organisationnelles est un sujet abordé régulièrement dans la littérature. Des chercheurs, principalement sociologues et plus récemment en provenance de l'I.A.D., ont tenté d'évaluer les performances d'organisations en contexte varié. La performance est généralement exprimée par les sociologues et les économistes, en terme de coût de production pour une entreprise ou en terme d'efficacité pour un service. Le recueil de données numériques variées est plus facile à obtenir sur les systèmes multi-agents (artificiels), car ils sont simulés sur matériel informatique. La performance d'une organisation est dans ce cas évaluée selon des critères incluant le temps pris par la réalisation de la tâche demandée, le nombre d'échanges communicationnels qui ont été nécessaires, etc. D'après les performances obtenues, les auteurs de ces études ont parfois été en mesure de conclure sur l'adéquation (ou la non adéquation...) des organisations, relativement au contexte étudié.

II.3.1.1 Comparaison entre organisations de type hiérarchique et de type marché

Malone [87] décrit quatre structures de coordination, dont deux types de hiérarchies (basée soit sur le produit, soit sur la fonction) et deux types de marchés (centralisé ou décentralisé). Il les compare selon leur coût en termes de production, de coordination et de vulnérabilité. Les coûts de "vulnérabilité" sont occasionnés, pendant le temps d'adaptation à une situation nouvelle, par la non adaptation de l'ancienne organisation. Parmi les conclusions de son étude, il est intéressant de noter que les coûts de production sont plus faibles, alors que les coûts de coordination sont plus élevés au sein des structures de marché, que dans les structures hiérarchiques (tableau II.2).

Tableau II.2 : Récapitulatif des conclusions énoncées par Malone.

Évaluation des coûts selon le type de structure	<i>coût de production</i>	<i>coût de coordination</i>
<i>structure hiérarchique</i>	élevé	faible
<i>structure de marché</i>	faible	élevé

Cohen [86] relève, lui aussi, cette différence de performance concernant la coordination. Il a étudié les travaux de trois sociologues — Williamson, Thompson et Simon — à propos des organisations. Une opinion partagée par ceux-ci est qu’une hiérarchie est meilleure qu’un marché lorsque les besoins en coordination sont élevés. Il est à souligner que l’auteur oppose hiérarchie et marché alors qu’il définit l’organisation de marché comme une forme de hiérarchie.

Les organisations hiérarchiques et de marché sont également comparées par Numaoka [92]. Il indique que les tâches “de grande envergure” requièrent une organisation hiérarchique, et que le marché autorise des bénéfices individuels. Ceci concorde avec l’opinion citée précédemment concernant la coordination. En effet, la réalisation d’une tâche importante nécessite une coordination efficace. Dans le même ordre d’idées, Mintzberg [82] note que “*la centralisation est le mécanisme le plus puissant pour coordonner les décisions dans l’organisation*”, mais que “*un seul centre, un seul cerveau, ne peut comprendre toutes les décisions.*”

II.3.1.2 Comparaison d’organisations ayant différents types de décentralisation

Dans l’objectif de fournir une aide au concepteur pour le choix d’une organisation adaptée à un système distribué, Fox [81] a évalué cinq organisations à divers degrés de décentralisation, en fonction de critères de complexité et d’incertitude (figure II.8). La complexité des informations, des tâches ou de la coordination, conduit à une distribution de la tâche. Inversement, l’incertitude, c’est-à-dire le manque d’information, mène à l’agrégation de tâches. La complexité induit, par conséquent, une structure hétérarchique. L’incertitude, comme une force opposée, induit une structure hiérarchique.

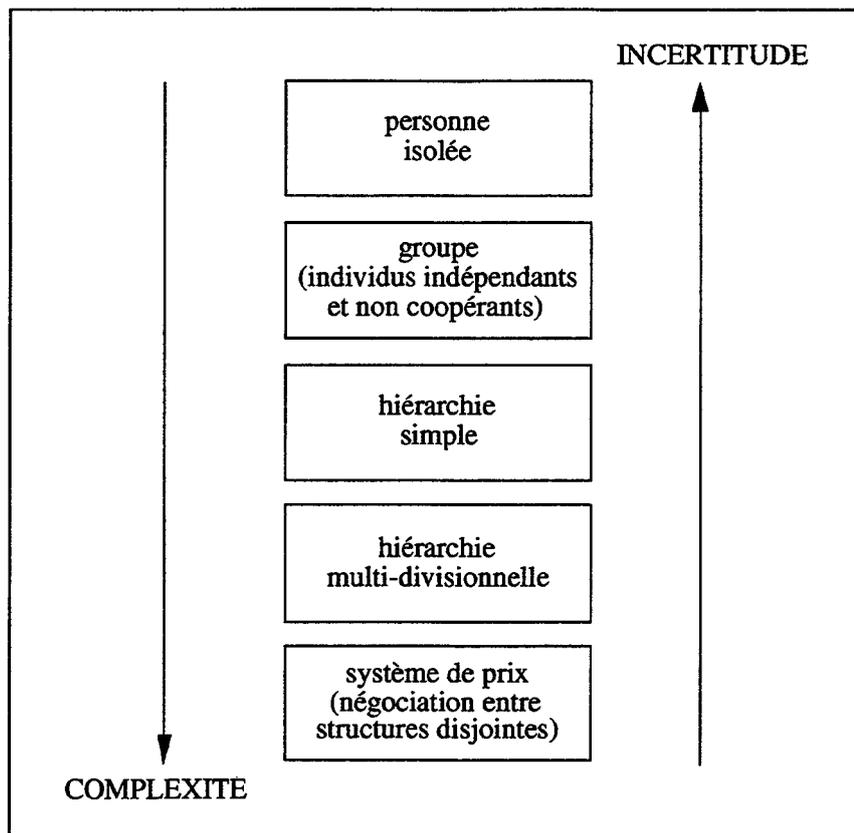


Fig. II.8 : Cinq structures d'organisations disposées selon leur degré de complexité/incertitude (adapté de Fox [81]).

Une étude de cas réels a été effectuée par Kumar [93] : des structures organisationnelles différentes sont simulées et appliquées à la répartition des patients entre les différents services d'un hôpital. Dans ce contexte hospitalier, il a sélectionné quatre structures parmi lesquelles la centralisation de l'information et celle de la prise de décision diffèrent. Des comparaisons ont été effectuées et les structures évaluées, selon un critère de performance basé sur une formule combinant des temps de réalisation (retard et temps minimal). La performance d'une forme d'organisation particulière s'est révélée être liée à la centralisation plus ou moins grande de l'information et/ou du contrôle, ainsi qu'aux caractéristiques de la tâche courante. Les auteurs donnent des conclusions prudentes car il se peut que les résultats soient fortement liés à l'application. Cependant, ils notent le besoin de compatibilité entre le rôle d'un intervenant et son objectif, l'importance de la disponibilité de l'information, ainsi que la difficulté à obtenir une consistance acceptable des solutions en milieu décentralisé.

II.3.1.3 Autres comparaisons effectuées sur des systèmes multi-agents

Bouron [93] a également mesuré l'efficacité d'un système, selon des critères de performance et de coût. Il estime que l'efficacité d'un système dépend de trois facteurs : l'activité des agents, la sélectivité de la communication et la distribution des agents. Or, ces trois facteurs sont des facteurs organisationnels. L'objet principal de son étude est la complexité sociale des agents, cependant un

de ses résultats est important pour notre propos : des agents socialement complexes sont appropriés pour des tâches exigeant de nombreux agents, pour des tâches réalisées simultanément et lorsqu'elles varient en caractéristiques et en nombre. C'est dans le cadre de ce dernier point que nous nous plaçons, car les caractéristiques des tâches soumises au système multi-agents sont supposées varier.

Trois formes d'organisations entre agents ont été comparées par Chevrier [93] : une organisation distribuée libre (une forme de communauté), une hiérarchie et une organisation de type marché. Des mesures d'activité et de temps de calcul ont été faites. En nombre de communications nécessaires à la résolution, le marché s'est révélé le plus efficace et l'organisation libre la moins efficace. Cette dernière est la plus rapide en temps d'exécution, la hiérarchie étant la plus lente des trois ! Ce résultat est incompatible avec ceux obtenus par les études citées précédemment (celle de Cohen, en particulier), cependant, il n'est pas considéré comme représentatif par l'auteur, en raison de la nature du problème qui était à résoudre et du type de communication utilisé par l'organisation hiérarchique (tableau noir). Chevrier donne, en outre, une opinion nuancée sur la question de l'existence d'une organisation appropriée pour chaque type de problème. En effet, il se peut que plusieurs organisations soient efficaces face à un même problème.

Les apports de ces différents auteurs font l'objet d'une synthèse, présentée dans le paragraphe suivant.

II.3.2 Synthèse

Effectuer une synthèse à partir de ces études semble irréalisable au premier abord, car les organisations y sont évaluées selon des critères différents et donc, non comparables. Cependant, quelques notions émergent de l'ensemble. En particulier, ces différentes études montrent que :

- L'organisation parfaite, qui serait la meilleure en toute situation, ne semble pas exister. A ce propos, Ishida [92] déclare qu'il n'existe pas d'organisation unique capable de faire face, de façon appropriée, à tous les problèmes et à toutes les conditions environnementales.
- Dans une situation donnée, il existe en général plus d'une organisation appropriée.
- Les différents types d'organisations ne sont pas également appropriés dans une situation donnée. Ils sont plus ou moins adaptés pour des situations exigeant de nombreuses communications, une importante complexité de coordination, etc. Il est possible d'aller plus avant dans la connaissance de ce point particulier, en recensant les conclusions auxquelles sont parvenues les auteurs à propos de l'adéquation des structures dans les contextes de tâche étudiés. C'est ce qu'illustre le tableau II.3.

Tableau II.3 : Évaluations d'organisations.

auteurs	organisations étudiées	critères de comparaison	type d'organisation adéquat d'après le(s) critère(s)
Malone	hiérarchie(s) marché(s)	production coordination vulnérabilité	production -> marché coordination -> hiérarchie
Cohen	hiérarchie et marché	coordination	coordination -> hiérarchie
Numaoka	hiérarchie et marché	but global/individuel	tâche de taille importante -> hiérarchie
Fox	5 organisations	complexité incertitude	complexité -> hétéarchie incertitude -> hiérarchie
Kumar	4 organisations avec décentralisation progressive	performance	dépend de : compatibilité rôle/objectif, disponibilité de l'information, consistance des solutions
Bouron	organisations avec des agents de complexité sociale variable	efficacité (performance et coût)	dépend de : activité, sélectivité de communication, distribution des agents
Chevrier	organisation libre hiérarchie marché	temps de résolution nombre de communications	communication -> marché

Quelles connaissances utiles à la poursuite de notre objectif est-il possible de retirer de cette synthèse ?

Le premier point de synthèse conforte l'opinion selon laquelle des situations variées requièrent des solutions organisationnelles différentes. Selon Numaoka [92], "un des travaux inhérents à la structuration d'organisation est de s'attacher à la dynamique des organisations en systèmes multi-agents." De même, Gasser [91] note la correspondance essentielle existant entre l'architecture du système distribué, la structure du problème qu'il résout et les conditions environnementales. Si l'environnement est changeant, cette correspondance doit être maintenue par adaptation dynamique.

Le second point est le corollaire du premier, car il pose la question du choix de l'organisation dans une situation donnée. Alors que l'organisation parfaite n'existe pas, il existe plus d'une organisation applicables dans un contexte particulier.

Le troisième point de synthèse permet de résoudre partiellement le problème de l'exigence en organisations variées, en fournissant un éventail de solutions possibles et de "pistes" pour les

utiliser. Les principaux critères de choix d'une solution qui émergent des résultats avancés, sont les suivants [Le Strugeon 94c] :

- Un premier critère prend en compte les **connaissances** requises. Les critères de disponibilité de l'information (Kumar), d'incertitude (Fox) et de vulnérabilité (Malone) lui sont apparentés.
- Un second critère est la taille de la tâche, c'est-à-dire la quantité d'**actions** à effectuer pour la réaliser. Ce critère correspond à celui dénommé "envergure de la tâche" par Numaoka et est relatif à l'activité des agents (Bouron).
- La **coordination** est un troisième critère discernable. Il semble que plus la tâche requiert une coordination "complexe", c'est-à-dire mettant en jeu un nombre important d'actions contraintes, plus l'organisation a besoin d'être structurée hiérarchiquement (Malone, Cohen). Ce critère est fortement lié à ceux relatifs à la communication (mis en évidence par Bouron et Chevrier, par exemple) car, et ceci se révèle crucial dans un système basé sur l'échange de messages, la coordination des actions est effectuée grâce aux informations partagées et par conséquent, transmises par les agents. La communication est également liée aux connaissances requises, pour la facilité avec laquelle les informations nécessaires à la réalisation de la tâche peuvent circuler parmi les agents.

Ces trois critères sont fondés sur un ensemble d'études portant sur la performance de structures différentes et semblent, par conséquent, suffisamment pertinents pour autoriser le choix d'une organisation dans une situation donnée. Ils constituent donc les facteurs que nous recherchions pour établir la spécification du contexte de tâche, annoncée au paragraphe II.1.4. Il reste à rechercher comment mesurer ces critères sur lesquels le choix de l'organisation sera basé, en relation avec la tâche incombant au système.

Conclusion

Dans ce chapitre, notre objectif d'adaptation d'un système multi-agents par modification de sa structure organisationnelle a été précisé. En particulier, les problèmes à résoudre afin de mettre en oeuvre l'organisation adaptative d'un S.M.A. ont été énoncés.

La recherche des solutions à ces problèmes nous a amenés à étudier les organisations, humaines et multi-agents. Cette étude nous a permis de connaître les facteurs relatifs à la tâche qui sont susceptibles d'entraîner une modification de l'organisation. Les jalons nécessaires pour répondre aux besoins du système en matière de spécification de la tâche courante et d'adaptation de l'organisation à son contexte ont ainsi été posés :

- Les principales classifications des organisations ont été présentées. Cela a permis d'énoncer la signification des différentes dénominations d'organisations existantes. La classification de Gasser s'est révélée pertinente en contexte multi-agents.
- Grâce à la connaissance de ces appellations et de leur usage, des études portant sur la comparaison et l'évaluation des aptitudes de diverses organisations selon le contexte ont été présentées.

Une synthèse de ces différentes études a mis en évidence l'existence de trois caractéristiques importantes de la tâche, ayant une influence sur l'organisation à adopter. Ces critères reflètent les exigences de la tâche en termes de connaissances, d'action et de coordination. Selon ces critères, certaines organisations sont plus appropriées que d'autres pour servir de support à la réalisation de la tâche.

L'ensemble des connaissances introduites dans ce chapitre doit permettre de résoudre les problèmes posés par la réorganisation du système. La méthode que nous proposons alors, pour réaliser l'adaptation organisationnelle d'un S.M.A., est expliquée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Proposition d'une méthode d'adaptation organisationnelle pour un S.M.A.

Introduction

Dans le chapitre précédent, notre objectif a été précisé comme étant la recherche d'une méthode permettant à un système multi-agents de s'adapter de manière organisationnelle à son contexte. La critique des quelques méthodes existantes a révélé le besoin d'une alternative. L'esquisse de celle-ci a été dessinée sous les traits d'un changement de la structure organisationnelle reliant les agents, à partir d'une spécification du contexte et de données sur les organisations. Dans ce but, les caractéristiques des organisations, tant humaines qu'artificielles, ont fait l'objet d'études et de comparaisons.

Sur la base des connaissances ainsi acquises, une méthode destinée à l'adaptation organisationnelle d'un système multi-agents est proposée dans ce chapitre. Elle est fondée sur les connaissances relatives aux organisations acquises grâce au chapitre précédent. Elle permet de répondre aux besoins du système en matière de spécification de la tâche courante et d'adaptation de l'organisation à son contexte.

Ces deux éléments — spécification de la tâche et adaptation de l'organisation — constituent les étapes importantes de la phase d'organisation (figure III.1) du cycle de réalisation d'une tâche, qui a été introduit dans le chapitre I. Ils forment les deux grandes parties de ce chapitre. Chacune de ces parties précise la signification de l'étape présentée, détaille les problèmes rencontrés lors de sa réalisation et les solutions qui y ont été apportées.

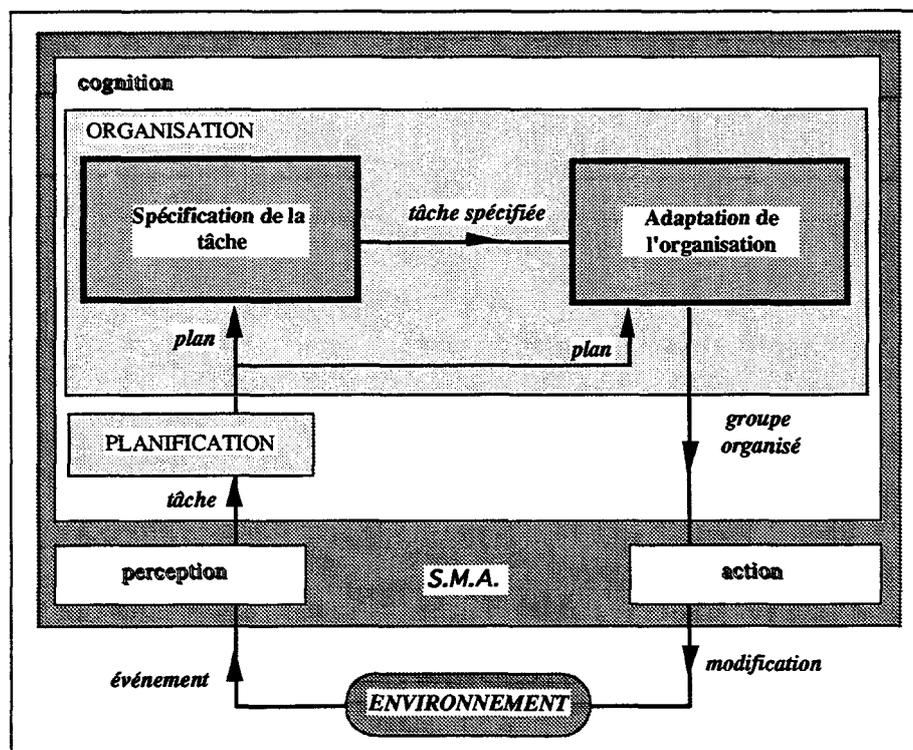


Fig. III.1 : Décomposition de la phase d'organisation du cycle de réalisation d'une tâche en deux étapes : spécification et adaptation.

En outre et afin de fournir une description explicite de la méthode proposée, un formalisme est introduit dans ce chapitre. En effet, l'absence de formalisation reconnue commence à se faire fortement ressentir en I.A.D. Des formalismes existent, certes, mais aucun n'a jusqu'ici fait l'unanimité, ni surtout permis d'englober tous les champs d'études existant dans le domaine multi-agents. Chaque auteur propose sa propre méthode, limitée aux aspects utiles à la description de son secteur de recherche. Il existe en particulier des formalismes appliqués à l'architecture interne d'un agent (voir, par exemple, Werner [88], Shoham [89] ou Cohen [90]).

Le formalisme exposé ici ne prétend nullement être complet ou idéal. Plus simplement, il a pour but de proposer un schéma, un canevas de spécification sur lequel fonder la description formelle de la méthode d'organisation proposée. Il permet, en particulier, l'évaluation formelle des caractéristiques d'une tâche selon les critères introduits au chapitre II, ainsi que leur utilisation dans la méthode d'organisation adaptative. Il sera complété dans le chapitre suivant par la description formelle des éléments de base du système, tels que l'univers multi-agents et l'environnement.

La notation utilisée dans ce chapitre suit quelques règles simples, que voici :

- La notation $\{elt_1, elt_2, \dots, elt_n\}$ désigne l'ensemble contenant les éléments elt_1 à elt_n . Les noms des ensembles commencent par une majuscule, tandis que leurs éléments sont écrits en minuscules.
- De même, $\langle c_1, c_2, \dots, c_n \rangle$ désigne les composants d'un modèle.
- Les indices sont utilisés pour identifier un élément particulier d'un ensemble ou l'appartenance à un ensemble. Un double indice doit être lu comme suit :
 X_{ij} (équivalent à X_{i_j}) est l'élément X n°j de l'ensemble d'indice i.
- $\langle X, Y \rangle_i$ équivaut à $\langle X_i, Y_i \rangle$
- $X \mid Y$ se lit "X ou Y"
- Les définitions et fonctions sont numérotées : (D_x) est la définition n°x, (f_x) est la fonction n°x.

Ces quelques indications étant posées, la première partie de ce chapitre traitant de la spécification de la tâche peut être exposée.

III.1 Spécification de la tâche

Une étape préalable de spécification de la tâche est nécessaire pour que le S.M.A. puisse y adapter sa structure organisationnelle. Elle consiste à déterminer les caractéristiques de la tâche courante et à reconnaître à l'aide de celles-ci, si possible, à quel type de tâche elle appartient. L'étape de spécification est destinée à fournir au système multi-agents une tâche "filtrée" et reconnue comme appartenant à un type défini auparavant.

Dans ce but, le plus simple est de se servir du traitement qui a déjà été appliqué à la tâche : la planification. La planification agit également comme un mécanisme de filtrage d'informations concernant la tâche courante, car la création du plan nécessite la reconnaissance de la tâche comme un ensemble d'éléments connus. Ceux-ci vont être à nouveau utilisés. En effet, le plan va fournir les éléments nécessaires à la spécification de la tâche (figure III.2).

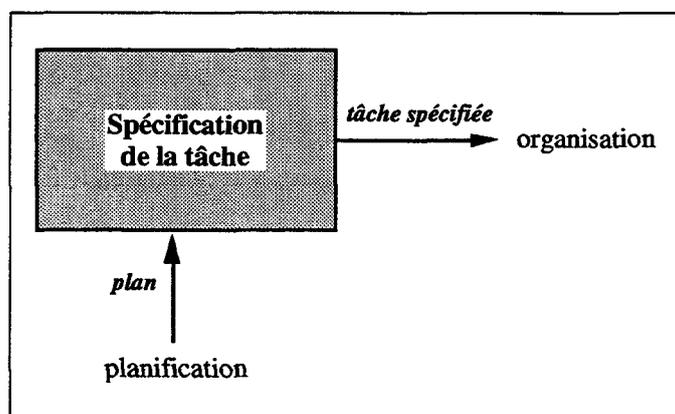


Fig. III.2 : Entrées / sorties du bloc "spécification de la tâche".

La spécification de la tâche est décomposée en deux étapes (figure III.3). Une première étape correspond à un premier filtrage des informations concernant la tâche : seuls certains aspects sont conservés. Ils sont destinés à apporter des connaissances pertinentes et à éliminer celles qui ne le sont pas. Dans une seconde étape, ces connaissances sont utilisées afin de classer cette tâche comme appartenant à un type prédéfini. Il s'agit d'un second filtre, grâce auquel la tâche est reconnue comme appartenant à un type identifié au préalable.

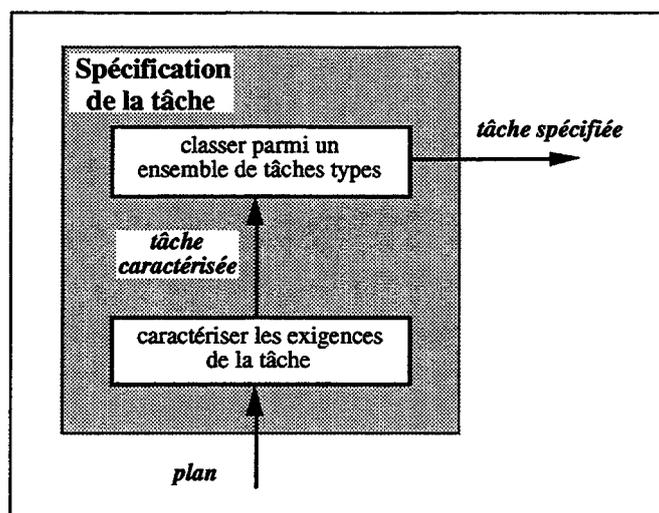


Fig. III.3 : Méthode utilisée pour la spécification de la tâche.

Les deux étapes sont présentées dans leur ordre d'intervention lors de la spécification de la tâche : d'abord la caractérisation, ensuite le classement parmi un ensemble de tâches-types.

III.1.1 Caractériser la tâche

Le but de cette première étape est de déterminer un ensemble de caractéristiques de la tâche qui est assignée au S.M.A. Ces caractéristiques ne sont pas destinées à décrire la tâche de manière exhaustive, mais à donner des informations suffisantes sur celles-ci pour autoriser la sélection d'une forme d'organisation plutôt qu'une autre.

La synthèse effectuée dans le chapitre II, sur l'évaluation des performances de différentes organisations en contexte varié, a révélé trois critères relatifs à la tâche qui sont susceptibles d'influer sur le choix d'une organisation pour le système. Ces critères sont : les exigences de la tâche en termes de coordination, d'action et de connaissances requises. Toutefois, avant de déterminer ces critères précisément, il importe de connaître les informations concernant la tâche auxquelles les agents peuvent accéder. Or, les seules données disponibles sont celles fournies par le plan de réalisation de la tâche.

III.1.1.1 Caractéristiques du plan

Nous avons supposé la phase de planification terminée. Le S.M.A. dispose donc d'un plan de réalisation de la tâche. Ce plan peut être représenté par un graphe de décomposition des tâches en sous-tâches.

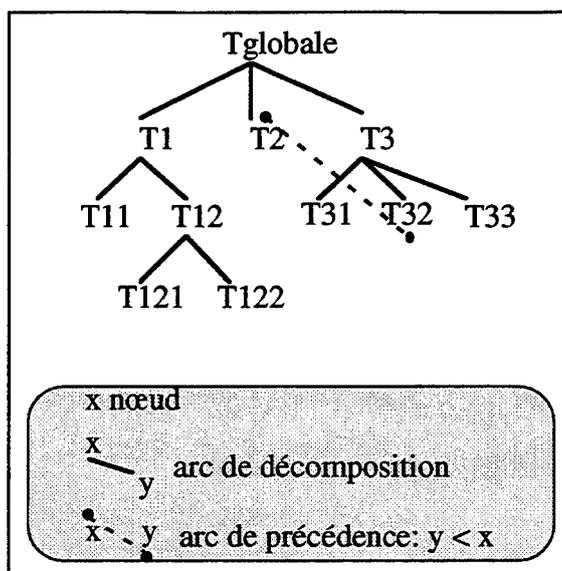


Fig. III.4 : Exemple d'un graphe de décomposition d'une tâche globale.

Notons que le graphe de décomposition présenté dans ce formalisme peut être “lu” comme un graphe d'abstraction de tâches, mais que chaque niveau de décomposition ne correspond pas obligatoirement à un niveau d'abstraction. Par exemple, en figure III.4, la tâche T2 est réalisable par le groupe d'agents sans être décomposée plus avant, cependant cela ne signifie pas que T2 soit du même niveau d'abstraction que les tâches T1 et T3.

Un plan P est défini par la tâche Tglobale, but du plan, et par un graphe G, méthode pour parvenir à ce but :

$$P = \langle T_{\text{globale}}, G \rangle \quad (\text{D1})$$

L'état de l'environnement est défini comme l'ensemble des états des objets le constituant. Soit S, l'espace d'états de l'environnement. Les actions effectuées par le S.M.A. font passer l'environnement d'un état Si à un état Sj de S. La réalisation du plan commun P par les agents, a pour effet de faire passer l'environnement d'un état initial Si à un état final Sf dans lequel le but poursuivi Tglobale est atteint.

La tâche Tglobale est définie comme un ensemble de couples (objet, état) spécifiant les caractéristiques d'un sous-ensemble de l'environnement à obtenir :

$$T_{\text{globale}} = \left\{ (\text{objet}_{o1}, e_{k1}), \dots, (\text{objet}_{op}, e_{kp}) \right\} \quad (\text{D2})$$

Le graphe est formé de nœuds reliés par des arcs. Un nœud représente une tâche (abstraite) ou une action (concrète) du plan. Les arcs représentent les liens de composition entre les tâches et les contraintes entre celles-ci.

$$G = \langle \{\text{nœuds}\}, \{\text{arcs}\} \rangle \quad (\text{D3})$$

Les contraintes définies ci-dessus sont des contraintes temporelles, quelle que soit leur origine. En effet, que la contrainte "l'action act_{a1} est à réaliser avant l'action act_{a2} " soit due au partage d'une ressource commune ou aux préconditions de act_{a2} concernant l'état de l'environnement, la conséquence est identique, à savoir une contrainte chronologique entre ces deux actions. Les contraintes sont donc représentées par une relation de précédence ($<$) entre tâches.

$<(N_i, N_j)$ signifie que la tâche représentée par le nœud N_i doit être effectuée avant la tâche représentée par le nœud N_j . Un arc est donc un couple de nœuds (N_i, N_j) , tels que l'on ait la relation $<(N_i, N_j)$. Si le couple (T_j, T_k) est tel que $\neg <(T_j, T_k)$ et $\neg <(T_k, T_j)$, alors T_j et T_k sont indépendantes et peuvent a priori être réalisées en parallèle.

La figure III.5 est une représentation graphique qui met en évidence les liens de précédence entre les tâches présentées en figure III.4. En particulier, il apparaît clairement que la réalisation de la tâche T2 nécessite la terminaison préalable de T32, bien que celle-ci ne soit pas une sous-tâche de T2.

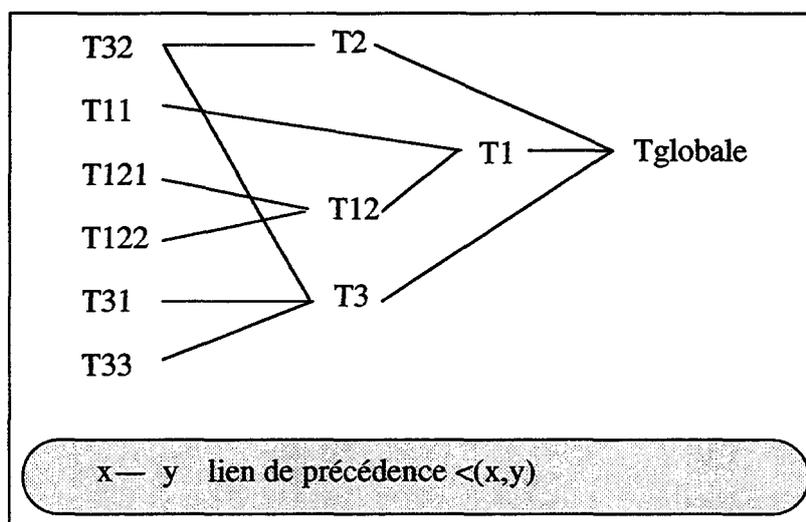


Fig. III.5 : Plan de réalisation tiré du graphe de la figure III.4.

Les tâches contenues dans le plan, leur nature, leur nombre et la façon dont elles sont structurées donnent des informations sur la tâche principale à réaliser.

Les caractéristiques directement observables sur le graphe sont au nombre de trois :

- le nombre de tâches dans le graphe, qui est équivalent au nombre de nœuds (11 sur la figure III.4),
- la profondeur du graphe (4),
- la largeur du graphe (variable, car les niveaux peuvent avoir des largeurs différentes : de 1 à 6 en figure III.4).

D'autres caractéristiques, moins évidentes à première vue, sont également intéressantes :

- le nombre de sous-tâches obtenues par décomposition d'une tâche (par exemple, figure III.4, 3 pour T3),
- le nombre de tâches primitives, représentées par des noeuds sans fils (7 figure III.4).

Enfin, il est possible d'étudier plus en profondeur les informations apportées par le plan, par exemple, en s'intéressant à la répartition par type de tâche, ou aux connaissances (sur l'environnement, sur le système lui-même) nécessaires à la réalisation des tâches.

Le plan de réalisation d'une tâche n'est ni unique, ni optimal. Il correspond à une façon de faire, une méthode de réalisation parmi d'autres. De même qu'il existe plusieurs façons de calculer la dérivée d'un polynôme (cf. exemple du §I.2.2 dans le chapitre I), il est possible de trouver, pour de nombreuses tâches, des plans équivalents pour la réalisation de la tâche courante. Les caractéristiques observées sur le plan n'ont donc de valeur ni intrinsèque, ni absolue ; elles n'ont de signification que relativement aux valeurs obtenues sur d'autres graphes comparables car créés à l'aide du même algorithme de planification.

Selon Chandrasekaran [93], la structure d'une tâche est donnée par "l'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." Cette définition correspond à celle de l'arbre représentant le plan de réalisation d'une tâche, avec la différence que les méthodes ne font pas partie explicitement du plan. Les tâches réalisables directement sont les tâches primitives, telles qu'elles ont été définies au chapitre I.

Dans la lignée de cette définition énoncée par Chandrasekaran, nous estimons que l'étude de l'arbre de tâches apporte toutes les informations nécessaires à la spécification de la tâche principale. L'utilisation de ces informations pour la détermination des critères de choix d'une organisation peut dès lors être présentée.

III.1.1.2 Caractéristiques de la tâche

Etant données les caractéristiques de la tâche qu'il est possible d'extraire du plan de réalisation, il importe de trouver une méthode permettant d'en déduire les valeurs respectives des trois critères retenus précédemment [Le Strugeon 94a]. En effet, une définition informelle est insuffisante dès lors que des agents artificiels sont susceptibles d'utiliser ces critères.

De plus et afin de doser l'importance relative de chacun de ces éléments au sein de tâches différentes, une normalisation de leurs valeurs a été introduite. Pour ce faire, les mesures sont exprimées sous forme de rapports.

Soit P un plan de réalisation de la tâche Tglobale, représenté par le graphe G. G est composé d'un ensemble N de noeuds et d'un ensemble A d'arcs entre ces noeuds.

III.1.1.2.1 CRITÈRE DE CONNAISSANCE

La caractéristique de connaissance représente la quantité de faits devant être connus pour que la tâche puisse être réalisée. Par exemple, pour que l'action "poser cube A sur cube B" puisse être réalisée, il faut que le cube A soit dans l'état "tenu" (par une pince, par exemple) et que le cube B soit dans l'état "libre" (aucun cube n'est déjà posé sur B). Les agents doivent donc avoir connaissance des états courants des cubes A et B. En évaluant ainsi, pour chacun des éléments du plan, le nombre d'objets dont il faut connaître l'état avant de passer à la phase d'exécution, le critère de connaissance est déterminé.

La distribution des connaissances parmi les agents est également déterminante pour la réalisation de la tâche. Cependant, elle n'est pas connue au niveau du groupe. Pour cette raison, elle n'est pas prise en compte dans la caractéristique de connaissance.

Le critère de connaissance (identifié par la lettre K) est représenté par le rapport formé par le nombre d'objets différents dont l'état doit être connu, divisé par le nombre total de valeurs à connaître :

$$K = \frac{\text{le nombre d'objets différents à connaître}}{\text{le nombre total d'objets à connaître}} \quad (D4)$$

Soit un nœud η_i de G, η_i représente une tâche dont les préconditions sont notées Pr_{η_i} . Un objet $objet_o$ doit être connu pour réaliser la tâche représentée par η_i si les préconditions Pr_{η_i} contiennent un couple $(objet_o, etat_e)$ spécifiant l'état dans lequel doit se trouver cet objet. $etat_e$ est un élément de l'ensemble $Etats_o$ regroupant tous les états que peut prendre $objet_o$.

On appelle Ω_{η_i} l'ensemble des objets dont l'état doit être connu pour réaliser la tâche du plan représentée par le nœud η_i . Le nombre d'objets à connaître pour réaliser cette tâche est alors le cardinal de cet ensemble :

$$\text{card}(\Omega_{\eta_i}) = \text{card}\left(\left\{ \text{objet}_o / \exists etat_e \in \text{Etats}_o, \exists \eta_i \in N, (objet_o, etat_e) \in Pr_{\eta_i} \right\}\right) \quad (D5)$$

Le nombre d'objets différents à connaître est le cardinal de l'union sur des Ω_{η_i} et le nombre total d'objets à connaître est donc la somme sur i des cardinaux des Ω_{η_i} .

D'où, la formule de K devient :

$$K = \frac{\text{card}\left(\bigcup_i \Omega_{\eta_i}\right)}{\sum_i \text{card}\left(\Omega_{\eta_i}\right)} \quad (D6)$$

L'étude des cas limites est intéressante. Elle révèle des situations extrêmes, dont l'existence est peu probable. En particulier, pour le critère de connaissance, cela donne :

$K \rightarrow 0$: Les tâches à effectuer ne nécessitent aucune vérification préalable de l'état de l'environnement. Les communications entre agents seront réduites.

$K \rightarrow 1$: Tous les objets formant les préconditions sont différents. De nombreuses connaissances sur l'environnement sont nécessaires et font, par conséquent et en général, l'objet de communications en quantité importante.

III.1.1.2.2 CRITÈRE D'ACTION

Le second critère prend en compte la taille de la tâche. Celle-ci est évaluée par le nombre d'actions devant être effectuées pour sa réalisation. Par exemple, si le cube A est dans l'état "tenu" et si le cube B est libre, alors la tâche "poser A sur B" nécessite l'unique action "poser A sur B". Par contre, si un cube C est posé sur B et que A est sur la table, cette tâche nécessite la réalisation de quatre actions : prendre C, poser C sur la table, prendre A et poser A sur B.

Il s'agit plus précisément d'une mesure du nombre d'actions "physiques" requises. Le qualificatif "physique" signifie que seules les actions ayant des effets sur les objets de l'environnement sont incluses dans cette mesure ; ceci exclut les actes de communication.

Le critère d'action (A) est donné par la "surface" (nombre de noeuds) occupée par l'arbre de tâches par rapport à la surface maximale qu'il aurait pu occuper, déterminée par le produit de la largeur maximale de l'arbre par sa profondeur maximale.

Le critère d'action (A) est défini comme :

$$A = \frac{\text{nombre de noeuds de G}}{\text{largeur maximale de G} \times \text{profondeur de G}} \quad (D7)$$

La profondeur F de l'arbre est donnée par la longueur de sa plus longue branche, c'est-à-dire de la plus longue chaîne $[\text{arc}(i_n, i_{n-1}), \text{arc}(i_{n-1}, i_{n-2}), \dots, \text{arc}(i_1, 1)]$.

Nous introduisons la notion d'arc métré. Par exemple, la chaîne $[\text{arc}(i, j), \text{arc}(j, k)]$ est abrégée, par transitivité, en l'arc métré de longueur 2 entre η_i et η_k , noté $\text{arc}^2(i, k)$. Le calcul de F est alors possible : $F = \text{Max}\{f / \exists \eta_i \in N, \text{arc}^f(i, 1)\}$ (D8)

Le niveau de profondeur f est l'ensemble des η_i tels que $\text{arc}^f(i,1)$. On appelle L_f , la largeur de G au niveau de profondeur f : $L_f = \text{card}\left(\left\{\eta_i \in N / \text{arc}^f(i,1)\right\}\right)$

$$\text{La largeur maximale } L \text{ de } G \text{ est donc : } L = \text{Max}_f(L_f) \quad (\text{D9})$$

D'où la formulation de A :

$$A = \frac{\text{card}(N)}{L \times F} \quad (\text{D10})$$

Les limites de l'intervalle de valeurs que peut prendre A , sont caractérisées par les états suivants :

$A \rightarrow 0$: L'arbre a une forme caractéristique "en croix", ayant une branche très longue et un niveau très large, comme sur l'exemple a), figure III.6. La longue branche représente les nombreuses décompositions successives avant de parvenir aux primitives d'une tâche ; le niveau large représente de nombreuses primitives issues d'une unique décomposition. La conséquence pour les agents d'un tel cas, est la possibilité de réaliser un nombre important d'actions de façon concurrente.

$A \rightarrow 1$: L'arbre représentant le plan est très "dense", il occupe une surface maximale comme sur l'exemple b), figure III.6. De nombreuses actions doivent être réalisées.

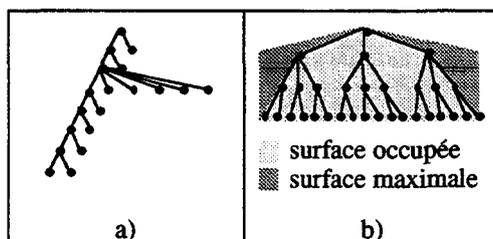


Fig. III.6 : Exemples de cas limites pour le critère A .

III.1.1.2.3 CRITÈRE DE COORDINATION

Le critère de coordination correspond à la force des contraintes s'appliquant sur les actions du plan. Le nombre d'actions contraintes dans le plan donne une mesure de cette force. En reprenant l'exemple précédent, l'action "poser A sur B" dépend de la réussite de l'action "prendre C" qui rend B libre. Dans le but de réaliser la tâche "poser A sur B", ces deux actions doivent être coordonnées.

Le critère de coordination (R) est normé grâce à la division du nombre de tâches contraintes par le nombre de tâches au total.

$$R = \frac{\text{nombre de tâches contraintes}}{\text{nombre total de tâches}} \quad (D11)$$

Une tâche contrainte T_i représentée par le nœud η_i dans G est telle que

$\exists \eta_j \in N, <(\eta_j, \eta_i)$, c'est-à-dire qu'il existe un arc entre η_j et η_i .

La formule donnant R apparaît donc naturellement comme :

$$R = \frac{\text{card}\left(\left\{\eta_i \in N / \exists \eta_j \in N, \text{arc}(\eta_j, \eta_i) \in A\right\}\right)}{\text{card}(N)} \quad (D12)$$

Les situations extrêmes sont les suivantes :

$R \rightarrow 0$: Soit N ne contient qu'un seul nœud, soit l'arbre a une forme spéciale "en parasol" : un seul niveau très large. Peu d'actions sont contraintes, donc le besoin en coordination est réduit.

$R \rightarrow 1$: L'arbre a une forme équilibrée. Parmi les actions, nombre d'entre elles exigent d'être coordonnées.

III.1.1.2.4 SYNTHÈSE

Les mesures des exigences de la tâche sont représentées dans l'espace formé par les trois axes correspondants (figure III.7). De manière formelle, la normalisation des valeurs correspondant aux trois critères, s'exprime ainsi :

Un plan P est caractérisé par les trois valeurs correspondant aux critères énoncés aux paragraphes précédents et est représenté par le point M de coordonnées (k, a, r) , telles qu'elles sont énoncées par la formule (f1).

$$\begin{cases} K(P) = k \\ A(P) = a \\ R(P) = r \end{cases} \quad \text{avec } k, a \text{ et } r \in [0,1]. \quad (f1)$$

La localisation des tâches sur le cube K-A-R de côté 1, facilite la compréhension de leurs caractéristiques relatives. Sur l'exemple ci-dessous, deux tâches ont été placées. La visualisation de leurs différences et similitudes est aisée : le point A représente une tâche dont les exigences quant aux connaissances et à la coordination sont peu élevées comparativement à celles requises par la tâche représentée par le point B ; la quantité d'actions nécessaires à leur réalisation est semblable.

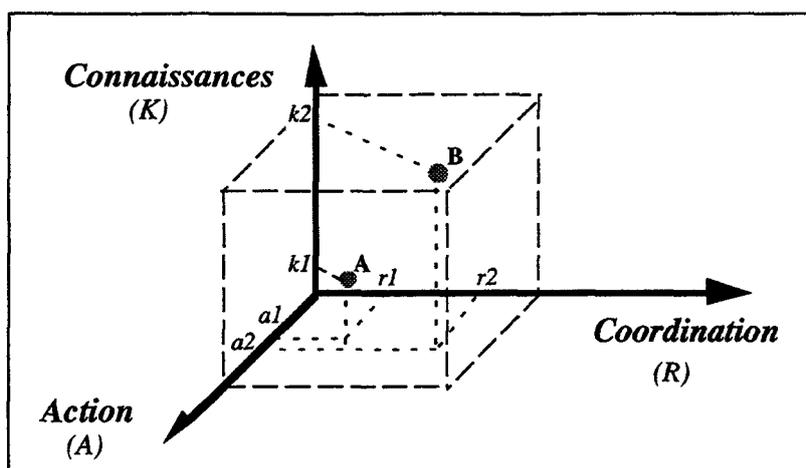


Fig. III.7: Comparaison entre deux points représentant des tâches.

La méthode de spécification selon les trois axes semble simple. Cependant, si les valeurs de connaissance, coordination et action appartiennent à l'univers des nombres réels, il existe un nombre infini d'emplacements sur ce cube. Or, le plus "intelligent" des systèmes multi-agents ne peut posséder la capacité de réagir différemment à un nombre infini de situations.

Une méthode pour réduire le nombre de situations à une quantité acceptable pour le système est proposée dans le paragraphe suivant.

III.1.2 Classifier la tâche courante comme une tâche-type

La limitation du nombre de situations différentes à appréhender est indispensable. Concrètement, cela revient à repérer un nombre fini de points du cube, des points bien particuliers, choisis à cause de l'importance des situations qu'ils représentent. Plusieurs solutions sont dès lors envisageables. La solution que nous proposons en premier lieu, consiste à sélectionner les points formant les sommets du cube. Huit points sont ainsi repérés.

Les sommets du cube correspondent à des tâches particulières, que nous dénommerons "tâches-types"¹. Grâce à ces tâches-types, le second filtre annoncé dans l'introduction de cette partie, peut opérer. En effet, toute tâche spécifiée et repérable sur la représentation cubique, peut être associée à la tâche-type la plus proche. Les sommets du cube forment ainsi des zones d'influence, des cubes de côté 1/2, partageant le cube principal en huit nouveaux domaines. La figure III.8 illustre ce découpage en zones d'influence des tâches-types, l'une d'elles étant mise en évidence pour plus de clarté.

¹ Les tâches-types de la méthode présentée ne sont pas assimilables aux tâches génériques, telles qu'elles sont décrites par Chandrasekaran et son équipe (voir, par exemple, [Chandrasekaran 93]). Une tâche-type représente ici uniquement une combinaison de valeurs hétérogènes, appartenant à un domaine plus numérique que qualitatif : il est ainsi impossible d'en déduire la nature des tâches impliquées.

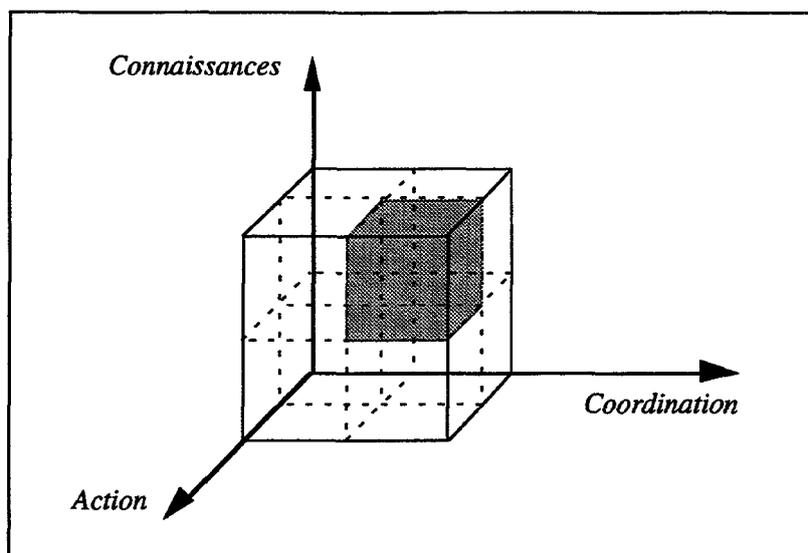


Fig. III.8 : Huit zones d'influence des sommets du cube principal.

La faiblesse de la modélisation se manifeste par les tâches situées à la frontière de deux zones : de quelle tâche-type sont-elles les plus proches ? Les points situés à la limite entre deux zones sont assimilés à la zone supérieure. Ce choix est expliqué de façon plus approfondie au paragraphe III.3.2.1. Il reste toutefois possible d'affiner la méthode par la prise en compte d'un nombre plus important de tâches-types. Par exemple, en utilisant les centres des faces et le centre du cube, quinze tâches types sont définies. Avec les centres des faces, les centres des arêtes et le centre du cube, ce nombre passe à vingt-sept. Le nombre de tâches-types nécessaire dépend de la précision désirée dans le choix des organisations. Son augmentation n'est utile que lorsque se fait ressentir le besoin d'un moyen de sélection entre deux organisations qui, bien que distinctes, possèdent des caractéristiques voisines.

Les tâches-types sont identifiées par les sommets de la représentation sous forme de cube (figure III.9), c'est-à-dire par les huit points dont les coordonnées appartiennent à l'ensemble $\{0,1\}^3$. La classification revient à déterminer pour chaque point M de coordonnées (k, a, r) , quel est le sommet le plus proche. La tâche type représentée par ce sommet est donc une approximation de la tâche représentée par le point M.

Dans ce cadre, nous posons les hypothèses suivantes :

$$\text{classification : } \begin{array}{l} [0,1]^3 \rightarrow \{0,1\}^3 \\ (k,a,r) \mapsto \begin{cases} x = 1 \text{ si } k \geq 0,5, 0 \text{ sinon} \\ y = 1 \text{ si } a \geq 0,5, 0 \text{ sinon} \\ z = 1 \text{ si } r \geq 0,5, 0 \text{ sinon} \end{cases} \end{array} \quad (f2)$$

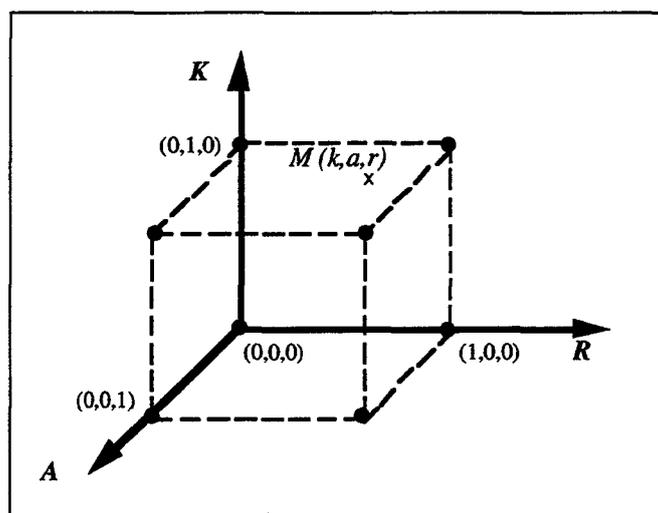


Fig. III.9 : Evaluation des caractéristiques des tâches.

La tâche-type la plus représentative de la tâche courante en termes de coordination, d'action et de connaissances, est ainsi déduite. A partir de cette information, le système s'organise de façon à adapter sa propre structure à celle de la tâche. Cette adaptation est présentée en partie suivante.

III.2 Adaptation de l'organisation

L'étape de spécification de la tâche délivre un résultat sous forme d'une tâche-type. Rappelons que l'objectif principal est d'adapter l'organisation du groupe aux exigences de la tâche courante (figure III.10). La tâche-type correspondant à la tâche courante autorise l'adaptation du groupe.

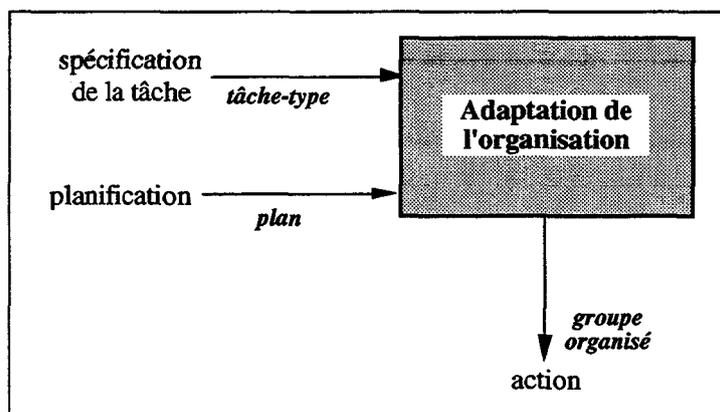


Fig. III.10 : Entrées / sorties du bloc "adaptation de l'organisation".

L'organisation est composée de deux aspects : d'une part, le système doit choisir la structure organisationnelle qu'il va adopter ; d'autre part, il doit réaliser les réorganisations nécessaires à la réalisation de sa nouvelle structure. Ces aspects correspondent à deux étapes consécutives qui réalisent l'organisation du système (figure III.11).

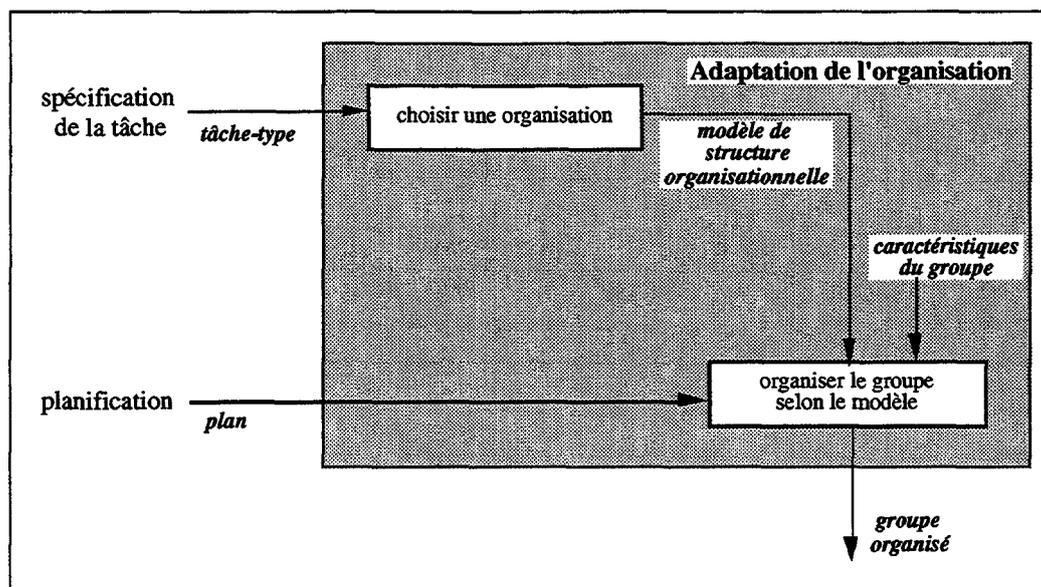


Fig. III.11: Sélection d'une organisation et organisation effective du S.M.A.

L'étape d'organisation utilise la tâche-type fournie par la spécification de la tâche pour la sélection d'une organisation. L'organisation effective se fait en utilisant le résultat de cette première étape, c'est-à-dire la structure choisie, et le plan fourni par l'étape de spécification. La phase d'organisation effective a pour résultat de donner une nouvelle structure au groupe : le groupe est organisé et prêt à passer à l'étape de réalisation de la tâche.

Tout choix s'effectue parmi un ensemble donné de possibilités. Le choix d'une organisation n'échappe pas à cette règle : une palette d'organisations différentes doit être à la disposition du système. Cette obligation fait apparaître divers problèmes, que voici : la détermination des organisations mises à disposition ; la représentation de celles-ci à l'usage des agents artificiels ; les critères de choix d'une organisation parmi celles qui sont représentées.

Ces problèmes sont abordés dans cette partie. Une première étape fournit les moyens nécessaires pour rendre adaptative l'organisation du système multi-agents, par la création d'une bibliothèque de modèles d'organisations. L'utilisation de celle-ci est présentée dans une seconde étape.

III.2.1 Une bibliothèque de modèles d'organisation

"Toute organisation [au sens de groupe organisé] possède un répertoire de schémas qui, au total, peut traiter toute une gamme de situations." [March 71]. Bien que cette remarque provienne du domaine des organisations humaines, elle résume bien le principe de notre démarche : des modèles de structures organisationnelles sont regroupés pour former une bibliothèque, dans laquelle le S.M.A. pourra trouver le type d'organisation adapté à la situation courante.

Pour créer la bibliothèque, un outil de description de structures organisationnelles est recherché. Les éléments de la description sont destinés à servir de fondement à la construction d'une structure *parmi* et *par* les agents. L'outil recherché est, par conséquent, plus destiné à fournir une aide à la génération d'organisations qu'à décrire des structures existantes. Les descriptions d'organisations de la bibliothèque sont des trames sur lesquelles les agents vont venir créer leurs propres structures. La dénomination de "modèle" est donnée à ces trames.

Les éléments à inclure dans la description d'une organisation sont apportés par la littérature. En ce qui concerne les organisations humaines, seules les descriptions de structures "officielles" seront retenues, car elles sont les seules susceptibles d'être utiles pour notre propos. En effet, et Schmidt le notait en [89], toute organisation humaine est une combinaison de deux organisations : l'organisation officielle, celle qui codifie les rapports entre ses différents composants (services, fonctions) selon un ensemble de règles fixées à l'origine, et l'organisation réelle, formée des règles propres à l'ensemble spécifique d'individus qui la composent et qui s'est créée à l'usage. Cette seconde organisation offre le "décalage" obligé causé par la nature des agents impliqués : il s'agit d'êtres humains aux intérêts et préférences divers, qui instaurent des liens de communication non prévus initialement, qui prennent en charge ou refusent des tâches selon leurs capacités et goûts personnels, etc. Ceci rend les organisations humaines bien plus complexes qu'elles ne le sont prévues à leur création.

D'après l'étude de différentes représentations existantes, un modèle d'organisation est proposé. Sur ce modèle, quatre types d'organisations sont ensuite représentés afin de permettre la création de la bibliothèque.

III.2.1.1 Proposition d'un modèle d'organisation

Dans le but de modéliser une organisation séparément de son instanciation par un groupe d'agents déterminé, certains aspects de la méthode de Pattison (présentée dans le chapitre précédent, §II.2.1.2) ont été modifiés. La base est conservée, à savoir une structure organisationnelle définie par un ensemble de composants et un ensemble de relations entre les composants (figure III.12). Les changements interviennent dans la spécification d'un composant, qui est simplement défini par son type et son rôle dans l'organisation, sans que des précisions soient apportées sur ses responsabilités, connaissances ou caractéristiques. De même, les seules relations prises en compte par le modèle sont les plus importantes parmi celles citées par Pattison, c'est-à-dire celles d'autorité et de communication.

Une telle description peut être propagée aux différents niveaux de la structure organisationnelle. Si un composant est un groupe, sa propre organisation, ses composants internes et les liens entre eux sont descriptibles par la même méthode. Ainsi, une organisation comportant un grand nombre de niveaux hiérarchiques ou de sous-organisations peut être décrite, de façon récursive.

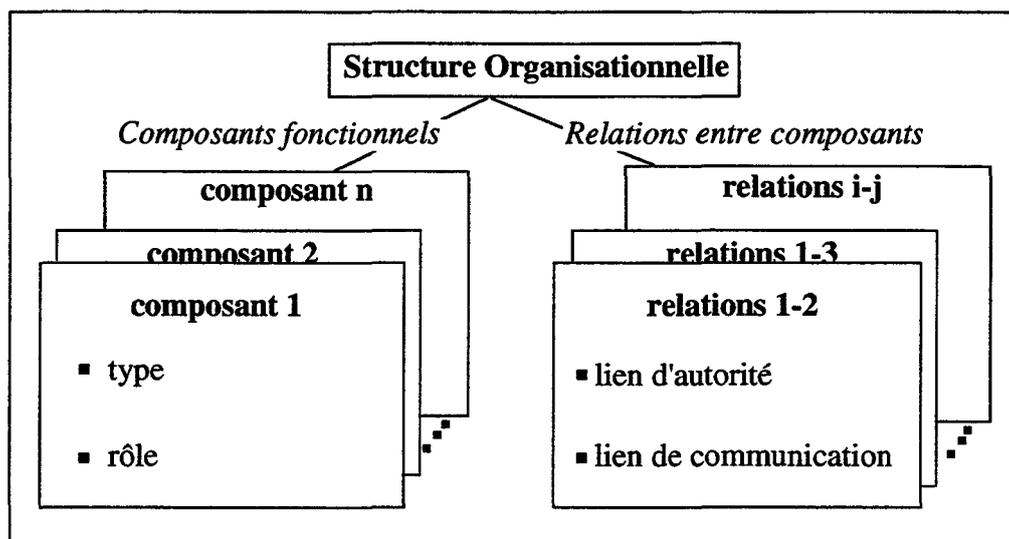


Fig. III.12 : Description d'une structure organisationnelle.

III.2.1.1.1 NOTION DE COMPOSANT

Un composant est formé des éléments suivants :

- le type du composant : individuel (agent unique) ou composite (groupe),
- le rôle du composant. Les différentes sortes de composants existants sont identifiés par le rôle qu'ils jouent dans l'organisation.

Trois rôles ont été définis : la coordination, l'exécution et l'expertise. 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 semblent 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 système.

D'autres auteurs, comme Aebischer [90], 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 attendues en fonction de ces statuts. Par rapport à la représentation présentée ici, les "statuts" correspondent aux relations entre les composants.

A chaque type de 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.

III.2.1.1.2 NOTION DE RELATION ENTRE COMPOSANTS

Les relations entre composants sont de deux types :

- des liens d'autorité : ils spécifient le lien qu'un composant de rôle i a avec un composant de rôle j .
- des liens de communication : ils spécifient le sens de communication possible entre deux composants.

Les relations entre un composant i et un composant j sont déterminées par leurs rôles respectifs dans l'organisation. 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 qu'occupe un autre agent, quels sont les liens d'autorité et de communication susceptibles de les relier.

L'autorité et la communication sont liées. En effet, l'organisation constitue un tout parce que ses composants coopèrent. Pour réaliser cette coopération, ils ont besoin de transmettre des messages (informations, requêtes, ordres) par les liens de communication :

- Si le message est un ordre de réalisation d'une tâche ou une réponse à une tâche auparavant ordonnée, le lien est un lien d'autorité. Ce type de relation existe entre composants de niveaux hiérarchiques différents. Une telle relation crée une différence hiérarchique. En revanche, le lien entre deux composants appartenant au même niveau hiérarchique (ou à des niveaux équivalents) correspond réellement à un canal de communication et non à un lien d'autorité.
- Inversement, les liens d'autorité étant fixés, la communication s'établit, par nécessité, en fonction de ces liens. Si un ordre a besoin d'être transmis, un lien de communication doit être établi entre l'ordonnateur et l'exécutant. Si ce lien de communication ne peut être établi, le lien d'autorité disparaît.

Autorité et communication sont interdépendants, cependant nous subordonnerons la communication à l'autorité, dans un souci d'efficacité. En effet, il ne faut pas perdre de vue l'aspect finalisé des relations entre agents : les agents s'organisent dans un but précis. La construction du réseau de communication est soumise à ce but, et par là même, aux liens d'autorité nécessaires à la coordination des actions pour sa réalisation. Ainsi, les liens d'autorité sont supportés par un réseau de communication adéquat, qui apparaît plus comme un moyen que comme une fin. Dans le cas contraire, la réalisation d'un plan commun par les agents serait contrariée par les contraintes dues à la structure du réseau de communication : si les agents A et B ne peuvent communiquer, la coordination directe entre leurs actions est impossible et un intermédiaire devient alors indispensable, ralentissant la réalisation de leurs tâches.

La constitution d'un schéma formel, modélisant les structures organisationnelles, est une étape nécessaire pour pouvoir offrir aux agents des moyens leur permettant de s'organiser. En effet, grâce à cette première étape, il est possible de fournir aux agents diverses représentations d'organisations, afin qu'ils choisissent, parmi elles, celle qui leur convient dans un contexte donné. L'ensemble des représentations forme une base de données sur les organisations, une bibliothèque, dont la constitution est maintenant présentée.

III.2.1.2 Création de la bibliothèque

Les éléments de la bibliothèque sont des modèles d'interaction entre composants. Un modèle décrit les rôles des composants dans la structure globale et les relations entre eux. Il spécifie, pour chaque composant type, les composants avec lesquels il peut communiquer et le type de relation d'autorité à adopter envers chacun d'eux.

Nous décrivons une bibliothèque (Bibli) de modèles de structures organisationnelles (SO) :

$$\text{Bibli} = \{\text{SO}\}_m \quad (\text{D13})$$

Selon la représentation exposée au paragraphe précédent, un modèle de structure organisationnelle est défini par un ensemble de composants et un ensemble de liens entre ces composants (figure III.13) :

$$\text{SO}_m = \langle \{\text{composant}\}, \{\text{lien}\} \rangle_m \quad (\text{D14})$$

Un composant est défini par son type et son rôle dans la structure SO_m :

$$\text{composant}_{mc} = (\text{type}, \text{rôle})_{mc} \quad (\text{D15})$$

- la caractéristique de type sert à spécifier si le composant est un ou multiple,

$$\text{type} = \text{individu} \mid \text{groupe} \quad (\text{D16})$$

- le rôle exprime la fonction tenue par le composant dans la structure organisationnelle,

$$\text{rôle} = \text{expert} \mid \text{coordinateur} \mid \text{exécutant} \quad (\text{D17})$$

Un lien entre deux composants i et j de la structure SO_m est défini par

$$\text{lien}_{ml} = \langle (\text{composant}_{mi}, \text{composant}_{mj}), \text{lien}_a, \text{lien}_c \rangle_{ml} \quad (\text{D18})$$

où lien_a est le lien d'autorité entre ces deux composants : $\text{lien}_a = < \mid > \mid =$ (D19)

et lien_c , le lien de communication entre eux : $\text{lien}_c = \rightarrow \mid \leftarrow \mid \leftrightarrow$ (D20)

Un composant peut être lui-même une structure organisationnelle. Il est alors possible de le décrire à son tour en utilisant la même méthode.

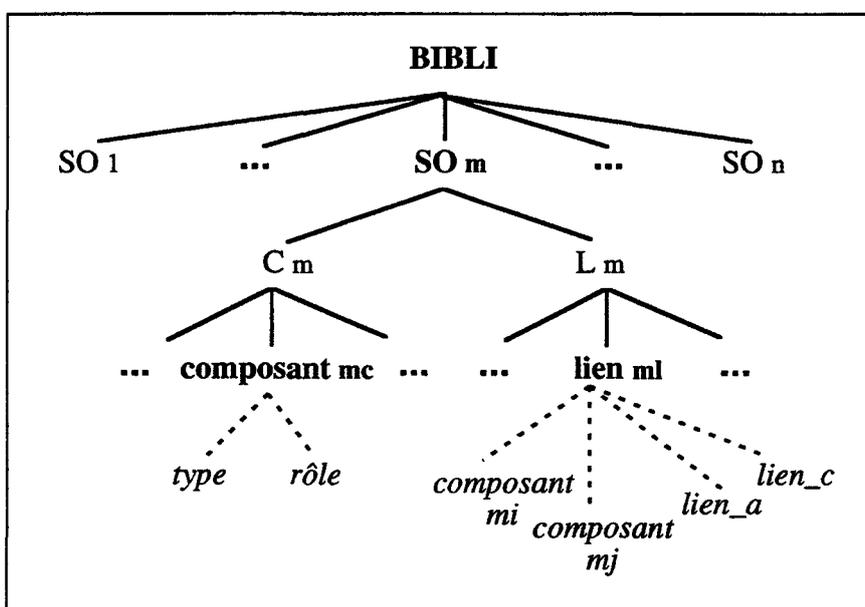


Fig. III.13 : Spécification de la bibliothèque de structures organisationnelles.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la classification des organisations proposée par Gasser présente un aspect générique intéressant. Pour cette raison, nous avons choisi d'insérer dans la bibliothèque quatre modèles — hiérarchie, marché, communauté et société — correspondant aux quatre catégories d'organisations de cette classification. Les modèles sont représentés dans la bibliothèque par la méthode proposée précédemment et illustrés par les figures III.14 à III.17. Il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit de *modèles* d'organisations, et donc qu'il existe de nombreuses variantes basées sur ces quatre types.

Parmi les relations entre composants de ces différents modèles d'organisations, seules celles qui correspondent à des liens existants sont représentées. Par exemple, pour le premier modèle (hiérarchie), les liens entre deux composants ayant des rôles d'exécutants ne sont pas précisés, cela signifie qu'ils sont inexistant, du moins dans le modèle de base.

III.2.1.2.1 HIÉRARCHIE

Une hiérarchie est basée sur le principe de la séparation des fonctions de coordination et de prise de décision, de celles d'exécution de ces décisions. Un exécutant reçoit des ordres d'un ou plusieurs individus, chargés d'effectuer les opérations de coordination entre tâches (figure III.14).

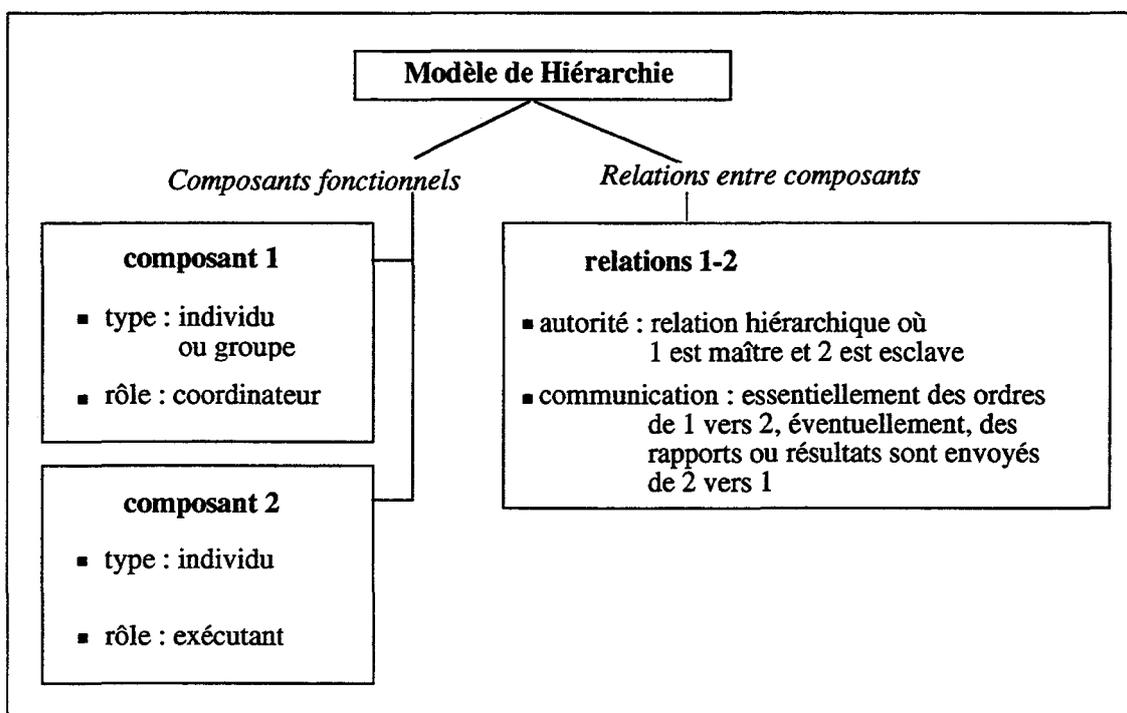


Fig. III.14 : Représentation du modèle hiérarchie.

III.2.1.2.2 COMMUNAUTÉ

Ce type d'organisation correspond à la communauté pluraliste de la classification de Gasser. Il comporte un seul type de composant. L'organisation fonctionne principalement par négociations et échanges de plans partiels. Chaque composant se retrouve tour à tour expert, coordinateur et exécutant. C'est une forme d'organisation assez "floue" en raison de l'absence de liens d'autorité (figure III.15).

III.2.1.2.3 MARCHÉ

Initialement, tous les composants sont pairs. Puis, des couples manager/contractant se forment. La formation des liens manager/contractant passe par une étape de diffusion d'appel d'offre par le manager. Durant cette étape, des liens nécessaires à la communication entre le manager et les contractants potentiels existent (figure III.16).

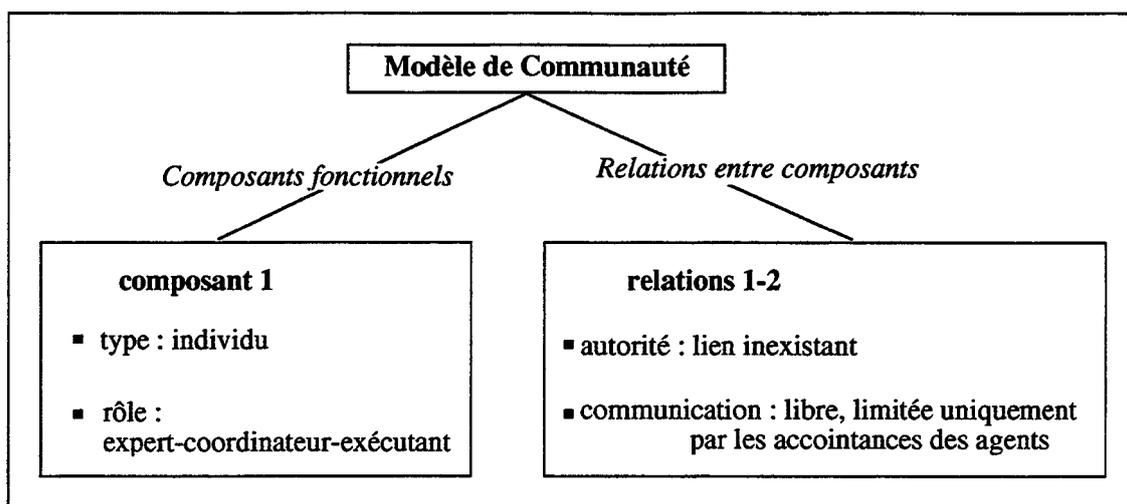


Fig. III.15 : Modèle de communauté.

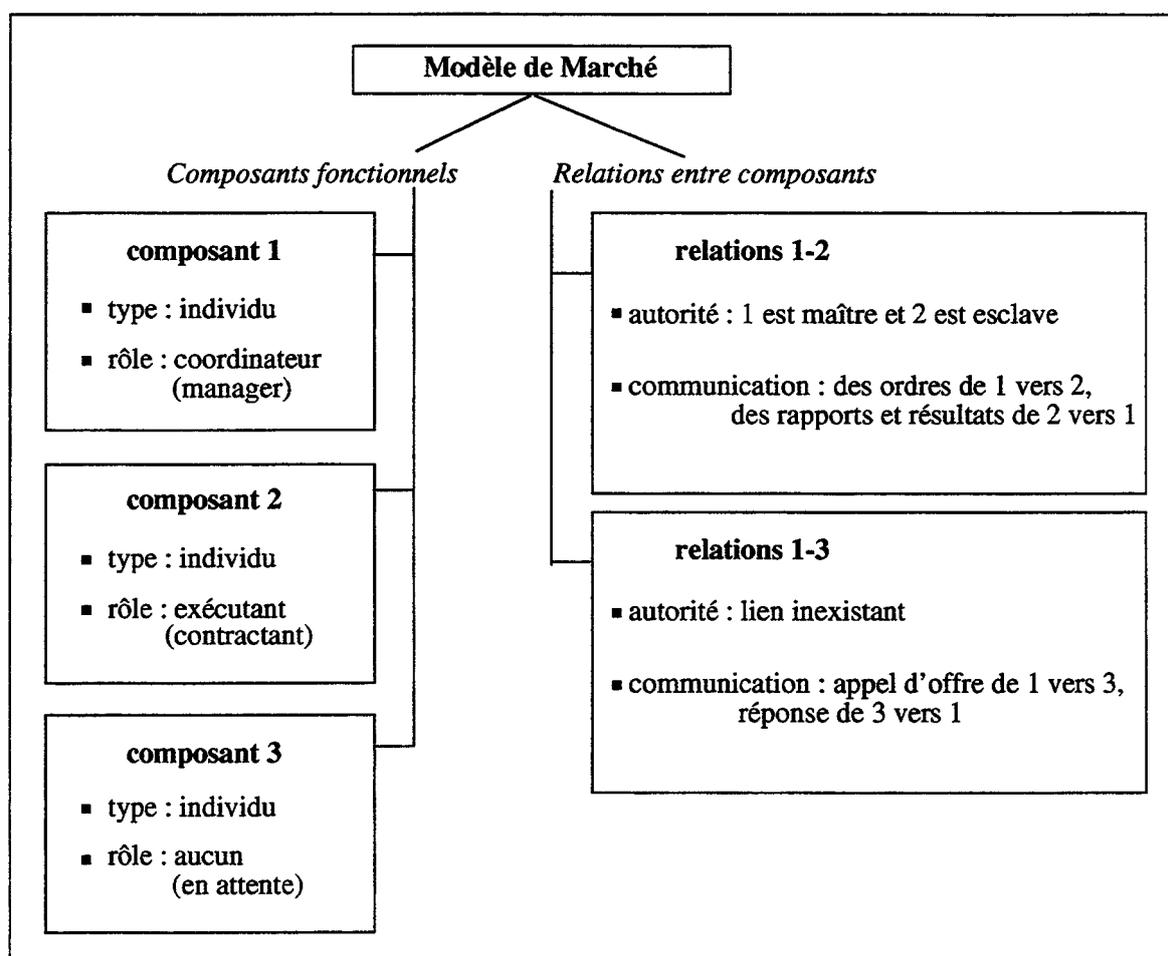


Fig. III.16 : Modèle de marché.

III.2.1.2.4 SOCIÉTÉ

Une société est une communauté avec des règles de comportement. Il s'agit de la forme d'organisation la plus complexe des quatre, car tenant à la fois de la hiérarchie et de la communauté, et déclinable à l'infini. Il est possible d'en fournir un modèle, bien que les règles régissant les relations entre les composants puissent varier considérablement d'une société à une autre. Nous en donnons le modèle le plus générique, dans lequel les trois types de rôles coexistent (figure III.17).

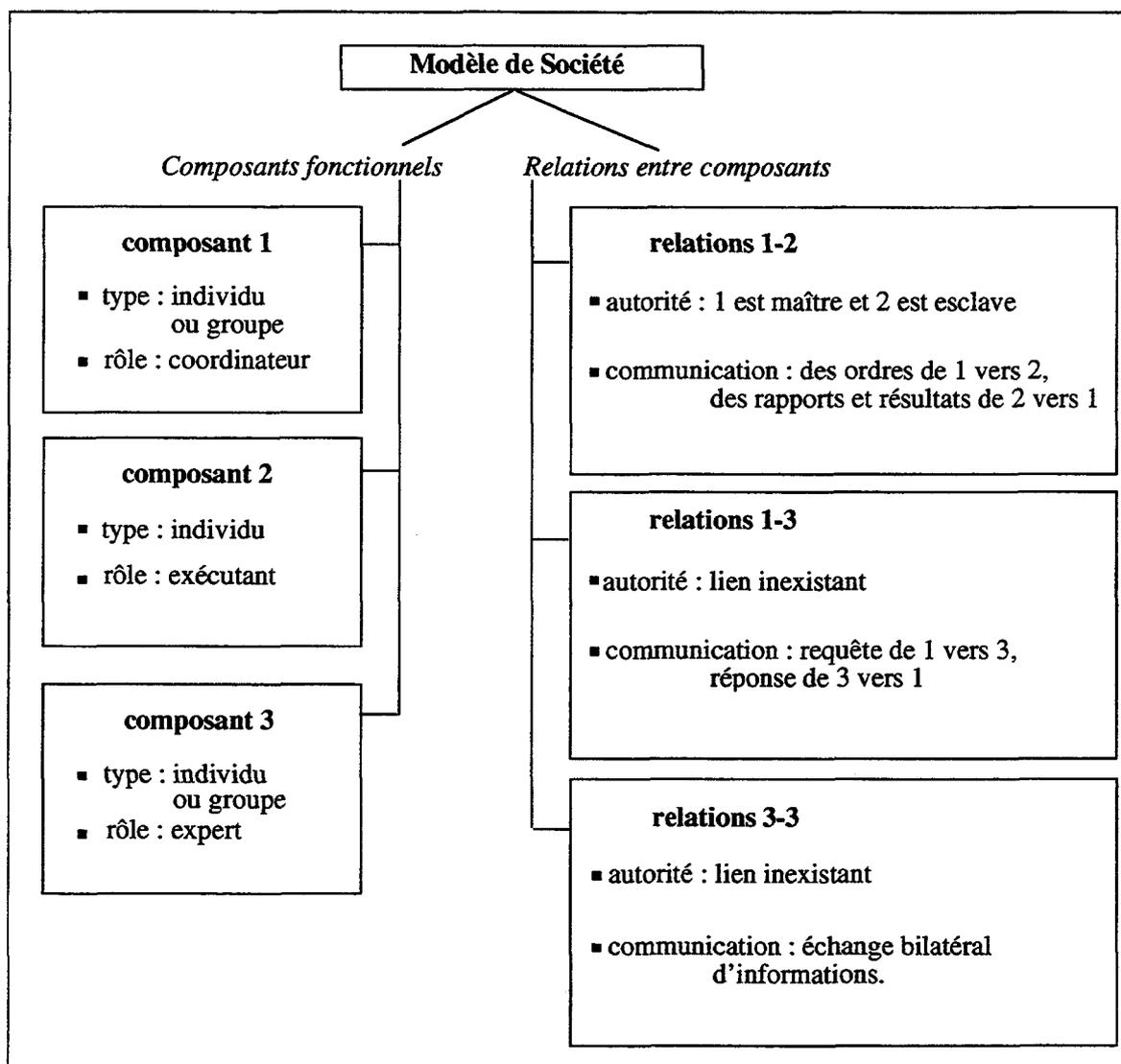


Fig. III.17 : Modèle de société.

Les moyens nécessaires à l'adaptation de l'organisation au contexte ont été posés, sous la forme d'une spécification de la tâche courante et d'une bibliothèque d'organisations. La mise en oeuvre de ces moyens est abordée dans la partie suivante.

III.2.2 Choix d'une organisation

Grâce à la bibliothèque, les agents ont accès à des modèles d'organisation. Selon les exigences de la tâche et les particularités des modèles, l'un des éléments de la bibliothèque est sélectionné. Ce choix est vu comme une action "réactive" car il n'est pas le résultat d'un raisonnement, mais est prévu par le concepteur du S.M.A.

Deux éléments permettent de répondre à la question du choix de l'organisation à adopter. Il s'agit, d'une part, des spécificités des quatre modèles d'organisation et d'autre part, des trois critères (K, A et R) retenus pour caractériser une tâche. Le premier de ces éléments de réponse est fourni par les conclusions énoncées au chapitre II (parties II.2 et II.3) ; le second a été présenté en première partie de ce chapitre. A partir de ces différentes informations, les situations dans lesquelles les modèles d'organisation sont appropriés, sont donc déterminées :

- La hiérarchie (notée H) supporte correctement des situations exigeant une coordination importante. Cela signifie, pour les caractéristiques de la tâche, un critère de coordination 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 (notée 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. La communauté convient donc seulement lorsque le critère de coordination R est 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 (noté 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 (notée 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).

La représentation sous forme de cube présentée auparavant est à nouveau utilisable pour visualiser les conclusions énoncées. Les lettres symbolisant les modèles d'organisation ont été placées aux points clés du cube, les sommets représentant les tâches-types (figure III.18).

Il est important de souligner que nous avons jugé inutile de déterminer une organisation adéquate pour le point d'origine des axes. En effet, si la tâche a peu d'exigences, l'organisation actuelle est supposée supporter sa réalisation sans qu'aucun changement ne soit nécessaire.

En suivant les aptitudes des organisations citées ci-dessus, les sommets du cube sont associés aux modèles d'organisation, excepté en deux points : le point p1 (K faible, A élevé, R élevé) et le point p2 (K élevé, A et R faibles). Nous avons choisi d'insérer le modèle "Société" au point p1 et le modèle "Marché" au point p2, car ils réunissent les qualités nécessaires à la réalisation de tâches de ce type. En effet, la société convenant à des situations ayant des exigences élevées dans les trois critères, est supposée convenir au cas p1, qui est de moindre exigence. De même, le marché réunissant les capacités nécessaires aux situations (K élevé, A élevé, R faible), convient par conséquent à une situation moins exigeante, à savoir (K élevé, A faible, R faible). Pour des raisons identiques, les points milieux sont englobés par les sommets supérieurs. Par exemple, les points i1 de coordonnées (1/2,0,1) et i2 situé en (1/2,0,1/2) sont assimilés au point (1,0,1), dont l'organisation associée est M. Le point central (1/2,1/2,1/2) est représenté par la tâche-type (1,1,1) associée à l'organisation S.

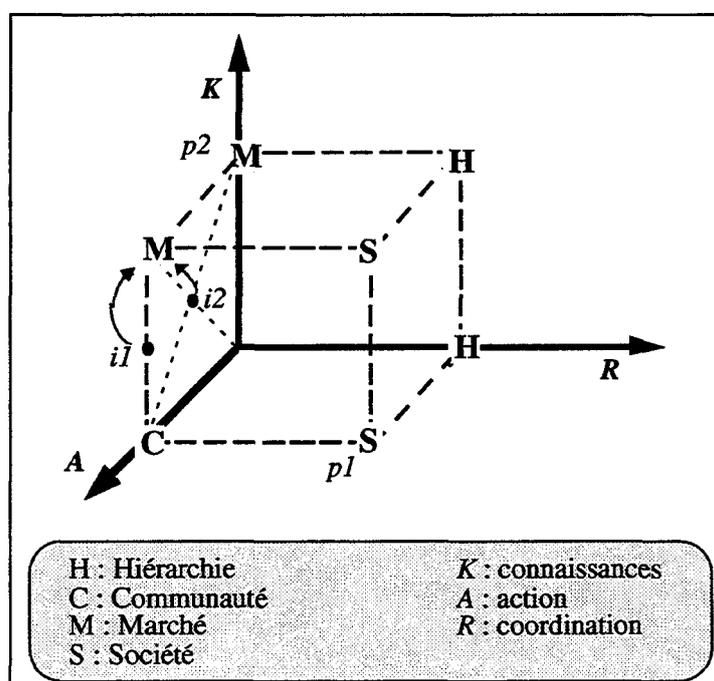


Fig. III.18 : Associations entre les modèles de la bibliothèque et les tâches-types.

Les associations entre tâches-types et modèles d'organisation effectuées ci-dessus sont connues des agents. L'utilisation d'une telle présélection des modèles d'organisation, d'après la classification opérée sur les tâches, rend l'adaptation organisationnelle "réactive". En effet, le

choix de la nouvelle organisation provient des paramètres définis à la conception du système, il n'est pas le résultat d'un raisonnement effectué par les agents. Ceux-ci ne contrôlent pas la sélection du modèle dans la bibliothèque, elle est imposée.

Cette méthode doit permettre, étant donné un plan P de réalisation et une bibliothèque de structures organisationnelles $Bibli$, de déterminer quelle est la structure SO_i de $Bibli$ la plus adaptée en vue de réaliser P . Pour cela, on détermine les coordonnées (x_k, x_a, x_r) du sommet du cube KAR qui correspond au traitement de P comme exposé en III.2.2 et III.2.3. A chaque sommet du cube, est associée une structure organisationnelle, qui est la structure la plus adaptée étant données les caractéristiques de la tâche correspondant à ce sommet. La méthode proposée est donc une fonction d'association, qui à chaque triplet (x_k, x_a, x_r) fait correspondre une structure organisationnelle SO_i . La bibliothèque de structures comprend donc au maximum huit structures différentes.

Cette association entre un élément de $\{0,1\}^3$ et une organisation de $Bibli$, se fait de manière discrète, puisqu'à chaque triplet (x_k, x_a, x_r) est associé explicitement un élément de $Bibli$:

$$\text{association : } \begin{array}{l} \{0,1\}^3 - (0,0,0) \rightarrow \\ (x_k, x_a, x_r) \mapsto \end{array} \begin{array}{l} \text{Bibli} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{H, si } x_a = 0 \text{ et } x_r = 1 \\ \text{C, si } (x_k, x_a, x_r) = (0,1,0) \\ \text{M, si } x_k = 1 \text{ et } x_r = 0 \\ \text{S, si } x_a = 1 \text{ et } x_r = 1 \end{array} \right. \end{array} \quad (f3)$$

Le choix de l'organisation cible ayant été explicité, la transition de l'organisation initiale à cette nouvelle structure est désormais présentée. Elle constitue la mise en oeuvre pratique de l'organisation.

III.2.3 Organisation effective

Les transitions entre structures organisationnelles sont réalisables selon différentes méthodes. Nous en proposons trois, que nous allons détailler dans les paragraphes suivants : la méthode du "tout ou rien", la méthode "économique" et la méthode itérative.

III.2.3.1 Méthode "tout ou rien"

La première méthode que nous proposons, consiste à ôter tous les liens existants et à remettre tous les agents au même niveau. C'est en quelque sorte une remise à zéro du système tout entier. La nouvelle organisation est construite à partir de "rien". L'avantage est que l'organisation nouvellement créée correspond parfaitement au modèle choisi. L'inconvénient réside dans le problème de sa construction. En effet, il est difficile aux agents de s'organiser s'ils n'ont plus moyen de communiquer ! Le problème peut être contourné en diffusant le modèle parmi les agents

avant toute destruction de liens. La dynamique organisationnelle revient dans ce cas, à instancier tour à tour des modèles différents. Il est ainsi possible d'imaginer une seconde bibliothèque contenant les instanciations des modèles de la première bibliothèque, pour les agents du système considéré (figure III.19).

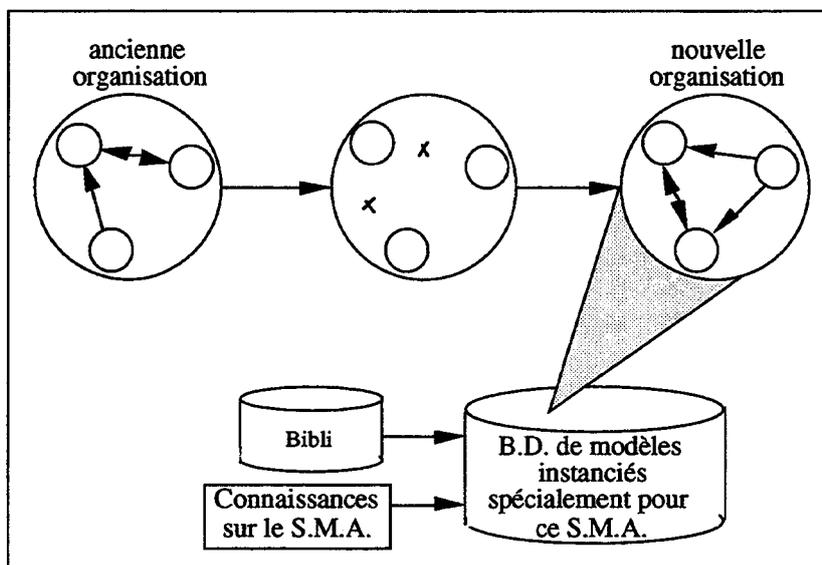


Fig. III.19 : Méthode "tout ou rien".

III.2.3.2 Méthode "économique"

La deuxième méthode qui nous semble possible, consiste à fonder la nouvelle organisation sur l'ancienne. Un nombre maximal de liens et d'instanciations de composants par des agents, est conservé (d'où le qualificatif "économique"). La nouvelle structure se développe à partir d'un ensemble d'éléments fixes (figure III.20). L'avantage réside dans l'économie réalisée en termes de destruction ou de construction. L'inconvénient est qu'elle nécessite une connaissance globale de l'organisation actuelle, telle qu'elle est réellement. Il est plus difficile de déterminer les éléments à conserver dans la structure actuelle, que de tout détruire et en créer de nouveaux comme le fait la méthode précédente.

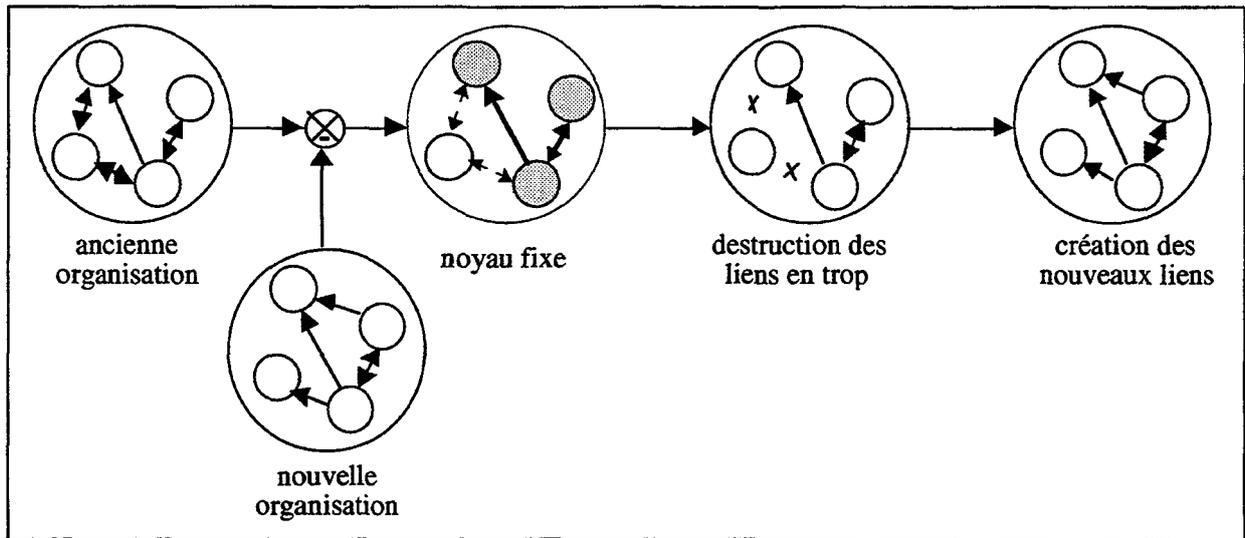


Fig. III.20 : Méthode "économique".

III.2.3.3 Méthode itérative

Le principe de la troisième méthode est comparable à celui de la méthode "économique", excepté le fait qu'on ne cherche pas à déterminer les éléments invariants de manière globale. L'ancien réseau est utilisé afin de propager les indications d'organisation parmi les agents. Un agent à qui parvient le message de prendre un rôle particulier, détermine grâce à ces indications, les liens qu'il doit conserver avec d'autres agents et ceux qu'il peut créer. L'organisation est propagée à travers le réseau formé par la structure présente, qui est transformée au fur et à mesure que les agents prennent de nouveaux rôles (figure III.21). Cette dernière méthode présente à nos yeux le meilleur compromis efficacité/économie.

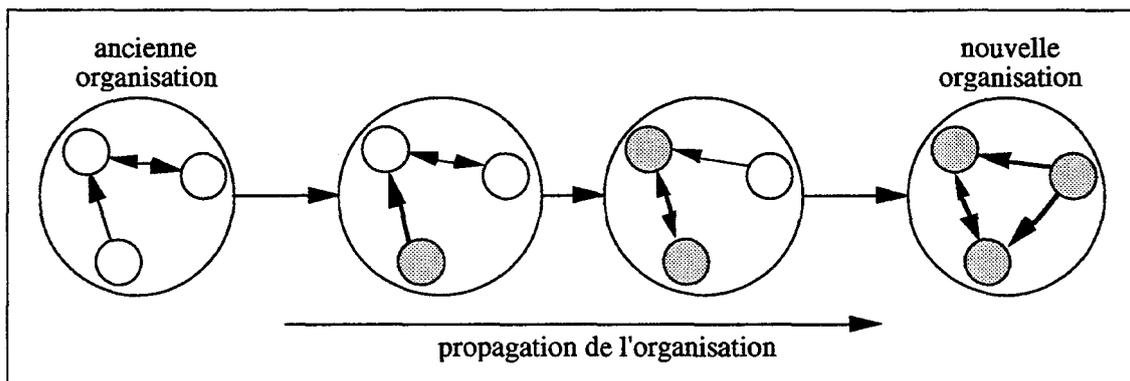


Fig. III.21: Méthode itérative.

Cette dernière partie traitant de l'organisation effective, termine la présentation des moyens nécessaires à la réalisation de l'adaptation du système au contexte de tâche.

Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode d'adaptation de l'organisation d'un S.M.A. a été présentée. Elle consiste à changer la structure organisationnelle supportant la coordination et la communication parmi les agents.

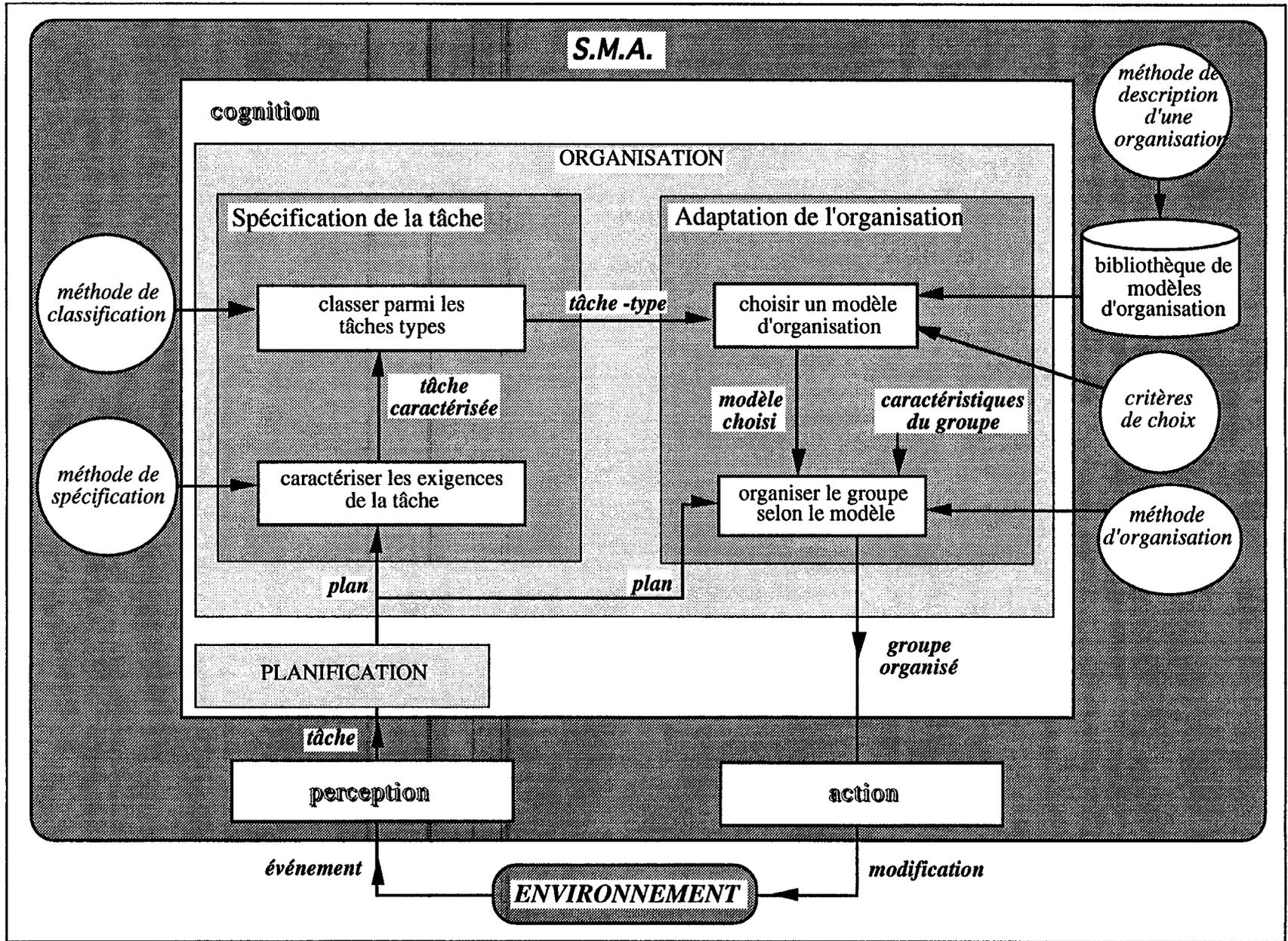
La méthode d'organisation proposée comprend deux étapes importantes (figure III.22) :

- La première est la spécification de la tâche courante. La tâche qui est assignée aux agents est spécifiée selon trois caractéristiques pertinentes pour la sélection du type d'organisation adéquat. Il s'agit des exigences de la tâche en termes de **connaissance (K)**, d'**action (A)** et de **coordination (R)**.
- La seconde étape concerne l'adaptation de l'organisation. Une bibliothèque de modèles organisationnels forme l'élément principal autour duquel s'articulent des méthodes utilisées par les agents pour réaliser les différentes étapes du processus d'adaptation.

De plus, un formalisme décrit précisément les constituants de cette méthode, afin de la rendre opérationnelle. Il est en particulier possible de l'implémenter au sein d'un système multi-agents artificiels.

Dans le but de valider la globalité de la méthode, ces diverses propositions ont été testées à l'aide d'un système composé d'agents informatiques. Cette étape de validation est décrite dans le chapitre suivant.

Fig. III.22 : Outils pour l'organisation adaptative d'un système multi-agents .



Chapitre IV

Application de la méthode proposée :
conception et mise en oeuvre de
SYGMA, un S.M.A. à adaptation
organisationnelle

Introduction

Des moyens pour permettre à un S.M.A. d'assurer son adaptation organisationnelle ont été proposés dans le chapitre précédent. L'objectif est désormais de vérifier l'utilisation, dans la pratique, de la méthodologie exposée.

Dans ce but, un exemple inspiré de l'image, désormais classique, des "robots fourrageurs" est utilisé. Une équipe de robots est supposée avoir atterri sur une planète inconnue. Pour mener à bien leur mission qui consiste à étudier cette planète (son atmosphère, sa composition, ...), les robots doivent collaborer et se mettre d'accord sur les actions à entreprendre. Nous supposons que ce sont des machines dont l'architecture interne est conçue selon un modèle d'agent cognitif et possédant les capacités d'adaptation organisationnelle décrites dans notre méthodologie.

Par le biais de cet exemple, ce chapitre dépeint, en deux parties, la concrétisation des éléments théoriques avancés au chapitre précédent.

La première partie de ce chapitre retrace les phases de conception et de développement du système SYGMA [Le Strugeon 94c], autorisant la simulation d'univers multi-agents. La formalisation des différents constituants d'un univers multi-agents est poursuivie et complétée. La description en niveaux d'abstraction est à nouveau utilisée.

La deuxième partie détaille l'organisation des agents telle qu'elle a été développée dans le système et les tests effectués concernant les critères de choix d'une organisation. La propagation de celle-ci au sein du système est explicitée, ainsi que les comportements des agents selon la forme d'organisation adoptée.

IV.1 Architecture de SYGMA : un SYstème orGganisationnel Multi-Agents

Un système multi-agents destiné à mettre en oeuvre les méthodes proposées a été développé. Nous l'avons dénommé SYGMA, pour SYstème orGganisationnel Multi-Agents. Lors de la conception de ce système, l'accent a été porté sur ses facilités d'adaptation organisationnelle.

La démarche de conception utilisée et l'architecture globale du système sont décrites dans un premier paragraphe. Les détails de cette architecture sont ensuite exposés dans les paragraphes suivants.

IV.1.1 Conception du S.M.A. : choix méthodologiques et techniques

La figure IV.1 présente une vue globale de SYGMA. Le système est composé de deux modules principaux simulant un S.M.A. et son environnement. Certaines caractéristiques de ces deux modules peuvent être modifiées par l'utilisateur du système, par l'intermédiaire d'une interface. Il est, par exemple, possible d'ajouter ou d'ôter des agents et des objets, ainsi que de modifier leurs caractéristiques. L'utilisateur peut également demander la réalisation d'une tâche spécifique, qui est alors perçue comme un événement par le S.M.A.

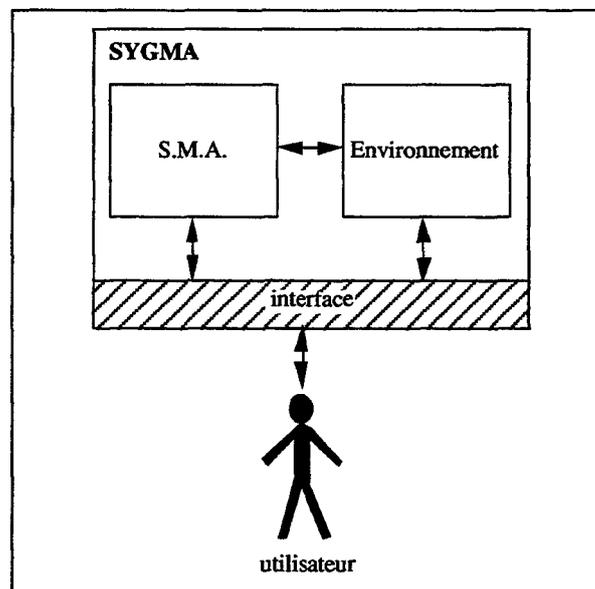


Fig. IV.1 : Vue globale de SYGMA.

Les trois niveaux de description Univers, Système et Agent structurent la démarche de conception du système. Les grandes lignes de conception et les choix effectués pour l'implémentation de SYGMA sont ceux regroupés par niveaux dans le tableau IV.1.

- Au niveau Univers, le comportement global du système doit être spécifié. Dans SYGMA, le S.M.A. réagit aux événements et effectue des modifications de son environnement. L'environnement subit donc ces modifications en plus des perceptions.
- Au niveau Système apparaissent les choix de conception des relations entre agents et objets et parmi les agents. Dans SYGMA, les agents perçoivent et agissent sur les objets ; ils interagissent par messages.
- Au niveau Agent, l'intelligence de l'agent est conçue. Dans SYGMA, l'architecture des agents est du type cognitif.

Tableau IV.1 : Caractéristiques globales de SYGMA.

niveau d'abstraction	utilisation en conception	conception de SYGMA
niveau Univers	spécification du comportement du système	S.M.A. : événement / modification environnement : modification et perception
niveau Système	conception des interactions agents/objets conception des moyens d'interaction des agents	agent : perception / action sur les objets de l'environnement interaction par messages
niveau Agent	conception de l'intelligence de l'agent	agent cognitif

Comme cela a été vu précédemment, chaque niveau expose le comportement externe et observable d'éléments, dont la composition interne apparaît au niveau inférieur. Or, ce principe de dualité comportement/architecture se retrouve dans le langage Ada. En effet, un "paquetage" Ada comporte deux facettes : une externe, sa spécification ou ensemble fonctionnel, et une interne, le "corps" du paquetage, l'ensemble opérationnel. De plus, ce langage offre des possibilités de simulation de processus se déroulant en parallèle (la communication entre processus sera vue en détail dans le paragraphe traitant du système multi-agents). En outre, Ada apporte une lisibilité et des facilités de maintenance du code appréciables sitôt que le système développé est de taille importante et amené à évoluer. Booch [88] dit à ce propos que "*Ada est bien adapté à la création de gros systèmes, fiables et maintenables*". Pour toutes ces raisons, le système a été développé en langage Ada.

Les paragraphes suivants s'ordonnent selon les trois niveaux d'abstraction. Ils apportent des détails et des explications approfondies sur les différents éléments du système. Ces derniers sont décrits selon le formalisme introduit au chapitre précédent¹.

¹La numérotation des définitions, propositions et fonctions reprend là où elle s'était arrêtée à la fin du chapitre III.

IV.1.2 Niveau Univers

L'univers multi-agents est vu comme un ensemble d'au moins un couple formé par un système multi-agents et son environnement (par exemple, l'équipe de robots et son environnement) :

$$UMA = \{(SMA, env(SMA))\} \quad (D21)$$

L'environnement, en tant qu'ensemble des objets perçus et manipulés par le système, dépend du S.M.A. considéré. C'est pourquoi la notation $env(SMA)$ est utilisée dans la définition (D21). Cependant, n'est étudié dans ce qui suit qu'un système multi-agents particulier avec son environnement. Puisqu'aucune ambiguïté n'est alors possible et pour alléger l'écriture des définitions et équations, $env(SMA)$ sera abrégé en Env .

La conception des relations entre le S.M.A. et son environnement se fait au niveau Univers. A ce niveau, seul est visible le comportement du système multi-agents dans son ensemble vis-à-vis de son environnement (figure IV.2). Dans SYGMA, le S.M.A. perçoit et agit sur son environnement. Les résultats de perception constituent éventuellement des événements pour le S.M.A., c'est-à-dire des informations qui déclenchent la réalisation de tâches. L'environnement est conçu comme une entité globale statique, ce qui signifie qu'il n'évolue pas par lui-même mais en fonction des actions effectuées sur lui. Dans notre exemple, cela signifie que la planète explorée est considérée comme immuable ; son état est modifié uniquement par les actions effectuées par les robots. L'environnement est implémenté par une tâche Ada (représentée graphiquement par un parallélogramme) : toute perception ou modification de l'environnement est définie comme une entrée de la tâche.

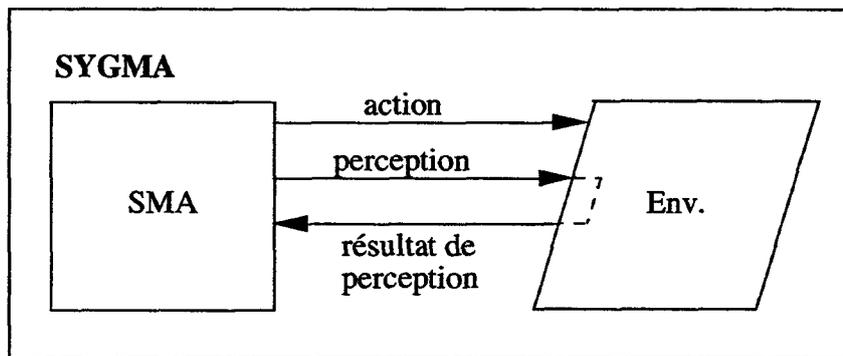


Fig. IV.2 : Conception des interactions S.M.A./environnement au niveau Univers.

IV.1.3 Niveau Système

Les détails de conception se poursuivent au niveau Système par la description des architectures des deux composants principaux de l'univers multi-agents. Ceux-ci sont décrits successivement.

IV.1.3.1 Le S.M.A.

Le système est globalement décrit dans le premier paragraphe, tandis que le second est consacré au mode de communication instauré parmi les agents.

IV.1.3.1.1 REPRÉSENTATION ET STRUCTURE DU SYSTÈME

Le comportement du système multi-agents développé se résume à deux états : un état d'attente et un état de réalisation de tâche (figure IV.3). La transition de l'état d'attente à celui de réalisation de tâche est provoquée par la réception d'un événement par le système. Tant que la tâche actuelle n'est pas achevée ou que de nouveaux événements sont reçus, le système reste dans ce second état. La transition inverse se produit lorsque la tâche est achevée (ou considérée comme telle car reconnue impossible à réaliser) et qu'aucun événement nouveau n'a été perçu.

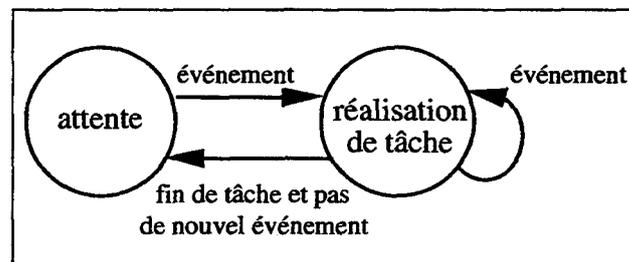


Fig. IV.3 : Etats d'un système multi-agents.

De façon interne, un système multi-agents est défini par l'ensemble (Agents) des agents qui le composent et par sa structure d'organisation (SO) :

$$\text{SMA} = \langle \text{Agents}, \text{SO} \rangle \quad (\text{D22})$$

La notion de structure organisationnelle a été formalisée dans le chapitre précédent, par les définitions D13 à D20 (§III.2.1.2).

L'implémentation des agents en tant que tâches Ada concurrentes autorise la simulation de leur indépendance et de leur autonomie. La simulation porte sur un nombre fini (m) d'agents basés sur un modèle identique. Apparemment indiscernables, nous verrons qu'ils se caractérisent, en fait, par des connaissances et des capacités différentes. Leur apparence étant homogène, ils seront distingués par leur indice uniquement. Cet indice constitue de fait leur "identité", définie et portée à leur connaissance à l'initialisation du système.

$$\text{Agents} = \{ \text{Agt}_i \}_{i \in [1, m]} \quad (\text{D23})$$

Le comportement d'un agent est descriptible par sa manière d'interagir avec les autres agents du système et d'agir sur les objets de l'environnement. L'interaction avec les autres agents passe par

la communication, c'est-à-dire par la réception et par l'envoi de messages ; l'interaction avec l'environnement consiste à percevoir et agir sur celui-ci (figure IV.4).

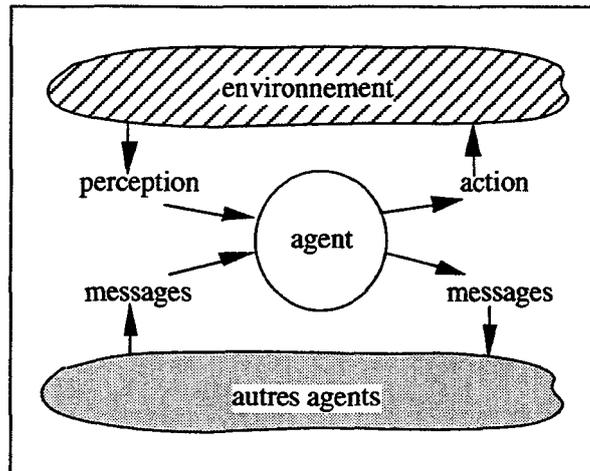


Fig. IV.4 : Entrées/Sorties observables d'un agent.

Toutes les actions susceptibles de modifier l'état de l'agent, son comportement ou ses objectifs lui sont transmises par l'intermédiaire d'un module de communication.

IV.1.3.1.2 LA COMMUNICATION DANS LE SYSTÈME

Dans SYGMA, la communication est basée sur l'envoi de messages. Chaque agent dispose d'une boîte aux lettres personnelle, qu'il interroge à intervalles réguliers². Chaque boîte peut contenir un nombre fini de messages et possède un mécanisme d'entrée/sortie protégé, empêchant lecture et écriture simultanées. Les boîtes aux lettres sont gérées par un module spécifique de communication. Les deux formes principales de communication sont possibles : point à point (liaison directe entre deux agents) et par diffusion (liaison indirecte entre un agent et tous les autres membres du groupe).

La communication point à point fonctionne sur le modèle suivant : un agent A désirant envoyer un message à un agent B, active la procédure d'envoi appartenant à ce module, en indiquant le destinataire par son identificateur, à savoir "B". Le module de communication se charge de déposer le message dans la boîte aux lettres de l'agent B. Le message est réceptionné lors d'une des lectures périodiques, effectuée par chaque agent, de sa boîte.

La diffusion d'un message à tous les agents appartenant au système est une facilité qui a été ajoutée. L'agent expéditeur spécifie simplement le message à envoyer, le module de communication se charge de le diffuser à tous. De cette façon, un agent est capable de joindre tous

²Cette interrogation régulière est le choix effectué pour la conception de SYGMA ; il aurait également été possible de considérer l'arrivée d'un message comme une interruption des activités de l'agent.

les agents du système sans pour autant connaître l'identité de chacun. Toutefois, cela n'autorise absolument pas un agent à communiquer avec un (unique) autre agent dont l'identité lui serait inconnue.

Tout le mécanisme de communication est occulté pour les agents (figure IV.5). Chacun d'eux ne connaît que les deux actions consistant à envoyer un message et à lire un message. La gestion des messages est basée sur le principe des files d'attente de type "premier entré, premier sorti", afin que le message lu par l'agent soit le plus ancien parmi ceux se trouvant dans sa boîte.

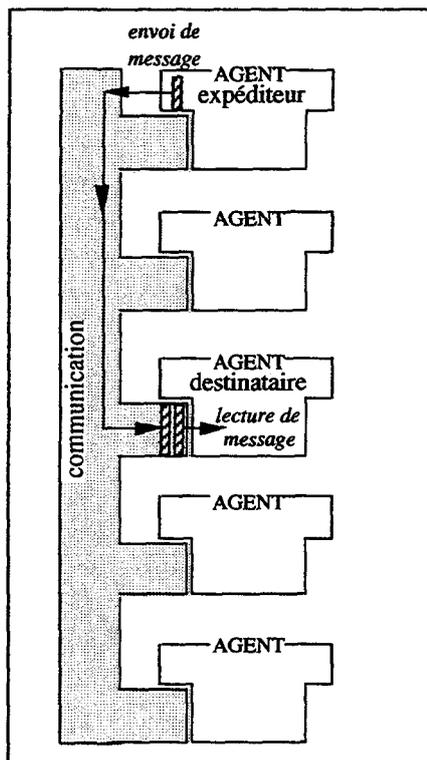


Fig. IV.5 : Mode de communication au sein de SYGMA.

Le protocole de communication stipule que le message doit comporter les indications suivantes :

$$\text{message} = \langle \text{expéditeur, destinataire, nature, contenu} \rangle \quad (\text{D28})$$

Le module de communication se charge de remplir le champ expéditeur. Le destinataire, la nature et le contenu du message sont indiqués par l'agent expéditeur :

- La nature du message sert à classer celui-ci parmi les catégories : Information, Requête, Réponse, Ordre, Organisation et Comportement.
- Le contenu indique à la fois le message proprement dit (signification) et le sujet sur lequel il porte (un agent, un objet ou l'organisation).

Le module de communication gère également les modifications apparaissant dans la population du S.M.A. La sortie d'un agent du système provoque la désallocation de sa boîte aux lettres. Dès

lors, tout envoi vers cet agent est suivi d'un message d'erreur déposé dans la boîte de l'agent expéditeur. L'entrée d'un nouvel agent dans le système est accompagnée de l'attribution d'une boîte correspondante (dans le cas où ce nouvel agent remplacerait un agent sorti du système, les messages envoyés à l'ancien agent aboutissent dans la boîte du nouveau).

La nature des messages (ordre, requête, etc.) et leur objet (objet, agent, etc.) donnent à l'agent destinataire toutes les informations dont il a besoin pour effectuer des actions en conséquence. Les actions effectuées par les agents modifient les états des objets de l'environnement. L'implémentation de ceci est décrite dans le paragraphe suivant.

IV.1.3.2 L'environnement

L'environnement est conçu comme un processus à trois états (figure IV.6) : un état libre, un état "modifié" et un état "perçu". L'état "libre" est dénommé ainsi par opposition aux deux autres états qui caractérisent des situations dans lesquelles l'environnement est manipulé par un ou plusieurs agents. L'environnement est perçu par un nombre quelconque d'agents et modifié par un seul agent à la fois.

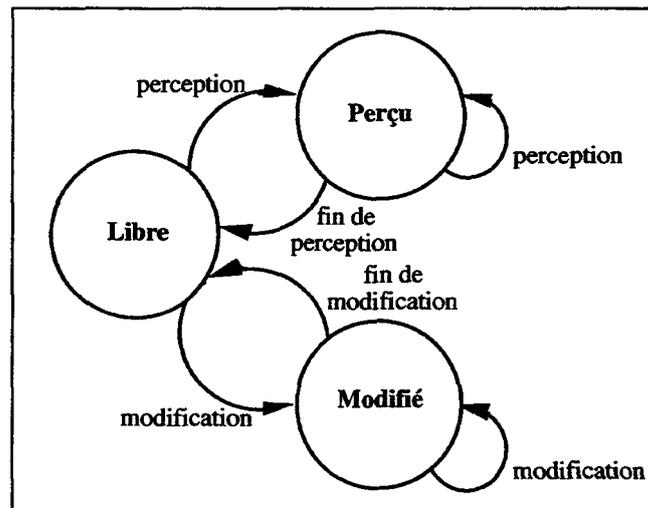


Fig. IV.6 : Etats de l'environnement.

L'architecture de l'environnement se compose de la représentation des objets et d'un module de gestion de ces objets, utile à la simulation des actions sur ceux-ci (figure IV.7). Le module de gestion des objets contient un gestionnaire de files d'attente qui permet à l'environnement de filtrer les actions effectuées sur les objets. Il reçoit un nombre quelconque de demandes de modification ou de perception de l'environnement, insère chaque nouvelle demande en fin de file et accède aux demandes de début de file (mécanisme FIFO). La demande est traitée et l'action désirée est rendue effective, à condition qu'elle soit réalisable. La vérification de ce dernier point se fait grâce à l'utilisation des connaissances contenues dans une base contenant des informations sur des catégories d'objets.

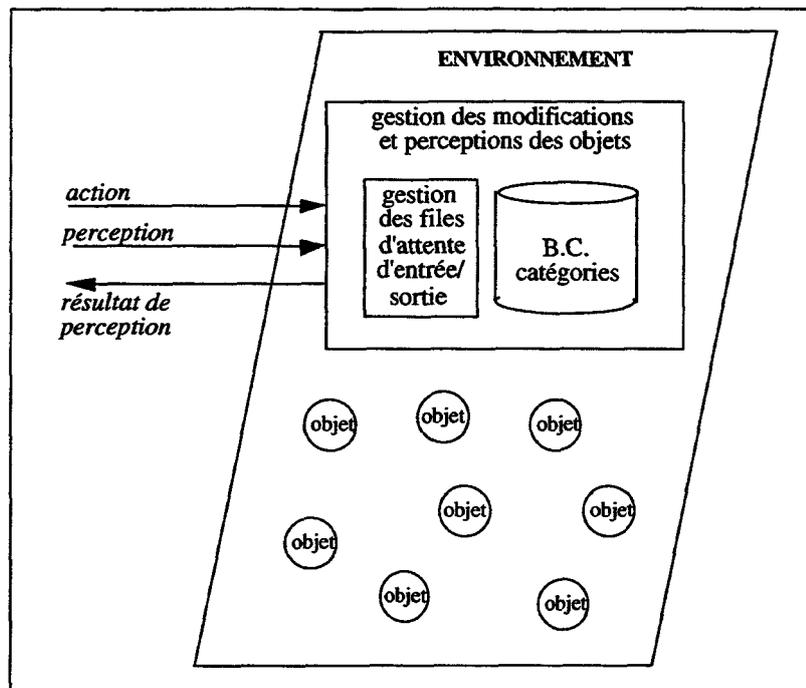


Fig. IV.7 : Architecture de l'environnement.

Au niveau système, les n objets composant l'environnement sont visibles.

$$\text{Env} = \{\text{objet}_o\}_{o \in [1,n]} \quad (\text{D24})$$

Les objets sont identifiés par leur indice. Les caractéristiques communes à plusieurs objets sont regroupées, définissant des catégories d'objets. Tout objet appartient à une catégorie et une seule. Un objet est ainsi caractérisé par son indice, sa catégorie et son état courant.

$$\text{objet}_o = \langle \text{categorie}, \text{etat} \rangle_o \quad (\text{D25})$$

Une catégorie comporte l'ensemble des états que sont susceptibles de prendre les objets de cette catégorie et les actions qu'il est possible de réaliser sur ces objets :

$$\text{categorie}_c = \langle \text{Etats}, \text{Actions} \rangle_c \quad (\text{D26})$$

où Etats_c est l'ensemble des états possibles pour les objets appartenant à catégorie c

Actions_c est l'ensemble des actions possibles sur les objets appartenant à catégorie c

Par exemple, tous les objets appartenant à la catégorie *portes* se trouvent soit dans l'état *ouverte*, soit dans l'état *fermée*, les actions que les agents peuvent effectuer sur ces objets sont *ouvrir_porte* et *fermer_porte* :

$$\text{categorie}_{\text{portes}} = \langle \{\text{ouverte}, \text{fermée}\}, \{\text{ouvrir_porte}, \text{fermer_porte}\} \rangle_{\text{portes}}$$

Sur la figure IV.8, on voit que tout objet $objet_o$ de la catégorie $catégorie_c$ a pour état courant un état e_k de l'ensemble $Etats_c$ et est modifiable par les actions de l'ensemble $Actions_c$. e_k est l'image de $objet_o$ par la fonction $etat_de$ qui associe à un objet son état courant au moment de la perception :

$$etat_de : \begin{array}{l} Env \rightarrow Etats_c \\ objet_o \mapsto e_k \end{array} \quad (f4)$$

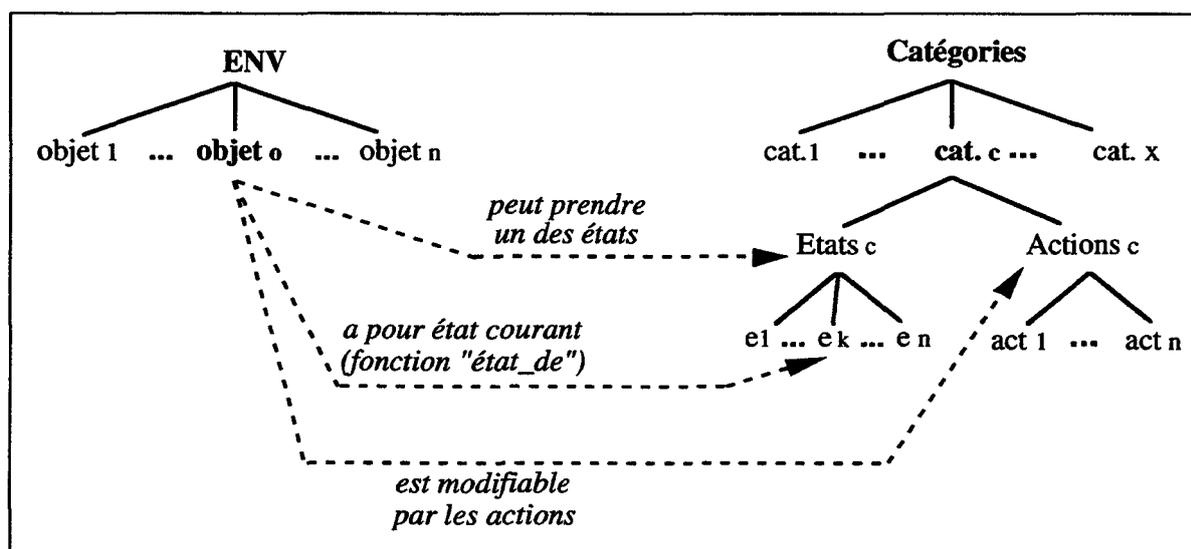


Fig. IV.8 : Modélisation de l'environnement.

Pour l'exemple des robots fourrageurs proposé, nous restreignons l'environnement simulé en décrivant uniquement :

- les objets appartenant à la catégorie "blocs de roche", dont les états possibles sont : (détaché, en_surface, tenu, sur(X), dans_soute, à_la_position(X)), ainsi que les négations respectives de ces états.
- la soute du vaisseau, avec les états possibles : (ouverte, pleine, vide) et leurs négations,
- l'appareil analyseur de roche aux états possibles : (libre, non libre).

Les actions suivantes sont simulées :

détacher_bloc(bloc) = détacher un bloc en surface de la planète	creuser(bloc) = creuser et détacher un bloc du sous-sol de la planète
tenir(bloc) = prendre un bloc détaché (dans une pince)	poser_sur(bloc,X) = poser un bloc (tenu) sur le sol ou sur un robot chargé de le transporter
commencer_analyse(bloc) = commencer à analyser un bloc avec l'analyseur	terminer_analyse(bloc) = terminer l'analyse
entrer_dans_soute(bloc) = déposer un bloc (tenu) dans la soute	sortir_de_soute(bloc) = sortir un bloc de la soute
ouvrir_porte(soute) = ouvrir la porte de la soute	fermer_porte(soute) = fermer la porte de la soute
déplacer(bloc,X,Y) = transporter un bloc (tenu) d'une position X à une position Y	

Les changements d'états d'objets sont les résultats d'actions effectuées par les agents. Une action est définie ainsi :

$$\text{act}_{ca} = \langle \text{Precond}, \text{Effets} \rangle_{ca} \quad (\text{D27})$$

avec :

- la catégorie des objets sur lesquels elle s'applique, représentée de façon indicielle (c),
- un indice (a), l'identifiant parmi l'ensemble des actions possibles sur les objets de la catégorie c ,
- un ensemble de préconditions (Precond), qui détermine les conditions d'application de l'action.

La relation *precond* associe à une action ses préconditions (au nombre de $(p+1)$, par exemple, pour l'action act_{ca}) :

$$\text{precond} : \text{Actions}_c \times \text{Env} \rightarrow (\text{Env} \times \text{Etats})^{p+1} \quad (\text{f5})$$

$$(\text{act}_{ca}, \text{objet}_o) \mapsto \{(\text{objet}_o, e_k), (\text{objet}_{o1}, e_{k1}), \dots, (\text{objet}_{op}, e_{kp})\}$$

Les préconditions de act_{ca} sont des états précis pour certains objets (appartenant à diverses catégories), dont l'objet sur lequel l'action est effectuée (objet_o). Ces préconditions doivent être vérifiées dans l'état courant de l'environnement pour que l'action soit déclenchée. Cela signifie, d'après la formule (f5) ci-dessus, que l'action act_{ca} appliquée à l'objet objet_o ne pourra se déclencher qu'à condition que objet_o soit dans l'état e_k , objet_{o1} dans l'état e_{k1} ,... et objet_{op} dans l'état e_{kp} . Par exemple, l'action *commencer_analyse(B)* ne peut être réalisée qu'à condition que B soit dans l'état *dans_soute* et que *analyseur* soit dans l'état *libre*.

- un ensemble d'effets (Effets), qui définit les changements provoqués dans l'environnement par l'application de l'action.

La fonction *effets* associe à une action, les effets qu'elle produit (pour exemple, ici au nombre de $(p'+1)$) :

$$\text{effets} : \text{Actions}_c \times \text{Env} \rightarrow (\text{Env} \times \text{Etats})^{p'+1} \quad (\text{f6})$$

$$(\text{act}_{ca}, \text{objet}_o) \mapsto \{(\text{objet}_o, e_k), (\text{objet}_{o1}, e_{k1}), \dots, (\text{objet}_{op'}, e_{kp'})\}$$

Les effets produits par act_{ca} sont des changements d'états de certains objets. Notons que l'état de l'objet (objet_o) sur lequel s'effectue l'action est modifié, ainsi que, par effet de bord, les états d'autres objets qui peuvent appartenir à d'autres catégories que celle de objet_o , comme les objets objet_{o1} jusqu'à $\text{objet}_{op'}$ de la formule (f6). Par exemple, l'action *sortir_de_soute(B)* a pour effets : $(B, \text{non dans soute})$, (B, tenu) et $(\text{soute}, \text{non pleine})$.

Effectuer une action revient à modifier les états de certains objets et donc à modifier la situation courante de l'environnement. Sous l'effet de l'action act_{ca} , l'environnement passe d'une situation S_{11} à une situation S_{12} . Cette modification est représentée par la relation suivante, inspirée du planificateur STRIPS [Fikes 71].

modification :

$$Actions_c \times S \rightarrow S$$

$$(\text{act}_{ca}, S_{11}) \mapsto \begin{cases} S_{11} & , \text{ si } \text{precond}(\text{act}_{ca}) \not\subset S_{11} \\ S_{12} = \text{effets}(\text{act}_{ca}) \cup \Delta_{11} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (f7)$$

où Δ_{11} est l'ensemble des états de la situation S_{11} qui ne sont pas des négations de ceux produits par act_{ca} :

$$\Delta_{11} = S_{11} - \left\{ (\text{objet}_{oi}, e_{ki}) / \exists (\text{objet}_{oi}, e_{kj}) \in \text{effets}(\text{act}_{ca}), (e_{ki} = \text{non } e_{kj}) \text{ ou } (e_{kj} = \text{non } e_{ki}) \right\} \quad (f8)$$

La modification est effective à condition que les préconditions de l'action act_{ca} soit vérifiées. Dans ce cas, le nouvel état de l'environnement (S_{12}) est défini par les nouveaux états des objets modifiés (appartenant aux effets de l'action) et par les états inchangés des autres objets. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si les préconditions ne sont pas vérifiées, l'action ne peut s'appliquer et l'état de l'environnement (S_{11}) ne change pas.

Une particularité importante du système est le fait que les interactions entre le S.M.A. et l'environnement sont soumises à un "goulet d'étranglement" : les actions des agents sur l'environnement sont restreintes à la modification d'un seul objet à la fois et par un seul agent. En effet, nous avons vu que les effets d'une action ne se limitent pas au seul changement d'état de l'objet sur lequel s'effectue l'action mais également à la modification de (p') autres objets. Deux actions appliquées simultanément à l'environnement risquent alors de déclencher des effets incompatibles. Nous sommes conscients de l'aspect peu réaliste de cette restriction, cependant il s'agit d'une hypothèse classique, qui s'avère nécessaire dans le cas d'une simulation informatique, dès lors que l'intégrité des objets doit être conservée.

Les motivations qui poussent l'agent à interagir avec son entourage (objets et agents) sont à rechercher dans sa structure interne. Celle-ci est décrite au niveau Agent.

IV.1.4 Niveau Agent

L'approche suivie dans ce travail est l'approche cognitive. Nous proposons dans ce paragraphe une conception particulière de ce type d'agents, parmi toutes les configurations possibles, que nous avons voulue simple et générique. Les aspects raisonnement et planification multi-agents n'y seront pas décrits explicitement car ils ne sont pas l'objet principal de nos travaux.

L'architecture d'un agent est composée d'un certain nombre de modules. En particulier, un agent comprend des bases de connaissances sur lui-même (*bc_perso*), sur les autres agents et l'organisation (*bc_sociale*), sur les objets de l'environnement et sur les actions qu'il peut effectuer sur ces objets (*bc_env*), ainsi qu'un ensemble d'objectifs (figure IV.9).

$$\text{agent}_i = \langle bc_perso, bc_sociale, bc_env, objectifs \rangle_i \quad (D29)$$

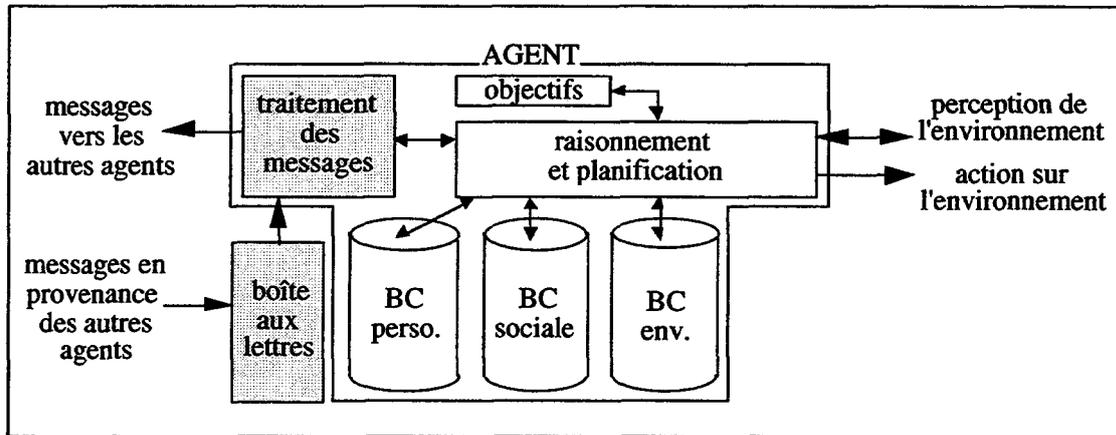


Fig. IV.9 : Architecture d'un agent de SYGMA.

La base de connaissances de l'agent sur lui-même inclut son identité et ses capacités (d'actions et de planification). La connaissance par l'agent de sa propre identité facilite ses relations avec les autres agents. Cette connaissance permet aux agents d'effectuer des communications directes entre deux agents. Les capacités d'un agent sont les actions sur les objets de l'environnement qu'il est capable d'effectuer seul.

$$bc_perso_i = (\text{identité}, \text{capacités})_i \quad (D30)$$

Un agent particulier ne connaît pas tous les objets de l'environnement, ni tous les autres agents du système. Les bases de connaissances *bc_env* et *bc_sociale* sont révisées régulièrement grâce aux éléments que l'agent a perçus ou déduit. Un agent ne possède qu'une représentation partielle et éventuellement faussée — il se peut que l'agent détienne des croyances fausses en raison, par exemple, de l'ignorance d'une information importante — de la réalité, qui comprend l'environnement et le S.M.A.

Les *objectifs* représentent les tâches à effectuer par l'agent, pour contribuer à réaliser la tâche globale incombant au système. Ce sont des actions connues de l'agent et structurées, soit par un plan local, soit simplement ordonnées de manière séquentielle.

Enfin, un module de traitement de messages permet à l'agent de gérer les informations en provenance des autres agents. Nous verrons plus loin (§IV.2.2.2) le comportement adopté par les agents à la réception de l'un de ces messages.

Les différents éléments du système SYGMA ont été présentés, leur mise en oeuvre fait l'objet de la partie suivante.

IV.2 Mise en oeuvre de la méthode d'organisation dans SYGMA

L'équipe de robots de notre exemple reçoit différents ordres de réalisation de tâches. Ces tâches nécessitent parfois une restructuration de l'organisation au sein de l'équipe. Les robots utilisent un cycle de réalisation de tâche tel qu'il a été défini dans notre méthodologie : ils se mettent d'accord sur le plan à réaliser et décident de l'organisation à adopter. La détermination de cette organisation passe, selon notre méthodologie, par le calcul des critères K, A et R, puis, basée sur les résultats de ce calcul, par l'adaptation organisationnelle du système.

La mise en oeuvre de l'adaptation organisationnelle consiste donc à spécifier la tâche, ceci fait l'objet d'un premier paragraphe, puis à réorganiser le système, de la manière indiquée dans le deuxième paragraphe. Le troisième paragraphe illustre ces deux étapes par l'exemple des robots.

IV.2.1 Spécification de la tâche

Durant la phase d'adaptation de l'organisation du système, le calcul des valeurs de K, A et R pour la tâche courante est effectué à l'aide des formules (D6), (D10) et (D12) présentées au chapitre III. Rappelons ici ces formules :

$$(D6) : \quad K = \frac{\text{card}\left(\bigcup_i \Omega_{\eta_i}\right)}{\sum_i \text{card}(\Omega_{\eta_i})} \quad \text{avec } \Omega_{\eta_i}, \text{ l'ensemble des préconditions de la tâche représentée par le noeud } \eta_i$$

$$(D10) : \quad A = \frac{\text{card}(N)}{L \times F} \quad \text{avec } N, \text{ l'ensemble des noeuds du graphe, } L, \text{ la largeur du graphe et } F, \text{ sa profondeur}$$

$$(D12) : \quad R = \frac{\text{card}\left(\left\{\eta_i \in N / \exists \eta_j \in N, \text{arc}(\eta_j, \eta_i) \in A\right\}\right)}{\text{card}(N)}$$

Nous avons appliqué les critères de spécification sur des tâches dont les plans de réalisation sont différents, afin de tester la sensibilité de ces critères vis-à-vis de la spécification de la tâche. Leurs valeurs en K, A et R ont été comparées entre elles et aux résultats attendus. Dans le cas où les résultats obtenus ne concorderaient pas avec ceux attendus, ou que des particularités non désirées apparaîtraient, une révision des formules des critères devra être effectuée.

IV.2.1.1 Tests sur le critère K

Le critère de connaissance K doit servir à différencier des tâches dont la réalisation nécessite des connaissances en quantité différente. Le test que nous effectuons ici vise donc à vérifier sa capacité et sa sensibilité vis-à-vis de cet objectif.

Par exemple, un environnement est formé d'objets représentés par obj_i (i variant de 1 à 5) sur lesquels les actions a_1 , a_2 et a_3 peuvent être appliquées, telles que :

- l'action a_1 nécessite de connaître l'état des objets obj_1 , obj_2 et obj_3 ,
- l'action a_2 nécessite de connaître l'état des objets obj_1 et obj_3 ,
- l'action a_3 nécessite de connaître l'état des objets obj_2 , obj_4 et obj_5 ,

Comparons deux graphes simples et de forme identique, représentés en figure IV.10. Le graphe G1 nécessite la réalisation des actions a_1 et a_2 . Le graphe G2 nécessite la réalisation des actions a_1 et a_3 . A priori, la réalisation de la tâche représentée par G1 suppose que les états des objets obj_1 , obj_2 et obj_3 soient connus. Celle de la tâche représentée par le graphe G2 suppose la connaissance des états de obj_1 , obj_2 , obj_3 , obj_4 et obj_5 .

Le graphe G1 correspond donc à une tâche nécessitant une quantité de connaissances inférieure à celle requise par la tâche du graphe G2. Il ne reste plus qu'à comparer ce résultat attendu à celui obtenu par le calcul de K, en utilisant la formule donnée au chapitre III (§III.1.1.2.1).

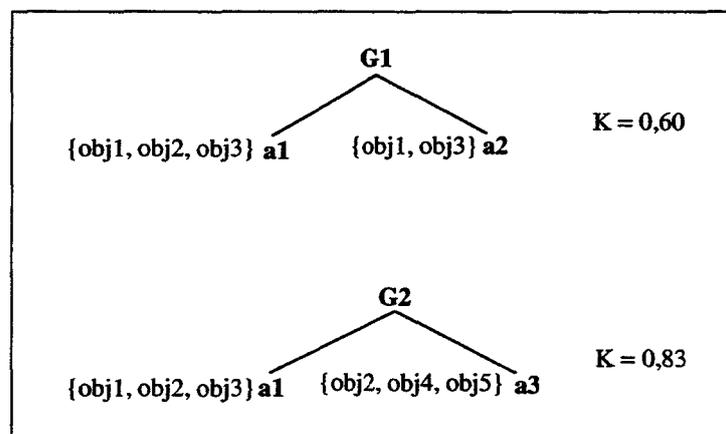


Fig. IV.10 : Exemple de test portant sur le calcul du critère de connaissances.

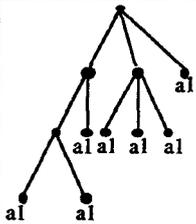
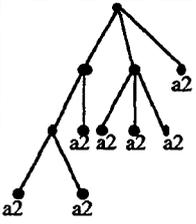
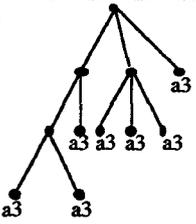
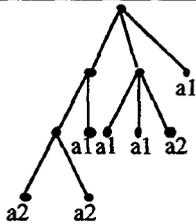
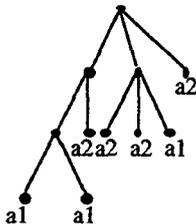
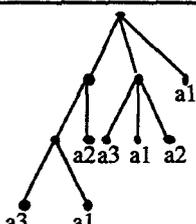
$$\text{Pour G1, } K = \frac{\text{card}(\text{precond}(a_1) \cup \text{precond}(a_2))}{\text{card}(\text{precond}(a_1)) + \text{card}(\text{precond}(a_2))} = \frac{3}{5}$$

$$\text{Pour G2, } K = \frac{\text{card}(\text{precond}(a_1) \cup \text{precond}(a_3))}{\text{card}(\text{precond}(a_1)) + \text{card}(\text{precond}(a_3))} = \frac{5}{6}$$

Les résultats obtenus sont donc respectivement 0,6 pour G1 et 0,83 pour G2. Ils correspondent, dans ce cas précis, à ce qui était attendu.

Afin de mieux explorer l'évolution de K, plusieurs tests de ce type ont été réalisés sur différents graphes "d'école", représentés dans le tableau IV.2. Ce sont des graphes de même forme mais dont les primitives sont des actions différentes.

Tableau IV.2 : Tests sur K. Graphes de forme identique avec des primitives différentes.

graphe n°	graphe	K
1		0,14
2		0,14
3		0,14
4		0,17
5		0,18
6		0,27

avec :

$$\text{precond}(a1) = \{(\text{obj1},e1), (\text{obj2},e2), (\text{obj3},e3)\}$$

$$\text{precond}(a2) = \{(\text{obj1},e1), (\text{obj3},e3)\}$$

$$\text{precond}(a3) = \{(\text{obj2},e2), (\text{obj4},e4), (\text{obj5},e5)\}$$

Les résultats obtenus (figure IV.11) montrent que :

- a) si toutes les primitives du graphe exigent le même ensemble de connaissances pour leur réalisation (ce qui est le cas pour les graphes n°1 à 3), la valeur obtenue pour K est uniquement fonction du nombre de primitives du graphe.
- b) pour une même structure de graphe, plus le nombre d'actions de préconditions différentes est important, plus la valeur de K est grande.

L'observation a) révèle une limitation de la formule (D6) sur laquelle se base le calcul de K. Cette limitation devra éventuellement être prise en compte dans le cas de comparaison de graphes dont le nombre de primitives est identique. Pour des graphes de ce type, la comparaison peut se limiter au nombre de préconditions de l'action primitive qui est répétée dans le graphe.

L'observation b) démontre que le critère K remplit son office puisqu'il permet d'évaluer ce qu'il est destiné à évaluer. La formule de calcul du critère K est donc considérée comme valable et ne sera, par conséquent, plus testée par la suite.

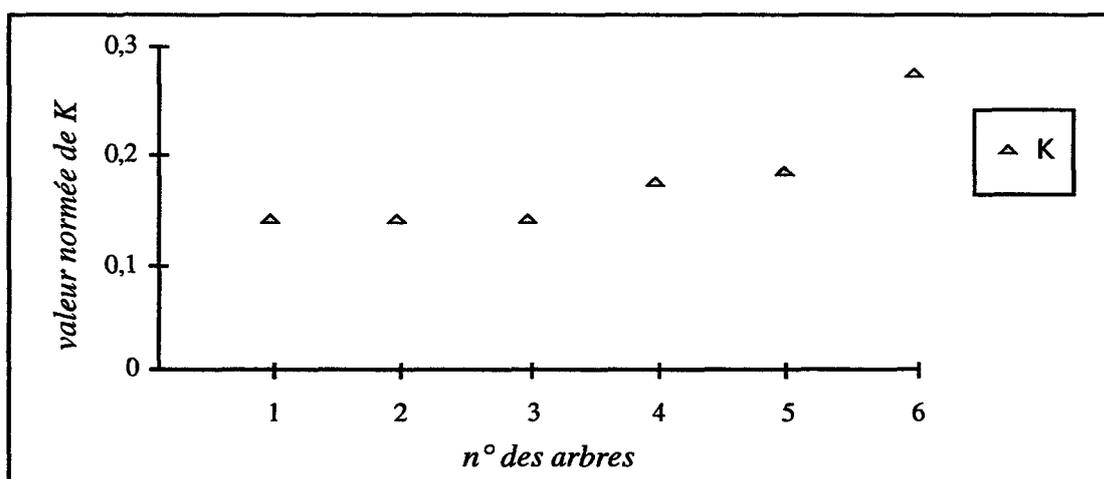


Fig. IV.11 : Résultats des tests sur le critère K.

Les tests sur les deux autres critères, à savoir A et R, sont maintenant présentés.

IV.2.1.2 Première série de tests sur les critères A et R

La première série de tests sur les critères d'action A et de coordination R a porté sur dix graphes au nombre de noeuds croissant et de formes diverses. Ces graphes sont représentés dans le tableau IV.3. L'objectif de cette première évaluation était de repérer des anomalies importantes par rapport à ce qui était attendu intuitivement, à savoir le reflet des structures différentes de graphes. Les résultats obtenus en A et R sont présentés sur la figure IV.12.

A partir des résultats de la première série de tests, il est apparu un cas particulier : celui d'une tâche dont le plan de réalisation est un noeud unique (graphe n°1). Dans ce cas, les valeurs des trois critères doivent être mises à zéro. Cette modification a été apportée aux formules utilisées.

Tableau IV.3 : 1ère série de tests sur A et R. Nombre de noeuds et complexité croissants.

graphe n°	formes des graphes	nombre de noeuds card(N)	profondeur F	A	R
1		1	1	0,00	0,00
2		3	2	0,75	0,33
3		4	2	0,67	0,25
4		6	3	0,67	0,33
5		7	3	0,78	0,29
6		9	5	0,90	0,44
7		11	4	0,55	0,36
8		13	3	0,48	0,31
9		15	6	0,42	0,33
10		15	6	0,42	0,33

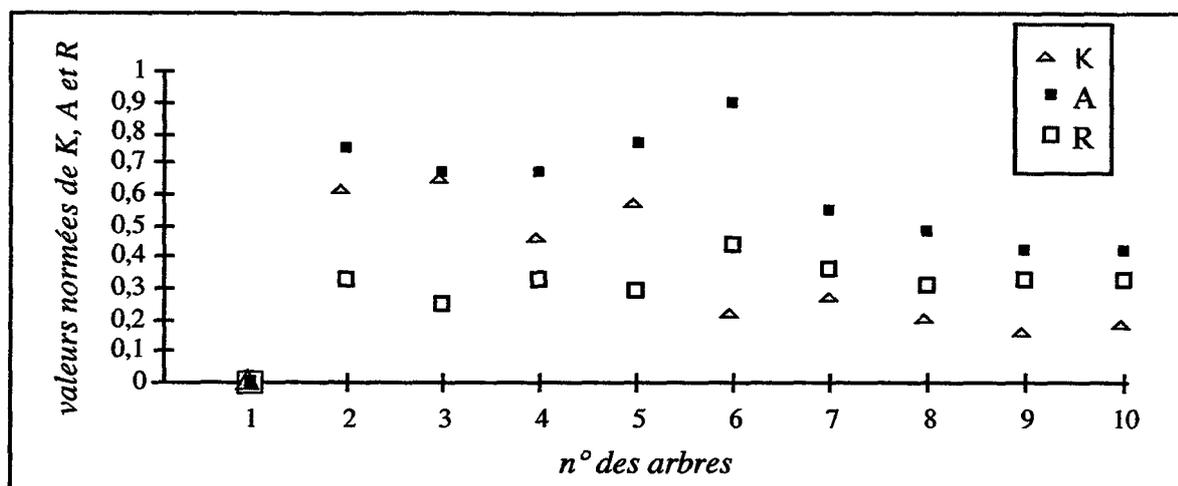


Fig. IV.12 : Résultats de la 1ère série de tests.

Les observations faites sur les résultats de ces premiers tests montrent certaines tendances, notamment :

- a) les valeurs de A et de R varient quasiment dans le même sens,
- b) les valeurs maximales pour A et R sont obtenues pour le graphe 6, qui a une forme particulière allongée (une profondeur importante par rapport à la largeur),
- c) des valeurs minimales sont obtenues pour le graphe 1, déjà analysé ci-dessus. Ce dernier étant mis à part, la valeur minimale de R revient au graphe 3 ne comprenant que deux niveaux, tandis que celle de A est obtenue par les graphes 9 et 10, qui ont la forme particulière “en croix” évoquée au chapitre précédent (§III.1.1.2.2).
- d) excepté pour le graphe 1, les valeurs de A sont comprises entre 0,42 et 0,9 , celles de R entre 0,25 et 0,44.

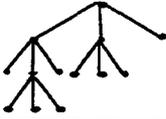
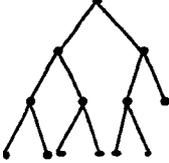
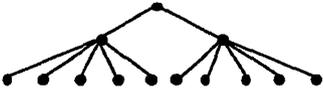
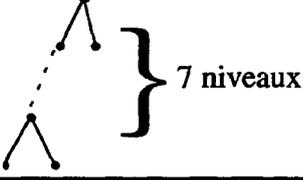
Les observations b) à d) sont supposées imputables aux caractéristiques de taille, de profondeur, de largeur et de répartition équilibrée des noeuds, des graphes évalués. Cette hypothèse se doit d’être vérifiée par une nouvelle batterie de tests sur les critères A et R.

L’observation a) est plus gênante. Une attention particulière va donc être portée sur cet aspect au vu des résultats de la deuxième série de tests.

IV.2.1.3 Deuxième série de tests sur les critères A et R

Nous avons comparé les valeurs en A et R de neuf graphes supplémentaires. Ce sont des arbres comportant un nombre identique de noeuds, à savoir 13 noeuds, mais aux formes variées. Comme pour la première série de tests, ces arbres sont regroupés dans le tableau IV.4. De formes diverses, ils représentent des plans d’actions possédant une envergure plus ou moins importante (évaluée par le critère A) et nécessitant une coordination plus ou moins complexe (évaluée par le critère R).

Tableau IV.4 : 2ème série de tests sur A et R. Nombre de noeuds fixe et formes diverses.

graphe n°	formes des graphes	nombre de noeuds card(N)	profondeur F	A	R
1		13	3	0,53	0,37
2		13	4	0,57	0,37
3		13	4	0,54	0,46
4		13	3	0,43	0,23
5		13	3	0,43	0,15
6		13	7	0,93	0,46
7		13	5	0,43	0,31
8		13	2	0,53	0,08
9		13	3	0,67	0,43

Le graphique de la figure IV.13 illustre les résultats obtenus.

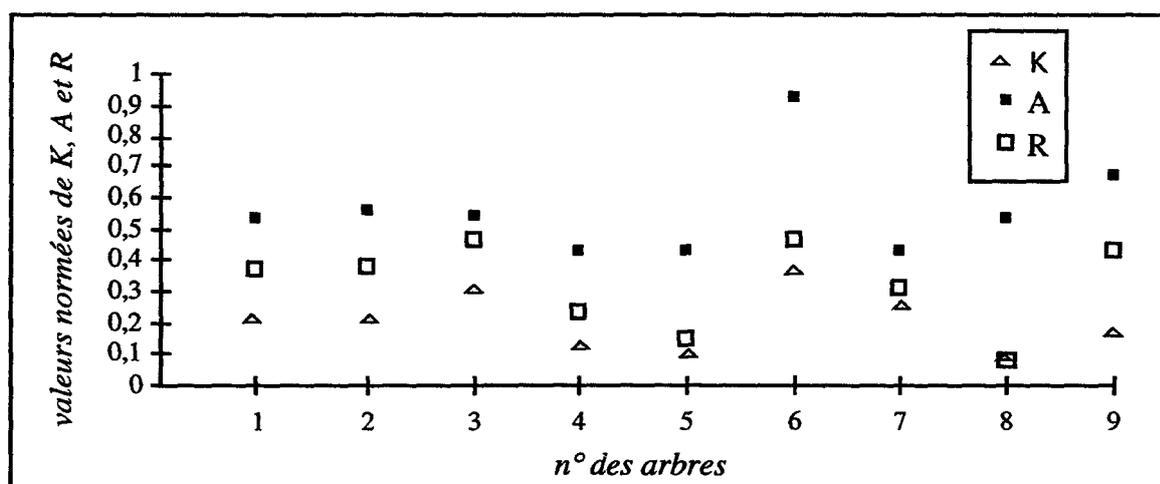


Fig. IV.13 : Résultats obtenus à la deuxième série de tests, sur des arbres à 13 noeuds.

Les observations que nous pouvons faire sur ces résultats sont celles-ci :

- 1) Deux arbres se distinguent nettement des autres : les numéros 6 et 8. En effet, l'arbre 6 a obtenu une valeur maximale en A et le 8, une valeur minimale en R. Or, ce sont les arbres les plus "typés" de cette série de tests : l'arbre 6 est de forme très allongée, tandis que l'arbre 8 possède un second niveau très large.
- 2) L'arbre 6 mis à part, les valeurs en A sont comprises dans une fourchette étroite allant de 0,43 à 0,66.
- 3) L'intervalle de valeurs en R est plus large mais présente également une particularité : celle de posséder une borne maximale inférieure à 0,5 (0,46 exactement). Cette valeur maximale est atteinte pour les arbres 3 et 6.
- 4) Nous avons tenté de classer les arbres selon leur similarité du point de vue du rapport obtenu en divisant les valeurs qu'ils obtiennent en A par celles en R. Cela donne, de façon subjective, les regroupements suivants : (1,2,3,7,9) , (4,5,6) et 8, les arbres de chaque groupe offrant un rapport en A/R similaire.
- 5) A et R ne varient pas conjointement.

Le résultat 1) s'explique aisément par les formes spéciales des arbres impliqués. L'arbre 6 obtient une valeur maximale en A en raison de sa forme "déséquilibrée", comportant une décomposition maximale et donc le nombre maximal de niveaux possibles étant donné le nombre de noeuds mis en jeu. Ce résultat vérifie le cas limite énoncé au chapitre III, pour une valeur de A tendant vers 1. La valeur minimale obtenue en R par l'arbre 8 est également légitime du fait de la centralisation en un noeud unique de l'ensemble des autres noeuds, ce qui implique que la coordination consiste simplement à ordonner les actions à effectuer.

Le point 3) corrobore les résultats obtenus à la première série de tests (observation c)). La raison de cette particularité est à rechercher dans la méthode de planification utilisée, pour laquelle chaque noeud de l'arbre ne représentant pas une tâche primitive possède au moins deux sous-noeuds. Les arbres contenant $\text{card}(N)$ noeuds ont donc au maximum $(\text{card}(N)-1)/2$ noeuds intermédiaires représentant des tâches contraintes. D'où :

$$R \leq \frac{(\text{card}(N)-1)/2}{\text{card}(N)}, \text{ c'est-à-dire } R \leq 0,5 - \frac{1}{2 \text{ card}(N)} < 0,5, \text{ puisque } \text{card}(N) > 0.$$

Afin d'utiliser pour R une même échelle de valeurs que pour K et A, nous avons décidé de doubler ce coefficient. La proportionnalité aux éléments utilisés dans la formule est conservée, tandis qu'un intervalle plus étendu de valeurs pourra être utilisé. R est remplacé par :

$$R' = 2 \frac{\text{nombre de tâches contraintes}}{\text{nombre total de tâches}} \quad (\text{D13}')$$

Notons que nous avons toujours une valeur normée puisque : $0 < R' \leq 1 - \frac{1}{\text{card}(N)} < 1$

Cette formule modifiée sera utilisée dans une nouvelle série de tests, pour évaluer cette fois la sensibilité de R'.

Le point 4) relève les différences entre les arbres appartenant d'une part à la majorité (1,2,3,7,9) et d'autre part à deux groupes distincts, à savoir (4,5,6) et 8. Or, les arbres 1, 2, 3, 7 et 9 ont une forme générale assez équilibrée alors que les autres donnent l'image de distorsions, soit en largeur (4, 5 et 8), soit en profondeur (6).

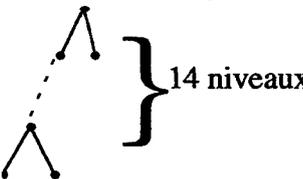
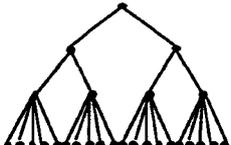
Le point 5) prouve que les variables sont indépendantes. L'observation a) faite à la première série de tests, selon laquelle A et R varient quasiment dans le même sens, n'est donc pas due à une corrélation entre A et R.

L'intervalle de valeurs obtenues pour le critère A est étroit. Il se peut que l'observation faite au point (2) soit significative ou soit due au nombre de noeuds fixé. Pour statuer quant à ce résultat, des tests complémentaires sont nécessaires, lors desquels nous ferons varier le nombre de noeuds des arbres. Ces tests forment une troisième série.

IV.2.1.4 Troisième série de tests sur les critères A et R'

De nouveaux tests ont été effectués avec deux arbres comportant cinq noeuds et trois arbres en comportant vingt-sept. L'étude portait sur la nouvelle formule du critère de coordination et sur l'évolution du critère A en fonction du nombre de noeuds (voir le tableau IV.5).

Tableau IV.5 : 3ème série de tests sur A et R'. Nombre de noeuds étendu et formes diverses.

graphe n ^c	formes des graphes	nombre de noeuds card(N)	profondeur F	A	R'
1		5	2	0,63	0,40
2		5	3	0,83	0,80
3		27	2	0,52	0,08
4		27	14	0,96	0,88
5		27	4	0,34	0,52

Les résultats sont présentés en figure IV.14. Les valeurs du critère de coordination ont été évaluées selon la formule (D13'), elles apparaissent par conséquent sous l'appellation R'.

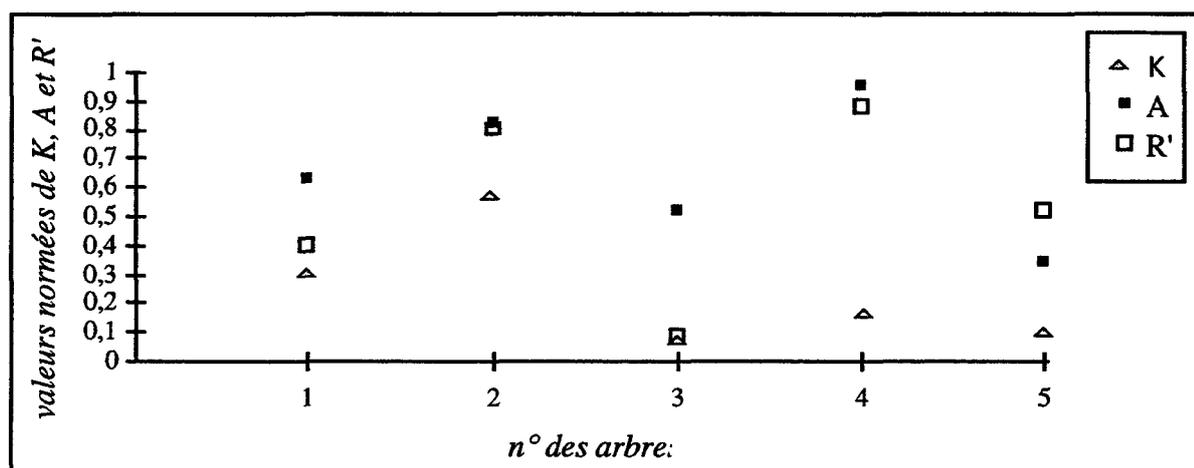


Fig. IV.14 : Résultats de la troisième série de tests.

Le point 2) précédent, selon lequel A variait dans une fourchette étroite, se trouve invalidé par les résultats obtenus pour les arbres à 27 noeuds, dont la valeur en A varie largement, entre 0,34 et 0,96. Par ailleurs, la transformation de la formule de R apparaît judicieuse puisqu'une large gamme de valeurs est désormais utilisée (ici, de 0,08 à 0,88).

Au vu de ces derniers résultats qui invalident les points gênants des tests précédents, les critères K, A et R' sont considérés comme satisfaisants, c'est-à-dire comme conformes à ce qu'ils sont destinés à représenter : les exigences de la tâche en termes de connaissances, d'action et de coordination, respectivement. Ils permettent donc de spécifier la tâche et à partir de cette spécification, les agents doivent adapter leur organisation aux exigences de la situation présente. Le prochain paragraphe détaille la manière dont cette adaptation est réalisée, dans la pratique.

IV.2.2 Adaptation de l'organisation

Chaque agent possède une base de connaissances "sociales", grâce auxquelles il adopte le comportement adapté à la situation présente. Les types d'organisations possibles sont ceux présentés au chapitre précédent (Hiérarchie, Communauté, Marché, Société). Les types de rôles retenus (coordinateur, expert, exécutant) proviennent aussi de ce chapitre et sont liés aux composants de chaque type de structure organisationnelle (§III.2.1.2).

Les paragraphes suivants exposent, tout d'abord, la mise en place de la nouvelle organisation, selon la méthode itérative préconisée au chapitre précédent : la nouvelle structure est propagée au moyen du réseau actuel qui est progressivement transformé. L'influence de la nouvelle organisation sur le comportement des agents est ensuite expliquée.

IV.2.2.1 Adaptation de l'organisation

La phase d'adaptation de l'organisation du S.M.A. est constituée de deux étapes de propagation d'informations : lors de la première étape, l'information propagée concerne le type d'organisation sélectionné ; lors de la seconde étape, l'information propagée concerne les rôles des agents.

Durant la première étape de la phase d'organisation, la connaissance du type d'organisation choisi est diffusée par l'agent qui a effectué ce choix d'après ses calculs, des critères K, A et R'. Cet agent annonce à tous les membres du système quel est le nouveau modèle d'organisation adopté. Rappelons que le module de communication autorise cette diffusion générale, sans que l'agent émetteur connaisse pour autant chacun de ses congénères (cf. §IV.1.3.1.2). Chaque agent récepteur d'un message de ce type met à jour ses connaissances sociales concernant l'organisation, à savoir le modèle présent d'organisation et la date de réception de cette information³.

Lors de la seconde étape d'organisation, des rôles sont distribués aux agents. Après avoir répandu l'information portant sur le modèle d'organisation choisi, l'agent déclencheur du processus de réorganisation prend en charge la tâche principale du plan commun. Il prend de ce fait, dans tous les types d'organisations excepté le type "communauté", un rôle de coordination. Il

³Au sens informatique du terme "date", correspondant à un temps donné en heures, minutes, secondes.

envoi ensuite, à chacune de ses accointances un message de type “comportement” par lequel il annonce le rôle qu’il a pris dans l’organisation. Les agents récepteurs d’un tel message mettent à jour leurs connaissances concernant le rôle de l’agent expéditeur, puis prennent à leur tour un rôle par rapport à leurs propres accointances, selon le modèle présent d’organisation.

Prenons l’exemple d’une hiérarchie, dans laquelle l’agent R1 déclenche la réorganisation, suite à la réception d’un nouvel événement en provenance de l’environnement, ou suite à la modification du nombre d’agents dans le système. R1 diffuse son rôle de coordinateur aux agents R2, R3 et R4, ainsi que leurs tâches respectives, sous-tâches de la tâche globale. L’agent R2 sait dès lors que R1 est son coordinateur et connaît ses objectifs. S’il ne peut réaliser seul ses objectifs, il diffuse aux agents R5 et R6, ses propres accointances, son rôle qui est “coordinateur” également et des sous-tâches de ses objectifs. R5 et R6 deviennent, de son point de vue, des exécutants, comme lui est un exécutant du point de vue de R1. Les tâches sont ainsi distribuées aux agents, via les liens de communication. Il est à noter que la notion de rôle se révèle ambivalente d’un point de vue externe (au niveau Système), bien qu’univoque du point de vue de l’agent (au niveau Agent).

La date de réception du message annonçant la mise en place d’une nouvelle organisation trouve ici toute son utilité. Il est possible d’imaginer, en effet, que l’agent R5 de l’exemple ci-dessus, fasse à la fois partie des accointances de l’agent R1 et de celles de R2. Dans une hiérarchie, l’agent R5 dépendrait alors du dernier agent à lui avoir donné un rôle. Un risque d’incertitude sur les objectifs de l’agent R5 apparaît dans ce cas. C’est pourquoi, un agent ne prend effectivement le rôle qui lui est assigné, qu’à condition de n’avoir pas encore pris de rôle depuis la date de début de la phase d’organisation.

IV.2.2.2 Comportement des agents

Durant la phase d’adaptation de l’organisation, chaque agent a mémorisé le type actuel d’organisation structurant les interactions à venir. Il a également adopté un rôle précis dans l’organisation. Selon le modèle d’organisation adopté et selon son rôle à l’instant présent et dans cette organisation, un agent réagit différemment aux messages qu’il reçoit des autres membres du système. Selon la nature du message, le traitement conséquent diffère :

- Un **ordre** est suivi d’une procédure qui évalue la légitimité de cet ordre étant donnée la structure organisationnelle actuelle.
- Une **information** fait l’objet d’un processus de vérification de cohérence avant d’être insérée dans la base de connaissances correspondante.
- Une **requête** donne lieu à une recherche d’information dans une des bases de connaissances et à une réponse à l’agent demandeur.
- Une **réponse** est à rapprocher de la requête correspondante.

- Un message d'**organisation** informe l'agent récepteur qu'une restructuration est en cours et lui donne le type d'organisation choisi.
- Un message portant sur le **comportement** a pour conséquence le changement éventuel du rôle de l'agent receveur.

Les paragraphes suivants détaillent les conséquences liées à l'envoi de l'un de ces messages sur le comportement de l'agent destinataire. Ils sont classés par type de message.

IV.2.2.2.1 ORDRE

L'influence de la structure organisationnelle courante se ressent plus spécialement dans le comportement adopté par un agent suite à la réception d'un ordre provenant d'un autre agent.

Supposons qu'un agent (A) reçoive l'ordre d'un autre agent (B) d'effectuer une action. A peut réagir d'une des manières suivantes :

- *le refus*. L'agent ne prend pas en compte le message reçu et répond simplement par la négative.
- *l'acceptation*. L'agent accepte d'exécuter l'ordre, sans condition. Il l'ajoute simplement à ses objectifs et répond par l'affirmative.
- *l'acceptation avec répercussion de l'ordre*. L'agent accepte l'ordre mais ne peut l'effectuer lui-même, soit parce qu'il en est incapable, soit parce qu'il a déjà un nombre important d'actions à effectuer. Il répercute alors l'ordre vers une ou plusieurs de ses accointances, susceptibles de l'exécuter.
- *la négociation*. A informe B de sa capacité (ou incapacité) à exécuter l'ordre demandé. Cela permet à l'agent B de décider de la suite du dialogue. Une des conséquences possibles est le passage d'un contrat entre les deux agents, pour la réalisation des actions demandées.

Enfin, à ces comportements, s'ajoute celui adopté dans le cas où B est inconnu de A, c'est-à-dire qu'il ne fait pas partie de ses accointances. Dans ce cas, l'agent A peut :

- soit ignorer le message,
- soit prendre en compte ce message et insérer l'identité de l'expéditeur (B) dans sa base de connaissances sociales.

L'adoption de l'un ou l'autre des six comportements recensés dépend de divers paramètres. En premier lieu, il dépend du type d'organisation présent au moment de la réception de l'ordre par l'agent A. Il dépend ensuite des rôles respectifs de A et de B. Il dépend aussi de la capacité de A à exécuter l'action demandée. Enfin, il dépend des liens qui ont pu être établis précédemment entre ces deux agents. En particulier, la connaissance de l'identité de l'agent expéditeur par l'agent receveur et l'existence d'un contrat entre les deux parties.

Quatre paramètres ont ainsi été retenus. Ils déterminent le comportement d'un agent à la réception d'un ordre en provenance d'un autre agent. Les tableaux IV.6 à IV.9 énoncent de manière explicite le comportement associé à chaque type de situation, une situation étant définie par l'ensemble particulier de valeurs des paramètres :

- le type d'organisation,
- les rôles des intervenants : le rôle de A et celui de B par rapport à A,
- la capacité de A à réaliser l'action demandée,
- la connaissance de B par A.

Les comportements adoptés à la réception des messages d'autre nature que l'ordre, sont nettement moins différenciés.

Dans les tableaux suivants (IV.6 à IV.9), la lettre X dénote une valeur indifférenciée.

Tableau IV.6 : L'organisation est une hiérarchie

type d'organisation	B est-il connu de A ?	rôle de A	rôle de B pour A	A est-il capable d'exécuter l'action demandée ?	comportement de A
Hiérarchie	oui	exécutant	exécutant	X	refus
			coordonateur	oui	acceptation
		coordonateur	non	acceptation + recherche d'un agent exécutant/A capable	
	coordonateur	X	X	refus	
	non	X	X	X	refus

Tableau IV.7 : L'organisation est une communauté

type d'organisation	B est-il connu de A ?	rôle de A	rôle de B pour A	A est-il capable d'exécuter l'action demandée ?	comportement de A
Communauté	oui	expert	expert	oui	acceptation
				non	refus + envoi info. incapable
	non	expert	expert	oui	acceptation + B devient accointance de A
				non	refus + B devient accointance de A

Tableau IV.8 : L'organisation est un marché

type d'organisation	B est-il connu de A ?	rôle de A	rôle de B pour A	A est-il capable d'exécuter l'action demandée ?	comportement de A
Marché	oui	exécutant	exécutant	X	refus
			coordinateur	oui	accepte si contrat avec B
				non	refus + envoi info. incapable à B
		expert	X	refus	
		coordinateur	X	X	refus
			expert	exécutant	X
		coordinateur		oui	si pas d'objectif alors envoi acceptation pour contrat
				non	refus + envoi message incapable
		expert	X	refus	
		non	exécutant	X	X
	coordinateur			X	refus
	expert			X	oui
	non		refus + envoi message incapable		

Tableau IV.9 : L'organisation est une société

type d'organisation	B est-il connu de A ?	rôle de A	rôle de B pour A	A est-il capable d'exécuter l'action demandée ?	comportement de A
Société	oui	exécutant	exécutant	X	refus
			coordinateur	oui	acceptation
				non	acceptation + recherche d'un agent exécutant/A capable
			expert	X	refus
		coordinateur	exécutant	X	refus
			coordinateur	X	refus
			expert	oui	envoi info. capable
				non	envoi info. incapable
		expert	exécutant	oui	si pas d'objectif, acceptation
				non	refus
			coordinateur	oui	envoi info. capable
				non	envoi info. incapable
	expert		oui	envoi info. capable	
			non	envoi info. incapable	
	non	exécutant	X	oui	acceptation + B devient accointance de A
				non	acceptation + recherche d'un agent exécutant/A capable + B devient accointance de A
		coordinateur	X	oui	envoi info. capable + B devient accointance de A
				non	envoi info. incapable + B devient accointance de A
		expert	X	oui	envoi info. capable + B devient accointance de A
				non	envoi info. incapable + B devient accointance de A

IV.2.2.2.2 INFORMATION

La réception d'un message de nature informative est suivi d'un traitement par l'agent destiné à déterminer l'opportunité d'insérer cette information dans une de ses bases de connaissances. En effet, lorsque des problèmes de cohérence se posent parce que la nouvelle information contredit les connaissances présentes de l'agent, celui-ci doit décider quelle est la connaissance prioritaire : celle qu'il détient ou celle reçue. Les rôles respectifs de A et B servent dans ce cas de critère pour déterminer l'attitude à prendre.

Si B est coordonnateur ou expert et A exécutant, A accepte l'information reçue telle quelle. Cela implique que la nouvelle information supplante toute information antérieure et antagoniste. Dans tous les autres cas, A vérifie qu'il ne détient aucune information contradictoire. Si cela se vérifie, il accepte et insère cette nouvelle information dans la base de connaissances correspondante. Sinon, il ignore le message reçu. Il est bien entendu possible de complexifier ce comportement visant à maintenir la cohérence dans les bases de connaissances des agents. Des études existent à ce sujet (voir, par exemple, la synthèse effectuée par Ayel et Rousset [90]).

IV.2.2.2.3 REQUÊTE

La réception d'une requête déclenche l'envoi de l'information correspondante à l'agent qui en a fait la demande. Cette information peut contenir simplement le fait que l'agent ne possède pas la connaissance requise.

IV.2.2.2.4 RÉPONSE

Par réponse, nous entendons une information du type "oui" ou "non". La prise en compte de la réception d'une réponse nécessite de mettre en rapport celle-ci avec la requête (ou l'ordre) correspondant.

IV.2.2.2.5 ORGANISATION

L'utilisation des messages de ce type a été expliquée précédemment (§IV.2.2.1) : la réception d'un message d'organisation est suivie de la mise à jour par l'agent receveur de sa connaissance du type d'organisation actuel du système. Cette connaissance lui sera indispensable pour répondre de façon adéquate aux futurs messages.

IV.2.2.2.6 COMPORTEMENT

La réception d'un message de comportement déclenche chez l'agent :

- la mise à jour de son rôle dans la structure,
- la mise à jour de sa connaissance du rôle de l'agent expéditeur,

- la propagation de messages de comportement vers ses propres accointances.

Un tel message est toujours précédé à plus ou moins long terme, par un message de type “organisation”.

Les divers comportements susceptibles d’être adoptés par un agent à la réception d’un message ont été exposés. Le paragraphe suivant relate les raisons pour lesquelles nous considérons que le déclenchement systématique d’un comportement ou d’un autre au sein d’un agent relève d’une conception réactive.

IV.2.2.3 Comportement organisationnel réactif d’un agent cognitif

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que chaque agent est capable de choisir l’organisation à adopter. Tout agent est capable, à partir de la connaissance du plan global de réalisation, de calculer les critères K , A et R' , et par conséquent, de déterminer le type d’organisation correspondant à la situation présente. Ce processus de décision est “automatique” : à la fin d’une phase de planification correspondant à l’arrivée d’une nouvelle tâche globale, le nouveau type d’organisation est calculé directement. Il s’agit donc d’une forme de réactivité du S.M.A. relativement à son contexte.

Cependant, ces aspects réactifs n’empiètent aucunement sur la conception globale de l’agent. Ceux-ci peuvent en effet aisément cohabiter avec des éléments cognitifs au sein de ce même agent, tels que des modules de gestion des états mentaux (croyances, intentions, etc.). Par exemple, la compréhension de la signification d’un message informatif relève assurément d’un comportement de type cognitif. Selon cette approche, un agent peut contenir sans difficulté des éléments cognitifs, plus particulièrement liés au raisonnement à long terme, et des éléments réactifs, utilisés dans la gestion de son comportement par rapport aux autres agents du système, à plus court terme.

IV.2.3 Illustration par la simulation de l’activité d’une équipe de robots

Afin d’illustrer l’usage de la méthodologie d’organisation proposée, le déroulement d’une session d’organisation, telle qu’elle existe dans SYGMA, est maintenant décrite.

Supposons que l’équipe comporte six robots (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 et R_6) et que dans la structure actuelle, R_3 a pour accointances R_1 et R_4 , R_1 connaît R_2 et R_5 , R_6 connaît R_1 . La tâche courante (T_1), reçue par l’agent R_3 , consiste à déterminer la composition de surface et profonde du sol de la planète à la position géographique $P(10^\circ N, 25^\circ E)$. Dans ce but, les robots décident d’adopter le plan représenté en figure IV.15.

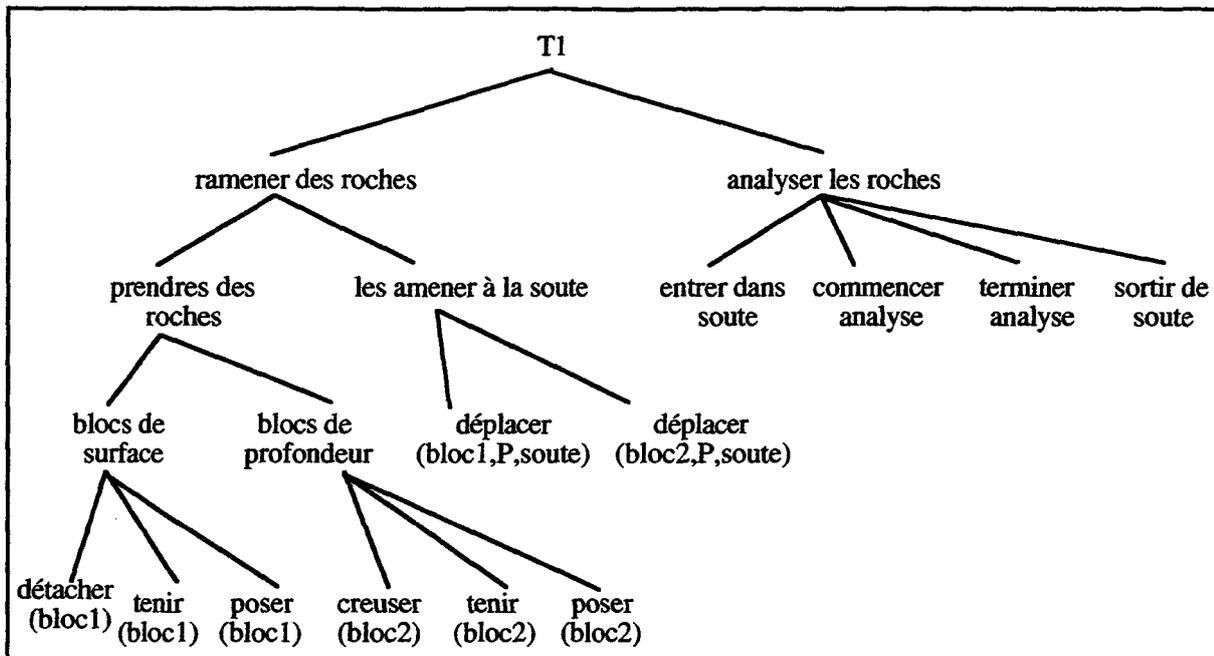


Fig. IV.15 : Plan de réalisation de la tâche T1.

Le calcul des critères pour ce plan donne : $(K, A, R') = (0,38 ; 0,7 ; 0,82)$. Selon la normalisation adoptée, ceux-ci sont simplifiés en $(0,1,1)$. Ce dernier résultat correspond au choix d'une organisation basée sur le modèle de société.

Suivons la propagation de la nouvelle forme d'organisation dans l'équipe :

- R3, l'agent déclencheur, envoie à ses deux accointances R1 et R4, un message de nature *organisation*, de contenu *société*.
- R1 et R4 reçoivent le message de R3 leur annonçant un changement d'organisation. Ils mettent à jour leur base de connaissances sociales (le type d'organisation est mis égal à *société* et la date *t* de réception du message est enregistrée).
- R3 annonce à R1 et à R4 son nouveau rôle de *coordinateur* par un message de nature *comportement*.
- A la réception de ce nouveau message de R3, R1 met à jour ses connaissances sociales (agent *R3=coordinateur*) et R1 envoie son propre rôle de *coordinateur* à R2 et R5.
- De même, R4 met à jour ses connaissances sociales (agent *R3=coordinateur*).
- R6, non contacté sinon par le message diffusant l'annonce d'une restructuration, devient par défaut un *expert*. Il envoie à R1, sa seule accointance, un message annonçant son identité et son rôle.

La nouvelle organisation est donc la suivante : R3 est coordinateur de R1 et R4 ; R1 coordonne les actions de R2 et R5 ; R6 est expert. Les attributions de tâches peuvent donc commencer :

- R3 prend en charge la coordination des sous-tâches *ramener des roches* et *analyser les roches*.
- R3 demande à R1 de prendre en charge la sous-tâche *prendre des roches* : il envoie un message à R1, de nature *ordre* et de contenu *prendre des roches*. R1 reçoit cet ordre, il connaît son expéditeur (R3), il est un exécutant par rapport à cet expéditeur et il est capable d'exécuter cet ordre. R1 accepte donc l'ordre de R3.
- R1 envoie un ordre de contenu *détacher un bloc* à R6. R6 reçoit cet ordre ; il ne connaît pas son expéditeur et n'est pas capable de réaliser l'action demandée. Il commence par mettre à jour sa base de connaissances sociales en ajoutant R1 à la liste de ses accointances. Puis, il envoie un message à R1 de nature *information* et de contenu (*incapable, détacher un bloc*).
- etc.

Les tâches sont ainsi attribuées aux agents de l'équipe. Leur réalisation suit donc naturellement jusqu'à l'achèvement de la tâche T1.

Supposons que suite aux résultats de l'analyse des échantillons prélevés par les agents, une nouvelle demande de tâche émane de la Terre : installer un dispositif de mesure à cent mètres dans chaque direction. La tâche T2 est planifiée de la manière représentée en figure IV.16, où seule la sous-tâche "installer un dispositif au Nord" est détaillée, les trois autres (pour le Sud, l'Est et l'Ouest) étant identiques.

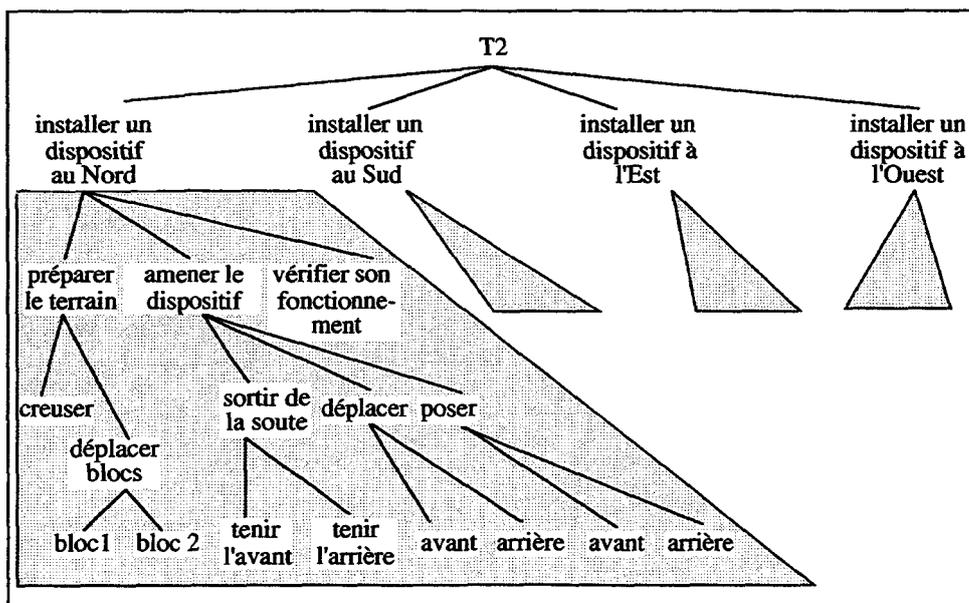


Fig. IV.16 : Plan de réalisation de la tâche T2.

Pour cette nouvelle tâche, les valeurs obtenues pour les critères donnent $(K, A, R') = (0,0,1)$, ce qui correspond à une hiérarchie. La structure actuelle étant celle d'une société, l'adaptation organisationnelle doit être réalisée pour obtenir une structure hiérarchique. La propagation de la structure est donc déclenchée, comme précédemment, jusqu'à ce que tous les agents aient pris un rôle. Le déroulement des actions suit alors son cours comme cela est décrit pour la société ci-dessus, selon les comportements définis dans les tableaux IV.6 à IV.9.

La description du déroulement de l'adaptation organisationnelle sur cet exemple montre son applicabilité et fait apparaître l'importance des communications échangées par les agents. La communication par messages autorise une grande souplesse dans la définition du protocole utilisé et dans les informations susceptibles d'être transmises. Cependant, elle a une influence sur la performance du système en raison de la quantité de messages nécessaires aux accords préalables à l'action, ces accords comprenant les échanges effectués lors de la mise en place de la structure organisationnelle adoptée.

Lors de la seconde partie de ce chapitre, la mise en oeuvre de l'adaptation organisationnelle a été présentée. Son implémentation a permis de révéler que certains éléments de la méthodologie sont applicables directement, tandis que d'autres doivent être améliorés. La conclusion effectue un bilan de ces différents aspects.

Conclusion

Le développement du système SYGMA, dans le but de confronter la théorie avancée à la réalité, a à la fois révélé son applicabilité et mis en évidence les points qui nécessitent une réflexion complémentaire.

La description d'un univers multi-agents en trois niveaux apparaît applicable en conception de S.M.A. . Le principe de description d'un élément selon, tout d'abord une approche privilégiant le comportement observable, avant de spécifier son architecture interne, structure de façon adéquate la conception de tels systèmes. L'utilisation du langage Ada nous a facilité la tâche pour ce point spécifique.

La définition des valeurs mesurant les exigences de la tâche en termes de connaissances, d'actions et de coordination a subi une légère modification — le critère R a été transformé en R' — en raison d'une caractéristique particulière des graphes obtenus due à la méthode de planification utilisée. Elle s'est cependant avérée globalement valable, au vu des différents tests effectués.

La mise en oeuvre de l'adaptation de l'organisation nous a permis de préciser de nombreux détails indispensables au bon fonctionnement du système. Ainsi, le comportement d'un agent a été spécifié quelle que soit la situation courante ; le protocole de communication, d'une grande importance, a également fait l'objet d'explications approfondies. Ces différents points ont été illustrés par un exemple classique en I.A.D.

Enfin, la validation complète de la méthodologie nécessiterait de pouvoir évaluer la pertinence du choix du type d'organisation, principalement par des mesures de performance (mesure de durées de réalisation de tâche, par exemple). Or, cet aspect ne pouvait être évalué avec SYGMA, qui est une simple maquette de laboratoire. Cela supposerait la réalisation d'un système distribué physiquement, dans lequel les agents sont réellement concurrents et agissent véritablement en parallèle et en temps réel sur leur environnement.

La création d'un S.M.A. temps réel utilisant les méthodes mises en oeuvre dans SYGMA est donc envisagée, avec d'autres perspectives, dans le chapitre suivant. L'application du principe d'adaptation organisationnelle à des univers multi-agents variés sera également évoquée.

Chapitre V

Perspectives

Introduction

L'étude faisant l'objet de ce mémoire s'intéresse à un point particulier des systèmes multi-agents : leur organisation. Il faut désormais songer à intégrer dans un même système la méthodologie d'organisation proposée et les résultats de travaux portant sur d'autres aspects spécifiques de tels systèmes, comme l'architecture interne d'un agent ou la planification partagée.

Par ailleurs, la présentation, au chapitre précédent, de l'implémentation d'un système multi-agents capable d'adaptation organisationnelle montre que la méthodologie proposée est utilisable dans la pratique. Toutefois, son application sur des cas plus réels que les exemples de laboratoire implique nécessairement l'intégration d'outils temps réel.

Des perspectives d'évolution et d'application de l'organisation adaptative des systèmes multi-agents sont donc envisageables. Elles forment les deux parties de ce chapitre :

- Des perspectives d'évolution sont tout d'abord proposées afin de compléter le système et de pallier les imperfections mises en évidence lors du développement de SYGMA.
- La seconde partie exhibe des situations dans lesquelles il est opportun d'appliquer le formalisme développé et la méthodologie d'adaptation organisationnelle, ainsi que la manière de les réaliser. En particulier, des perspectives d'application d'outils d'adaptation organisationnelle pour contribuer à la résolution de problèmes existant dans d'autres domaines de recherche, à savoir les interactions hommes-machines et la sociologie des organisations, sont mises en évidence.

V.1 Perspectives d'évolution de la méthode proposée

Parmi les restrictions théoriques et pratiques de la méthodologie d'adaptation organisationnelle, il est possible de remédier à certaines de manière simple et évidente, tandis que d'autres nécessitent l'intégration de travaux pointus sur certains aspects des systèmes multi-agents.

Les améliorations réalisables directement, ou du moins à court terme, sont tout d'abord exposées. Ensuite l'intégration des travaux sur l'architecture interne des agents est abordée, suivie de celle des travaux portant sur les S.M.A. temps réel.

V.1.1 Améliorations directes

L'implémentation des différents éléments de la méthode d'organisation a révélé certaines restrictions de celle-ci. La plus évidente est la limitation du nombre de possibilités d'organisation offertes. En effet, deux tâches a priori radicalement différentes peuvent donner lieu au choix d'un modèle identique d'organisation. Cette limitation est due à la fois au nombre réduit de modèles utilisés et au choix relativement "grossier" d'un de ces modèles.

Les deux premiers paragraphes suivants étudient les conséquences de modifications envisagées dans le but d'affiner le choix de l'organisation. Le troisième paragraphe évoque les améliorations qu'il est possible d'apporter à la méthode de propagation de l'organisation parmi les agents.

V.1.1.1 Introduction de nouveaux modèles d'organisation

Les modèles d'organisations choisis et implémentés sont au nombre de quatre. C'est peu relativement aux huit situations différenciées par les critères K, A et R'.

Les quatre modèles d'organisations utilisés proviennent de la classification des organisations multi-agents effectuée par Gasser (voir §I.3.2, dans le premier chapitre de ce mémoire). Nous avons vu au chapitre II qu'il existe d'autres classifications, dont certaines distinguent un nombre supérieur de catégories d'organisations. Fox, par exemple, propose six classes différentes dépendant de la répartition de la prise de décision dans le groupe (il distingue, en particulier, trois formes de hiérarchie). L'instauration de six modèles d'organisation, au lieu des quatre actuels, entraînerait l'implémentation de deux types de comportements supplémentaires au sein de chaque agent. Cela permettrait de différencier des attitudes différentes correspondant à des hiérarchies plus ou moins complexes.

L'adjonction de nouveaux modèles d'organisations à ceux existants est réalisable. Cependant, il faut dans ce cas être capable de déterminer ce qui distingue ces nouvelles formes d'organisation des formes actuelles, ce qui entraîne soit l'affinage des critères actuels, soit l'instauration de

critères supplémentaires. Les critères actuels proviennent de la bibliographie étudiée et présentée au chapitre II, dans laquelle nous avons retenu un ensemble de particularités sur lesquelles s'accordent les auteurs de recherches sur les organisations. Une perspective de notre recherche est donc de rassembler une collection plus importante d'études portant sur les particularités de formes d'organisation supplémentaires, afin de les intégrer dans la bibliothèque de modèles.

Il est également possible d'essayer d'affiner les critères actuellement retenus, comme le montre le paragraphe qui suit.

V.1.1.2 Pondération des critères

Une amélioration de la méthodologie proposée consisterait à pondérer les valeurs des critères de sélection d'une organisation.

En effet, ces critères ont été dégagés à partir d'un ensemble de conclusions concernant les organisations. Or, parmi ces conclusions, certaines émergent plus radicalement que d'autres. Par exemple, l'influence des besoins de type "coordination", pour la réalisation de la tâche, sur le mode d'organisation à adopter est une conclusion énoncée par la quasi-totalité des auteurs. Le critère R apparaît donc plus important que les deux autres. De manière similaire, l'importance des connaissances requises devance celle de la taille de la tâche. Le classement relatif obtenu place donc le critère R' en premier, suivi de K, puis de A.

Ce classement peut se concrétiser par la détermination de poids (α_i) associés aux différents critères, de façon à tenir compte de leur importance relative :

$$\begin{pmatrix} R' \\ K \\ A \end{pmatrix}_{\text{pondéré}} = \begin{pmatrix} \alpha_r R' \\ \alpha_k K \\ \alpha_a A \end{pmatrix} \quad \text{avec } \alpha_r > \alpha_k > \alpha_a \geq 1$$

Ensuite, pour comparer différentes tâches, il est possible de normer à nouveau les valeurs des trois critères :

$$\begin{pmatrix} R' \\ K \\ A \end{pmatrix}_{\text{pondéré et normé}} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_r R'}{\alpha_r + \alpha_k + \alpha_a} \\ \frac{\alpha_k K}{\alpha_r + \alpha_k + \alpha_a} \\ \frac{\alpha_a A}{\alpha_r + \alpha_k + \alpha_a} \end{pmatrix}$$

La mise en oeuvre de cette modification permettrait d'affiner la sélection d'un modèle d'organisation, cependant le problème de la détermination de la valeur des poids α_i reste posé. Il me semble que ces valeurs pourraient être progressivement établies en effectuant des essais successifs sur des exemples.

V.1.1.3 Amélioration de la méthode de propagation

La méthode de propagation comporte une faiblesse qu'il est possible d'éviter. Actuellement, elle est relativement "fragile" car elle dépend du premier agent déclencheur du processus d'organisation. L'isolement plus ou moins important de cet agent peut compromettre toute la structuration du système.

L'amélioration que nous proposons consiste à créer un "comité" de déclenchement du processus d'adaptation de l'organisation. Il s'agit d'un petit groupe d'agents, pris si possible parmi ceux ayant un rôle de coordination dans l'organisation actuelle. Ces agents vont se mettre d'accord sur l'organisation à adopter et planifier le début de la propagation en ayant le souci de répartir au mieux leurs contacts avec le reste du groupe. Par exemple, ils peuvent s'accorder de façon à contacter des ensembles distincts d'acointances. Supposons que l'agent R1 ait pour acointances les agents R3 et R4, que R2 connaisse R3, R4 et R5, tandis que R3 connaît R5 et R6. Le "comité" constitué des agents R1, R2 et R3, a la possibilité, de manière à améliorer l'efficacité de la propagation, de décider que R1 contacte R4, R2 contacte R5 et R3 contacte R6. Ainsi, chacun des agents n'appartenant pas au comité de déclenchement est contacté par un et un seul agent de ce comité.

Par cette modification de la méthode de mise en place de la nouvelle structure, la propagation dans tout le système est mieux assurée. Elle paraît aussi plus rapide, toutefois le temps gagné lors de la propagation de l'organisation est compensé par le temps non négligeable pris lors des accords préalables parmi les agents du comité déclencheur.

V.1.2 Intégration de travaux sur l'architecture interne d'un agent

Les détails concernant l'architecture interne d'un agent ont été peu étudiés dans ce mémoire, exceptés ceux relatifs aux comportements des agents selon l'organisation courante. L'intégration d'autres travaux de ce domaine permettraient de complexifier le raisonnement des agents.

V.1.2.1 Planification partagée

Les limites posées dès le début du travail relaté dans ce mémoire supposent un accord préalable par les agents sur un plan commun de réalisation de tâche. Or, ce dernier aspect des relations entre agents est à la fois important et complexe. Il nécessite soit l'usage d'un protocole de communication de haut niveau, soit des capacités de raisonnement sur autrui de la part des agents.

L'usage d'un protocole de communication de haut niveau permet aux agents d'échanger des plans partiels et donc d'élaborer conjointement le plan global [Kirn 92]. Le raisonnement sur autrui s'appuie sur une logique des croyances et, plus généralement, des états mentaux, qui autorise un agent à déterminer les résultats attendus du raisonnement effectué par un autre agent (voir, par exemple, [Mandiau 93]). Par l'une ou l'autre de ces méthodes, les agents du groupe finissent par se mettre d'accord sur un plan en commun, dont la connaissance est partagée par tous.

L'intégration des dernières innovations dans ce domaine semble nécessaire dès lors que l'on souhaite développer un système performant. L'évolution des systèmes multi-agents est, en ce sens, également tributaire des améliorations apportées à la méthode de planification.

V.1.2.2 Niveaux de comportement

Dans la conclusion du premier chapitre de ce mémoire, les limites de notre objectif ont été définies. En particulier, nous avons pris l'hypothèse d'agents cognitifs. Or, des travaux récents montrent la faisabilité des architectures d'agents intégrant des caractéristiques à la fois réactives et cognitives.

Par exemple, Hayes-Roth [93] conçoit des agents capables de trois types de réactions — périphériques, réflexes, cognitives. Le type de réaction adopté dépend de la tâche locale à réaliser et des connaissances de l'agent. Le cycle perception-cognition-action est, dans ces travaux, utilisé au sein de chaque agent, pour la réalisation des tâches locales.

D'autres chercheurs (voir par exemple [Chaïb-Draa 94]) proposent également une architecture incluant composants réactifs et cognitifs. Inspirée de travaux portant sur l'analyse du comportement humain, l'architecture proposée est, par conséquent, un peu plus complexe. En particulier, la phase de "cognition" du cycle perception-cognition-action se trouve plus détaillée. Ce modèle d'agent intègre des éléments à la fois réactifs, de planification et de prise de décision. Le comportement d'un agent basé sur ce modèle varie selon la situation de son environnement : en situation de "routine", seul le niveau réflexe est déclenché ; une situation familière est traitée au niveau planification ; dans une situation non familière, l'agent fait appel au niveau prise de décision (figure V.1).

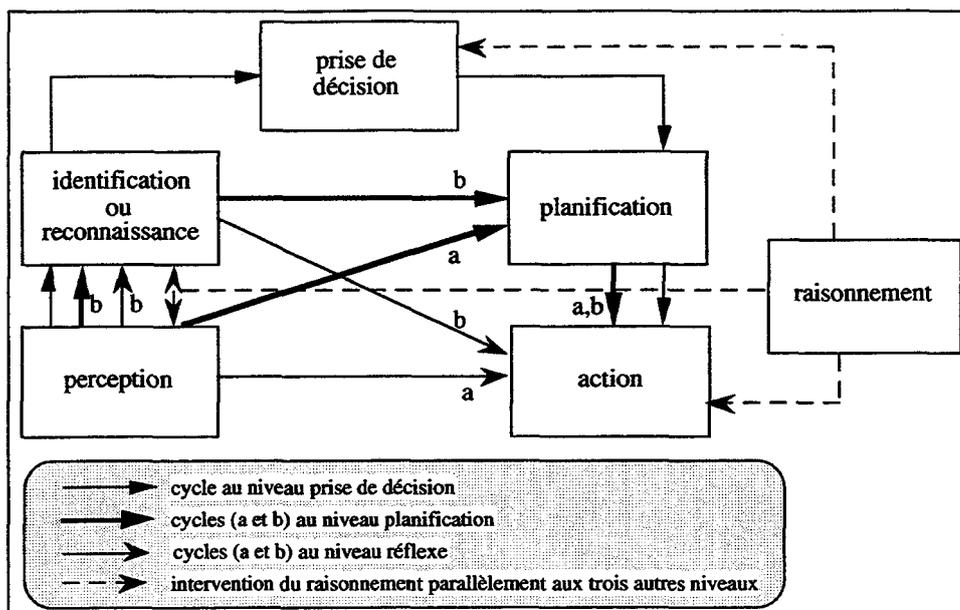


Fig. V.1 : Fonctionnement de l'architecture de l'agent selon la situation.

Ces deux exemples de travaux ont en commun de proposer des agents dont le fonctionnement est basé sur le cycle perception-cognition-action et possédant plusieurs niveaux de comportement. Ils ouvrent des perspectives intéressantes :

- D'une part, l'utilisation du même cycle (perception-cognition-action) aux niveaux Système et Agent constituerait une unification attrayante pour la conception multi-agents. Dans cette voie, nous envisageons la conception d'un système combinant les approches réactives et cognitives. Différentes classes d'agents sont définies : la classe *méta-agents* et deux classes de niveau inférieur, les classes *agents réactifs* et *agents cognitifs*. Les méta-agents sont chargés du contrôle global du système et activent les agents appartenant aux deux autres classes, selon les besoins occasionnés par la tâche à réaliser. En fonction des contraintes associées aux sous-buts identifiés lors de la planification de la tâche, ceux-ci sont attribués à des agents de type soit réactif, soit cognitif. Ces agents exercent un contrôle local basé, comme pour les méta-agents, sur le cycle perception-cognition-action (figure V.2).

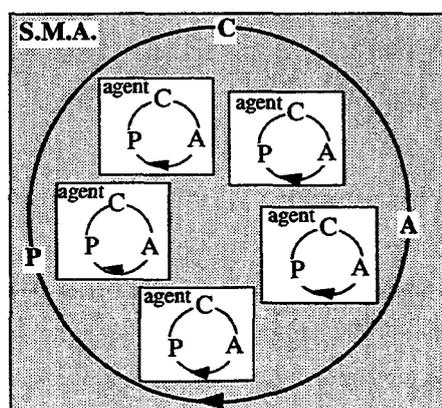


Fig. V.2 : Cycles Perception-Cognition-Action aux niveaux Système et Agent.

- D'autre part, l'utilisation de différents niveaux de comportements représente une forme d'adaptation locale (car elle appartient au niveau Agent) par rapport au contexte. Or, nos travaux s'intéressent à l'aspect complémentaire qui consiste en l'adaptation globale, du système multi-agents, à son contexte. L'intégration de travaux du type de ceux présentés ci-dessus, à ce qui est proposé dans ce mémoire, produirait un S.M.A. capable de réagir à la fois localement et globalement de manière appropriée à une large variété de tâches. De plus, les niveaux de Rasmussen étant traditionnellement utilisés pour modéliser le raisonnement d'un opérateur humain, son utilisation en multi-agents ouvre des perspectives d'unification des modèles d'agents qu'ils soient humains ou artificiels.

V.1.3 Vers un S.M.A. temps réel

Le système SYGMA a été, pour le moment, uniquement utilisé en tant que "maquette" ou outil de laboratoire. Pour que la méthodologie proposée puisse s'appliquer dans les domaines temps réel, en contrôle de procédé par exemple, des améliorations sont à prévoir.

Les travaux entrepris par divers laboratoires dans le cadre du projet Esprit REAKT s'intéressent à ce type de problème. Les objectifs de REAKT [Mensch 94] sont de permettre :

- *l'acquisition de données en continu.*
Cette capacité est indispensable à un S.M.A. utilisé en situation réelle, qui doit percevoir constamment son environnement.
- *la gestion des interruptions et la focalisation de l'attention.*
Ces aspects sont également liés à la perception et à la possibilité de traiter, dans un premier temps, de façon superficielle les données perçues afin de déterminer l'importance ou l'urgence de leur prise en compte.
- *le raisonnement en temps limité.*
La réalisation de cet objectif paraît indispensable sitôt que le système est destiné à être utilisé "sur site".
- *le raisonnement temporel et la gestion du vieillissement de données.*
Ce type de raisonnement peut devenir fort complexe lorsqu'il est utilisé en univers multi-agents.

Les chercheurs appartenant au projet ont créé une architecture basée sur les tableaux noirs. Des méthodes et techniques répondant aux objectifs fixés ont été produites. Il serait par conséquent intéressant d'utiliser l'expérience acquise et les résultats obtenus par les participants à REAKT.

Le système REAKT se compose de trois modules qui s'exécutent en parallèle : un module d'acquisition de données, un module de raisonnement et un module de gestion des actions externes [Laland 92]. L'application de ce principe à notre système implique son découpage en modules

spécialisés dans certains types de tâches (comme la perception, la planification ou l'action), ainsi que la distinction entre les étapes interruptibles ou non dans le processus de réalisation d'une tâche (la planification doit être interruptible, par exemple). Elle suppose, de plus, l'existence de raccourcis autorisant l'action "réflexe" lorsqu'une action rapide et usuelle doit être réalisée (figure V.3). L'interaction S.M.A./environnement est dans ce cas ininterrompue, car le système reçoit des événements et agit en continu sur son environnement. Les percepts sont stockés au fur et à mesure de leur apparition, en attendant d'être traités par le système. De même, les actions passent par une zone de stockage avant d'être rendues effectives. La mémoire commune formée par les tableaux noirs dans REAKT, est présente implicitement dans les S.M.A. à base de messages, grâce à la communication par diffusion et aux connaissances mutuelles que possèdent les agents les uns sur les autres.

Le développement d'une architecture temps réel permettrait à la fois d'évaluer les performances des agents selon leur organisation et d'ouvrir des perspectives d'applications plus conséquentes que celles limitées aux cas de laboratoire. Il s'agirait d'un premier pas vers l'introduction des résultats de nos recherches sur des architectures physiquement distribuées, autorisant la réalisation de tâches en parallèle et donc des possibilités de validation plus étendues.

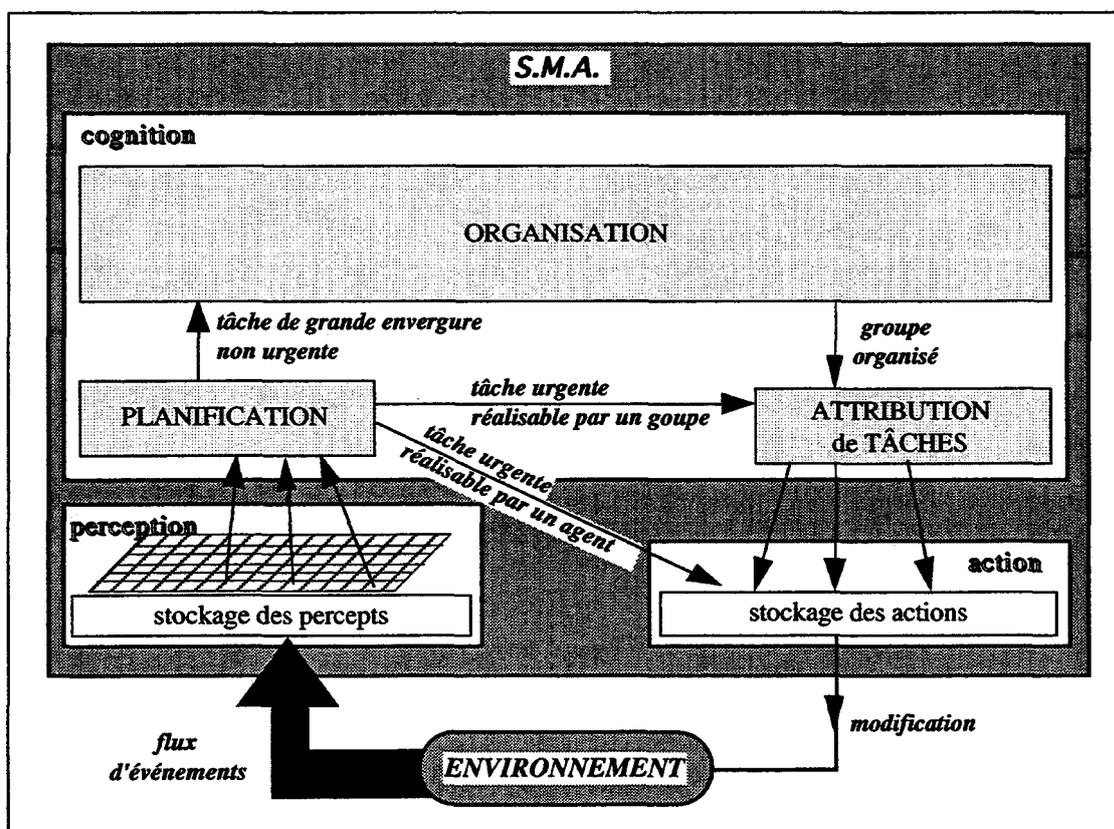


Fig. V.3 : Représentation de quelques unes des modifications à apporter à SYGMA pour son utilisation temps réel.

V.2 Domaines d'application

Deux éléments originaux ont été présentés dans ce mémoire, à savoir : une méthodologie d'organisation et un formalisme. Ce dernier trouve son application en conception de S.M.A., tandis que la méthodologie peut être utile dans des situations nécessitant de la part du système une capacité d'adaptation, selon la nature de la tâche à réaliser. Nous verrons, en particulier, son application dans le but d'améliorer les interactions dans les systèmes hommes-machines. Enfin, la simulation informatique permet d'obtenir des résultats numériques qui pourraient être utilisés, en retour, par les sciences humaines.

V.2.1 Conception de S.M.A.

Deux éléments présentés dans ce mémoire peuvent être appliqués en conception de systèmes multi-agents.

Le premier élément est la description en trois niveaux, Univers, Système et Agent, qui permet de déterminer progressivement les caractéristiques du système, tel que cela a été fait dans le cas de SYGMA donné en exemple au chapitre IV.

Cette description forme la base du second élément applicable en conception multi-agents, à savoir le formalisme développé tout au long de ce mémoire. Sa simplicité et sa structuration permettent de l'adapter à de nombreux contextes différents : il peut être complété, détaillé plus avant ou remodelé de façon à prendre en compte les caractéristiques spécifiques du système décrit.

V.2.2 Interactions hommes-machines

L'avenir verra apparaître des groupes de travail comprenant à la fois des humains et des machines. L'interaction homme-machine devient l'interaction hommes-machines et le problème du travail coopératif commence à se poser de manière cruciale. C'est ainsi que *“les systèmes deviennent des systèmes Homme(s)/Machine(s) multi-experts, multi-métiers, multi-cultures et leur organisation se développe comme une intelligence collective d'un réseau enchevêtré de compétences”* [Erceau 94]. Lorsqu'un groupe composé d'humains et d'entités artificielles doit réaliser des travaux en coopération, des problèmes de communication et d'organisation importants apparaissent. Or, ce sont des problèmes étudiés dans le domaine des S.M.A., ce mémoire se faisant l'écho de l'étude des organisations multi-agents. Une expérience, des outils et des méthodes existent, il est possible d'en retirer des enseignements utiles à l'organisation des systèmes multi-humains et multi-machines.

Des avancées ont déjà été effectuées dans cette voie. L'intégration progressive d'agents artificiels dans le travail humain est en cours. Nous verrons, successivement, l'aide que peut

apporter un agent artificiel à un humain, celle qu'il peut apporter à un groupe d'humains et, en perspective, la constitution de groupes alliant plusieurs agents artificiels et humains.

V.2.2.1 Un agent intelligent qui apprend et s'adapte à l'utilisateur

La notion d'agent est utilisée également dans le domaine de l'interaction homme-machine (I.H.M.). Néanmoins sa signification est, en général, légèrement différente de celle utilisée en I.A.D.

En I.H.M., un "agent" est souvent un module informatique possédant des connaissances et capable d'un raisonnement relativement sophistiqué. Il possède parfois, en plus, des capacités d'apprentissage, ce qui lui permet de s'adapter aux caractéristiques de l'utilisateur humain, comme le font par exemple les interfaces dites "intelligentes" ([Kolski 93], [Le Strugeon 91 et 92]). Un agent est donc généralement un assistant logiciel personnalisé. Par exemple, le CAP (Calendar APprentice) [Mitchell 94] gère des agendas en tenant compte des préférences de chaque utilisateur du logiciel. De même, le système COACH de Selker [94] personnalise l'aide fournie à l'utilisateur, grâce à ses expériences précédentes. Maes [94] propose une métaphore de "l'assistant personnel qui collabore avec l'utilisateur", illustrée par la figure V.4. L'agent apprend comment seconder, voire remplacer, l'utilisateur dans son interaction avec l'application, par l'observation et l'imitation.

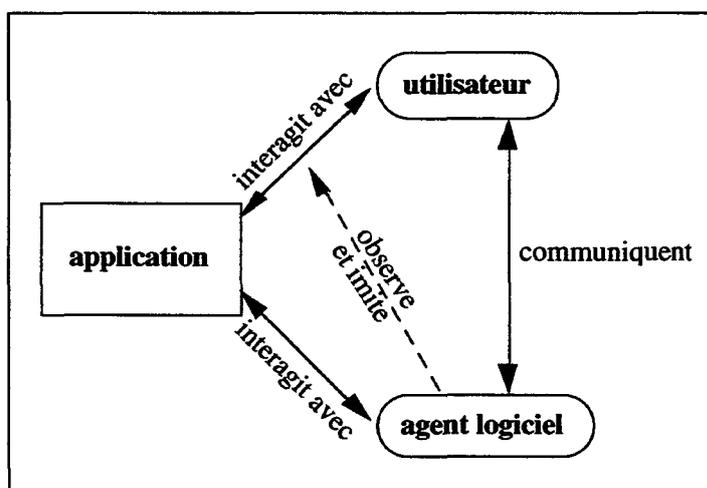


Fig. V.4 : Apprentissage de l'agent assistant personnel (traduit de [Maes 94]).

Ces exemples mettent en évidence le caractère particulier de ces agents : il s'agit d'entités intelligentes *informatiques, isolées*, et non d'*ensembles* d'entités, *humaines ou artificielles*, comme c'est le cas en I.A.D. Ces travaux représentent donc l'introduction d'agents artificiels autonomes parmi les humains et, par conséquent, un premier pas vers la constitution de systèmes multi-agents tels que nous l'entendons.

V.2.2.2 Travail coopératif supporté par ordinateur

Les préoccupations inhérentes à la conception d'agents tels que ceux présentés ci-dessus sont assez éloignées du principe des systèmes multi-agents, qui s'intéressent à la résolution coopérative d'un problème. Or, les problèmes posés par la résolution coopérative existent également dans les groupes humains. L'idée d'utiliser les ordinateurs pour assister le travail coopératif a donné naissance à un domaine de recherche, appelé par les anglophones le Computer Supported Cooperative Work (CSCW) [Chang 87].

Ce domaine de recherche ouvre la porte à de nombreuses applications. Par exemple, le travail à assister peut être une activité de conception. En effet, la conception coopérative est "*une activité de groupe complexe incluant des participants aux expériences hétérogènes*" [Edmonds 94]. Il s'agit typiquement d'un problème de communication entre agents parlant un langage différent, dans le but de réaliser une tâche commune. Les systèmes existants se limitent pour l'instant, à proposer un support matériel et logiciel pour la réflexion en commun. Ils permettent d'unifier les formalismes utilisés par les différents membres du groupe, d'intégrer et de centraliser des données de provenances diverses.

Il s'agit donc d'une nouvelle avancée vers les systèmes permettant le travail collaboratif. Toutefois les agents artificiels impliqués ont encore un rôle assez "passif" dans le groupe. Le paragraphe suivant s'intéresse aux systèmes dans lesquels les agents participent activement aux tâches humaines.

V.2.2.3 Organisations multi-agents humains et artificiels

L'application immédiate des méthodes multi-agents aux interactions hommes-machines se heurte à deux principaux obstacles.

Le premier est dû à la caractéristique hétérogène de tels systèmes. Ils sont composés de deux grands types d'agents : les hommes et les machines. Il semble difficile d'utiliser les mêmes outils pour ces deux sous-ensembles. La communication est particulièrement délicate au sein de tels systèmes : les hommes utilisent une forme de communication entre eux, les machines en utilisent une autre, fondamentalement différente, et la communication entre les deux groupes forme à elle seule un domaine de recherche à part entière.

Nous estimons donc que ce système multi-agents spécifique peut être étudié comme l'ensemble de deux S.M.A. — chaque système étant composé d'agents du même type, humain ou artificiel. Ces systèmes interagissent, sont plongés dans un univers commun et doivent collaborer à la réalisation d'une tâche (figure V.5).

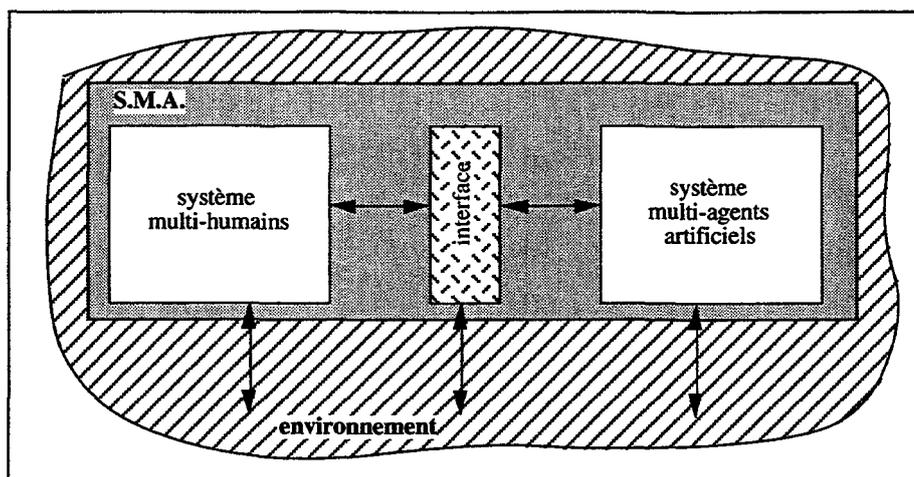


Fig. V.5 : Un exemple simplifié de système multi-agents humains et artificiels.

Le deuxième obstacle est causé par la caractéristique humaine d'un de ces deux S.M.A. En effet, si le cycle de réalisation d'une tâche par un agent artificiel est parfaitement connu car créé par le concepteur, il en va évidemment autrement pour un humain. Or, nous avons vu qu'un agent cognitif raisonne et agit d'après ses connaissances sur les autres agents. Un modèle de "l'agent humain" est donc nécessaire aux agents artificiels. Malheureusement, tout modèle de ce type est, du moins pour l'instant, fort imparfait.

Les travaux de Rasmussen ou les modèles proposés plus récemment par les psychologues du travail (Hoc [93], Amalberti [93]), peuvent être utiles à ce propos, comme dans les architectures évoquées au paragraphe V.1.2. Dans le but de réaliser des S.M.A. intégrant humains et machines, la conception de l'architecture des agents artificiels sur des modèles de ce type nous semble indispensable. Cela permet, en effet, d'établir une certaine unification dans les modèles utilisés pour représenter le raisonnement humain ou artificiel. L'agent artificiel peut ainsi avoir un comportement basé sur le même modèle que celui qu'il utilise pour représenter le comportement d'un agent humain. Ceci constituerait une évolution notable dans la conception d'architectures d'agents. De plus, grâce à l'introduction d'architectures de ce type, le premier obstacle évoqué ci-dessus devient moins important. Le système global peut alors se concevoir de manière homogène du point de vue du comportement, puisque celui-ci est représenté par un modèle identique quelle que soit la nature de l'agent impliqué.

Des éléments de réponse existent donc pour pallier ces deux problèmes. Il reste à poursuivre dans cette direction de façon à concevoir des outils supportant la coopération entre des hommes et des machines. Dans cet objectif, la méthode d'organisation proposée dans ce mémoire pourrait apporter une structure supportant cette coopération.

Au chapitre IV, la conception d'agents artificiels capables d'adaptation organisationnelle a été expliquée. Il est possible d'établir sur la base des modèles utilisés par ces agents, un ensemble d'instructions de comportement à l'usage des humains devant coopérer avec eux. Ces informations

permettraient de rendre compréhensible et “transparent” aux yeux d’un observateur, le comportement d’agents artificiels de ce type. L’interface entre les hommes et les machines s’en trouverait améliorée. Toutefois, ceci ne peut s’appliquer de la même façon au groupe humain. S’il est facile d’obliger un agent artificiel à prendre le comportement désiré dans telle ou telle situation, il est bien sûr impossible de faire de même pour un humain.

L’organisation adoptée par le système hommes-machines peut cependant servir de “structure” connue de chacun, et par rapport à laquelle les comportements peuvent s’ajuster en vue de réaliser une tâche commune [Le Strugeon 95]. En particulier, le travail présenté dans les chapitres précédents comporte :

- la réunion d’un ensemble de modèles d’organisations qui, nous l’avons vu, trouvent leur équivalent dans les sociétés humaines,
- la définition des critères pour déterminer quelle est l’organisation à adopter étant données les exigences de la tâche présente,
- une méthode d’instauration d’une structure particulière parmi les agents.

Ces techniques et méthodes peuvent apporter les bases indispensables à l’organisation d’un groupe composé d’agents artificiels et d’humains. Ils trouvent donc leur utilité dans les situations où un type d’organisation doit être trouvé pour gérer les actions concurrentes entre divers intervenants, hommes et machines intelligentes. Un exemple de ce genre de situation est le partage de tâches entre plusieurs hommes et plusieurs machines sur un environnement commun (travail multi-postes). Des idées d’application au contrôle du trafic aérien existent, voir notamment [Cammarata 83] et [Milot 92], pour le partage de tâches entre les contrôleurs humains et les machines “intelligentes” ; elles demandent de plus amples développements.

Les travaux sur l’organisation des systèmes multi-agents trouvent également une application dans la simulation de structures organisationnelles.

V.2.3 Simulation

La complémentarité entre certains domaines des sciences humaines, tels que la sociologie et l’économie, et l’étude des organisations en I.A.D. a été abordée dans ce mémoire, principalement au cours du chapitre II.

En effet, nous avons, en partie, utilisé des études réalisées en sociologie pour représenter de façon formelle les organisations humaines, en déduire des modèles généraux d’organisations, décrire quels sont les cas d’utilisation de telle ou telle structure et quelles sont les raisons à l’origine de modifications dans l’organisation. Nous avons vu que certains travaux portant, par exemple, sur la description d’une structure organisationnelle et de son évolution [Mintzberg 82] ou l’étude de l’influence de différents facteurs sur “l’efficacité” de ces structures — en terme de

rapidité de décision — [March 71], peuvent être utiles dans la résolution des problèmes correspondants rencontrés lors de l'étude de groupes d'agents.

Réciproquement, les travaux sur les organisations d'agents pourront certainement permettre d'enrichir les études portant sur leurs homologues humains, grâce à la formalisation qu'ils proposent, à la simulation et donc aux résultats numériques qu'ils apportent. Il est possible d'envisager de simuler une organisation spécifique parmi un ensemble déterminé d'agents à des fins d'observation. Les données recueillies comprendraient, par exemple, des possibilités de répartition des tâches, l'évaluation du nombre de messages échangés avant de parvenir à un accord et, plus généralement, l'efficacité de l'organisation implantée face à la réalisation de certains types de tâches.

L'étude des organisations multi-agents en I.A.D. et celle des organisations humaines en sociologie peuvent ainsi être complétées et comparées. Ces deux domaines ont tout à gagner à s'enrichir mutuellement des résultats de leurs travaux.

Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence diverses perspectives de nos travaux. En particulier, les modifications suivantes permettraient d'améliorer la méthodologie proposée dans ce mémoire :

- L'introduction de modèles d'organisations supplémentaires pourrait être utile pour certaines applications.
- L'utilisation d'une forme de pondération permettrait de prendre en considération l'importance relative des critères de choix des organisations.
- Le déclenchement de la propagation de la nouvelle organisation dans le système serait plus fiable si elle était effectuée par plusieurs agents au lieu d'un seul.

De plus, l'intégration de notions multi-agents complexes, telles que les S.M.A. temps réel, sont nécessaires dès lors que l'on veut valider, puis appliquer et utiliser de manière efficace les méthodes développées à des situations réelles.

Par ailleurs, la complémentarité existant entre nos travaux et ceux portant sur les niveaux de comportement des agents est apparue.

Les possibilités d'application de la méthode d'organisation à l'interaction entre des hommes et des machines ont également été présentées. L'utilisation des méthodes et des connaissances proposées pour la structuration de l'organisation, au sein de systèmes hommes-machines dans un objectif de collaboration, semble réalisable moyennant quelques adaptations.

Enfin, le système développé est un outil de simulation qui pourrait être utile à l'étude des organisations en général, de manière complémentaire aux méthodes utilisées en sciences humaines.

Conclusion générale

Dans un objectif général d'étude de la coopération parmi des ensembles d'entités intelligentes, humains ou machines, nous nous sommes focalisés sur l'étude des moyens à donner aux groupes d'agents pour qu'ils adaptent leur organisation en fonction du contexte.

Diverses notions d'I.A.D. nécessaires à l'explication de nos travaux ont tout d'abord été introduites. Elles se situent dans le cadre d'une description des univers multi-agents selon trois niveaux d'abstraction et de détail, à savoir les niveaux Univers, Système et Agent.

Une étude bibliographique pluridisciplinaire portant sur les caractéristiques de différents types d'organisation a ensuite été exposée. La classification des organisations d'après Gasser a été choisie. Elle comporte quatre types d'organisations : hiérarchie, marché, communauté et société. La comparaison et l'évaluation des aptitudes de diverses organisations selon le contexte a mis en évidence l'existence de trois caractéristiques importantes de la tâche, ayant une influence sur l'organisation à adopter. Ces critères reflètent les exigences de la tâche en termes de connaissances, d'action et de coordination.

Sur la base des connaissances ainsi introduites, nous avons proposé une méthodologie d'adaptation organisationnelle des systèmes multi-agents. L'adaptation est réalisée selon deux étapes principales : une étape de spécification de la tâche courante et une étape de structuration de l'organisation. La tâche assignée aux agents est ainsi spécifiée formellement selon les trois caractéristiques exprimant les exigences de la tâche. Grâce à cette spécification, un modèle d'organisation adéquat est sélectionné parmi les quatre organisations types provenant de la classification choisie. Le processus d'adaptation est complété par la proposition d'une méthode de propagation de la nouvelle structure organisationnelle dans le système.

La présentation des étapes de conception et de développement du système SYGMA, et son application sur un exemple ont permis d'expliquer comment mettre en oeuvre les éléments théoriques énoncés, en suivant la méthode de description d'un système multi-agents en trois niveaux proposée précédemment. Cette confrontation à la pratique a révélé l'applicabilité de la méthodologie mais aussi quelques limites, ainsi que le besoin d'une validation globale sur site réel.

Pour réaliser cette validation, l'introduction d'éléments provenant de l'étude des systèmes multi-agents temps réel paraît indispensable. Ceci constitue une des perspectives annoncées dans le dernier chapitre, lequel propose également d'intégrer des modèles d'agents comportant différents niveaux de comportement. De plus, diverses modifications de la méthodologie proposée sont prévues afin d'en améliorer l'efficacité. Enfin, l'utilité de ce type de travaux pour la gestion des interactions entre des hommes et des machines a été présentée.

Par ailleurs, les différents éléments constitutifs de la méthodologie proposée et ceux utiles à sa mise en oeuvre ont fait l'objet d'une formalisation systématique. En effet, nous estimons que la formalisation constitue l'étape de structuration et de représentation indispensable à l'implémentation des notions développées de manière théorique.

L'objectif principal de constitution de moyens par lesquels un système multi-agents peut adapter son organisation au contexte a été atteint. L'objectif à plus long terme de gestion de la coopération dans un système composé à la fois d'agents artificiels et d'humains reste encore du domaine des perspectives.

Références bibliographiques

* : références personnelles

[AEBISCHER 90] AEBISCHER V., OBERLE D. *Le groupe en psychologie sociale*. ed. Dunod, Paris, 1990.

[AGRE 87] AGRE P.E., CHAPMAN D. *Pengi : An Implementation of a Theory of Activity*, Proceeding of the 6th American Association on AI, Seattle, Washington, 1987, pp. 187-201.

[AMALBERTI 93] AMALBERTI R., VALOT C. *From field work analysis to a cognitive model and the design of support systems: assistance to fighter pilots*. Proceeding of IEEE-SMC'93, Le Touquet, France, 17-20 oct., 1993, pp. 682-688.

[AYEL 90] AYEL M., ROUSSET M.C. *La cohérence dans les bases de connaissances*. Cepadues, coll. I.A., Toulouse, 1990.

[AYEL 91] AYEL J., LAURENT J.P. *Système multi-agents pour coordonner les activités de gestion de production*. Actes du 8ème congrès RFIA-AFCET, vol.1, Lyon, 25-29 nov., 1991, pp.371-379.

[BALLE 90] BALLE C. *Sociologie des organisations*. PUF, coll. Que sais-je, Paris, 1990.

[BENHAMOU 90] BENHAMOU P., BARAT M., FERBER J. *Sahara : simulateur d'architectures hétérogènes d'agents et de ressources actives*. Avignon 90, 28 mai-1er juin 1990, pp.793-805.

[BERNOUX 85] BERNOUX P. *La sociologie des organisations*. Seuil, coll. Inédit Points, Paris, 1985, 363 pages.

[BOISSIER 92] BOISSIER O., DEMAZEAU Y. *A distributed artificial intelligence view on general purpose vision systems*. Decentralized artificial intelligence, vol.3, Werner & Demazeau (eds.) , Elsevier, North-Holland, avril 1992, pp.311-330.

[BOND 88] BOND A., GASSER L. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufman, San Mateo, CA, 1988.

[BOOCH 88] BOOCH G. *Ingénierie du logiciel avec Ada*. Interéditions, Paris, 1988.

[BOURON 93] BOURON T. *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*. Thèse de doctorat, informatique, Paris 6, 17 nov.1993, 240 pages.

-
- [BOY 88] BOY G.A. *Human-machine distributed intelligence : the operator assistant concept*. Proceedings Experts systems and their applications, Avignon, juin 1988, pp.155-168.
- [BROOKS 86] BROOKS R.A. *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 1, Mars 1986.
- [BURMEISTER 90] BURMEISTER B., SUNDERMEYER K. *COSY: towards a methodology of multi-agent systems*. Proceedings of the International working conference on cooperating knowledge-based systems, Keele, UK, 1990, pp.112-113.
- [CAMMARATA 83] CAMMARATA S., McARTHUR D., STEEB R. *Strategies of cooperation in distributed problem solving*. Proc. 8th International Joint Conference on A.I., Karlsruhe, West Germany, vol.2, août 1983, pp. 767-770.
- [CHAIB-DRAA 94] CHAIB-DRAA B., PAQUET E. *Routines, situations familières et non-familières dans les environnements multiagents*. Actes de RFIA 94, Paris, vol.2, 1994, pp. 135-145.
- [CHANDRASEKARAN 93] CHANDRASEKARAN B., JOHNSON T. *Generic tasks and task structures: history, critique and new directions*. Proceedings of Second generation expert systems, Springer Verlag, 1993, pp. 232-271.
- [CHANG 87] CHANG E. *Participant systems*. Distributed artificial intelligence , Huhns (ed.), Pitman, London, Research notes in artificial intelligence, vol. 1, 1987, pp. 311-340.
- [CHEVRIER 93] CHEVRIER V. *Etude et mise en oeuvre du paradigme multi-agents : de Atome à Gtmas*. Thèse de doctorat, Nancy I, INRIA Lorraine, 11 Juin, 1993.
- [COHEN 86] COHEN M.D. *Artificial Intelligence and the dynamic performance of organizational designs*. Ambiguity and command, J. March & R. Weissi Baylon (ed.), Pitman, Marshfield, MA, USA, 1986, pp.53-71.
- [COHEN 90] COHEN P.R., LEVESQUE H.J. *Intention is choice with commitment* Artificial intelligence, n°42, 1990, pp.213-261.
- [CORKILL 86] CORKILL D., GALLAGHER K., MURRAY K. *GBB: A generic blackboard development system*. Proceedings of the 5th AAI, Pennsylvannie, USA, 1986, pp. 1008-1014.
- [CROWLEY 87] CROWLEY J.L. *Coordination of action and perception in a surveillance robot*. IEEE Expert, vol.2, n°4, Winter 1987, pp. 32-43.
- [DAVIS 80] DAVIS R. *Report on the workshop on distributed AI*. SIGART Newsletter, n°73, oct. 1980, pp.42-52.
-

-
- [DELAHAYE 88] DELAHAYE J.P. *Outils logiques pour l'intelligence artificielle*. Ed. Eyrolles, Paris, 1988.
- [DEMAZEAU 90] DEMAZEAU Y., MULLER J.P. *Decentralized artificial intelligence*. Decentralized artificial intelligence, Demazeau & Müller (eds.), vol.1, Elsevier, North-Holland, 1990.
- [DEMAZEAU 91a] DEMAZEAU Y. *Coordination patterns in multi-agent worlds. Applications to computer vision and robotics*. IEE Colloquium on intelligent agents, Savoy Place, 1991.
- [DEMAZEAU 91b] DEMAZEAU Y., MULLER J.P. *From reactive to intentional agents*. Decentralized artificial intelligence, Demazeau & Müller (eds.), vol.2, Elsevier, North-Holland, 1991, pp. 3-9.
- [DORAN 89] DORAN J. *Distributed artificial intelligence and the modelling of socio-cultural systems*. Intelligent systems in human context, Murray & Richardson (eds.), Oxford University Press, 1989, pp.71-79.
- [DROGOUL 93] DROGOUL A. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes : une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, université de Paris 6, 23 nov. 1993.
- [DURFEE 87] DURFEE E., LESSER V., CORKILL D. *Coherent cooperation among communicating problem solvers*. IEEE Transactions on computers, vol. C-36, n°11, novembre 1987, pp. 1275-1291.
- [DURFEE 90] DURFEE E., MONTGOMERY T. *A hierarchical protocol for coordinating multiagent behaviors*. Actes de AAI-90, 1990, pp. 531-536.
- [EDMONDS 94] EDMONDS E., CANDY L., JONES R., SOUFI B. *Supports for collaborative design: agents and emergence*. Communications of the ACM, vol.37, n°7, juil. 1994, pp.41-47.
- [ERCEAU 94] ERCEAU J. *Patrimoines cognitifs distribués, complexité, coopération et compréhension mutuelle dans les systèmes Homme(s)-Machine(s)*. Actes de ERGO-IA 94, Ergonomie et Informatique avancée, Biarritz, France, 26-28 oct. 1994, pp.307-318.
- [ERMAN 80] ERMAN L., HAYES-ROTH F., LESSER V., REDDY D. *The Hearsay II speech understanding system: integrating knowledge to resolve uncertainty*. ACM computing surveys, vol.12, n°2, juin 1980, pp.213-253.

-
- [FERBER 87] FERBER J. *Des objets aux agents : une architecture stratifiée*. 6ème congrès "Reconnaissance des formes et I.A.", Antibes, France, 16-20 nov. 1987, tome 1, Dunod Informatique, pp.275-286.
- [FERBER 88] FERBER J., GHALLAB M. *Problématique des univers multi-agents intelligents*. Actes des journées nationales, PRC-IA, Toulouse, 14-15 mars 1988, pp.295-320.
- [FERBER 92] FERBER J., DROGOUL A. *Using reactive multiagent systems in simulation and problem solving*. Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis. Avouris & Gasser (eds.), Eurocourses, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992, pp.53-80.
- [FERRARIS 92] FERRARIS C. *Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain*. Thèse de doctorat, université de Nancy I, 7 fev. 1992.
- [FIKES 71] FIKES R.E., NILSONN N.J. *STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving*. Artificial Intelligence, vol.2, n°3-4, 1971, pp. 189-208.
- [FOX 81] FOX M.S. *An organizational view of distributed systems*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-11, n°1, Jan., 1981, pp.70-79.
- [GALLIERS 88] GALLIERS J.R. *A strategic framework for multi-agent cooperative dialogue*. section "Multi-agent interaction" of the 8th European Conference on A.I., Munich, août 1988, pp.415-420.
- [GASSER 91a] GASSER L. *Social conceptions of knowledge and action : DAI foundations and open systems semantics* Artificial intelligence, n°47, 1991, pp.107-138.
- [GASSER 91b] GASSER L., ISHIDA T. *A dynamic organizational architecture for adaptive problem solving*. Proceedings of AAAI-91, 1991, pp.185-190.
- [GASSER 92a] GASSER L. *An Overview of DAI*, Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis. Avouris & Gasser (eds.), Eurocourses, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992, pp.9-30.
- [GASSER 92b] GASSER L., BRIOT J.P. *Object-based concurrent programming and DAI*, Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis. Avouris & Gasser (eds.), Eurocourses, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992, pp.81-108.

-
- [GEORGEFF 83] GEORGEFF M.P. *Communication and interaction in multi-agent planning*. Proceedings of the AAAI-83, WA, 1983, pp. 125-129.
- [GEORGEFF 87] GEORGEFF M.P., LANSKY A.L. *Reactive reasoning and planning*. Proceedings AAAI-87, Seattle, WA, 1987, pp.677-682.
- [GEORGEFF 89] GEORGEFF M.P., INGRAND F.F. *Decision-making in an embedded reasoning system*. Proceedings of the 11th IJCAI, Detroit, MI, 1989, pp. 972-978.
- [GLEIZES 90] GLEIZES M.P., GLIZE P., TROUILHET S. *La résolution distribuée de problèmes dans un environnement multi-agent*. Convention IA'90, Actes de la 2ème conférence européenne sur les techniques et applications IA en milieu industriel et de service, Hermes, Paris, Janv. 1990, pp.121-135.
- [GLEIZES 91] GLEIZES M.P., TROUILHET S. *Conception d'un système multi-agent: étude de la coopération dans Synergic*. Actes du 8ème congrès RFIA, vol.2, AFCET, Lyon, 25-29 Nov. 1991, pp. 615-623.
- [GRANT 92] GRANT T.J. *A review of multi-agent systems techniques, with application to Columbus user support organisation*. Future generation computer systems, North-Holland, n°7 (1991/92), pp.413-437.
- [HATON 89] HATON J.P. *Panorama des systèmes multi-agents*. Onzièmes journées francophones sur l'informatique, Nancy, Janvier 1989, pp.247-262.
- [HAUTIN 86] HAUTIN F., VAILLY A. *La coopération entre systèmes experts*. Actes des journées nationales du PRC-IA, Cepadues (eds), novembre 1986, pp. 187-204.
- [HAYES-ROTH 88] HAYES-ROTH B., JOHNSON M., GAVEY A., HEWETT M. *Building systems in the BB* environment*. Blackboard systems, Addison Wesley, 1988, pp. 543-560.
- [HAYES-ROTH 89] HAYES-ROTH B., HEWETT M., WASHINGTON R., HEWETT R., SEIVER A. *Distributing intelligence within and individual*. Distributed Artificial Intelligence, Gasser & Huhns (eds.), Pitman, London, Research notes in artificial intelligence, vol. 2, 1989, pp.385-412.
- [HAYES-ROTH 93] HAYES-ROTH B. *Architectural foundations for real-time performance in intelligent agents*. Second Generation Expert Systems, J.M. David, J.P. Krivine, R. Simmons (eds.), Springer-Verlag, 1993, pp. 643-672.

-
- [HENDLER 91] HENDLER J., BOBROW D., GASSER L., HEWITT C., MINSKY M. *Multiple approaches to multiple agent problem solving*. Proceedings of the 12th IJCAI, Sydney, Australie, 24-30 Août, 1991, pp.553-554.
- [HEWITT 91] HEWITT C. *Open information systems semantics for distributed artificial intelligence* Artificial intelligence, n°47, Elsevier science publishers B.V., 1991, pp.79-106.
- [HOC 93] HOC J.M. *Main features of the human supervision of a long response latency process*. Proceeding of IEEE-SMC'93, Le Touquet, France, 17-20 oct., 1993, pp. 114-119.
- [ISHIDA 92] ISHIDA T., GASSER L., YOKOO M. *Organization self-design of distributed production systems*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol.4, n°2, Avril, 1992, pp.123-184.
- [JACOPIN 93] JACOPIN E. *Algorithme de l'interaction : le cas de la planification*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 1993.
- [JENNINGS 93] JENNINGS N., VARGA L., AARNTS R., FUCHS J., SKAREK P. *Transforming standalone expert systems into a community of cooperating agents*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.6, n°4, 1993, pp.317-331.
- [KIRN 92] KIRN S., SCHLAGETER G. *Coordinating autonomous problem solvers with iterative negotiations & partial global plans*. Avignon' 92 Proceedings 12th International Conference, France, 1-6 juin, vol.1, EC2 (eds), 1992, pp. 525-534.
- [KJAER-HANSEN 91] KJAER-HANSEN J. *Decision structures of multi-agent systems*. Ph.D. , Institute of automatic control systems, Technical university of Denmark, Oct., 155 pages, 1991.
- * [KOLSKI 93] KOLSKI C., LE STRUGEON E., TENDJAOUI M. *Implementation of A.I. techniques for "intelligent" interface development* Engineering Applications of Artificial Intelligence, Pergamon Press, vol.6, n°4, 1993, pp.295-305.
- [KORNFELD 81] KORNFELD W., HEWITT C. *The scientific community metaphor*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.SMC-11, n°1, Janv. 1981, pp. 24-33.
- [KUMAR 93] KUMAR A., OW P.S., PRIETULA M. *Organizational simulation and information systems design: an operations level example*. Management Science, vol.39, n°2, Fev., 1993, pp.218-240.

-
- [LABORIE 93] LABORIE J.P. *Méthodologie de développement des systèmes complexes. Le cas de l'Airbus A340-A330*. Nouvelle revue d'aéronautique et d'astronautique, n°3, 1993, pp. 50-57.
- [LESSER 83] LESSER V.R., CORKILL D.D. *The distributed vehicle monitoring testbed*. The A.I. Magazine, Fall 1983, pp.15-33.
- [LESSER 89] LESSER V., CORKILL D., WHITEHAIR R., HERNANDEZ J. *Focus of control through goal relationships*. IJCAI'89, 1989.
- * [LE STRUGEON 91] LE STRUGEON E. *Contribution à la conception et à la réalisation d'une interface évoluée : le Module Décisionnel d'Imagerie*. Rapport de D.E.A., Université de Valenciennes, Juin 1991.
- * [LE STRUGEON 92] LE STRUGEON E., TENDJAOUI M., KOLSKI C. *Knowledge specification and representation for an "intelligent" interface devoted to process monitoring and supervision*. IFAC Symposium on Artificial Intelligence in Real Time Control, Delft, The Netherlands, 16-18 Juin 1992, pp. 245-250.
- * [LE STRUGEON 93] LE STRUGEON E., MANDIAU R., LIBERT G. *Proposition d'organisation dynamique d'un groupe d'agents en fonction de la tâche*. 1ères Journées Nationales sur l'I.A.D. et les Systèmes Multi-Agents, Toulouse, France, 7-8 Avril 1993, pp. 217-227.
- * [LE STRUGEON 94a] LE STRUGEON E., MANDIAU R., MILLOT P. *A multiagent organizational adaptation*. Canadian Workshop on DAI, Banff, Canada, 16 Mai 1994.
- * [LE STRUGEON 94b] LE STRUGEON E., MANDIAU R. *Adaptation organisationnelle d'un système multi-agents en fonction de la tâche courante*. IIèmes Rencontres Nationales des Jeunes Chercheurs en I.A., Marseille, 7-10 Septembre 1994.
- * [LE STRUGEON 94c] LE STRUGEON E., MANDIAU R., MILLOT P. *Representation for an organization in a multi-agent world*. IFAC Conference on Integrated Systems Engineering, Baden-Baden, Germany, 27-29 Septembre 1994, pp. 41-46.
- * [LE STRUGEON 94d] LE STRUGEON E., MANDIAU R., LIBERT G. *Towards a dynamic multiagent organization*. ISMIS '94 : 8th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems, Charlotte, North Carolina, USA, 16-19 Octobre 1994. Paru dans "Methodologies for Intelligent Systems", Lecture Notes in AI, vol. 869, Springer Verlag.

-
- * (*en prévision*) [LE STRUGEON 95] LE STRUGEON E., GRISLIN M., MILLOT P. *Application of DAI organizational techniques to men-machines cooperation*. 6th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, MIT, Cambridge, USA, 27-29 juin 1995.
- [LIU 83] LIU M. *Approche socio-technique de l'organisation*. Les éditions d'organisation, 1983.
- [MAES 94] MAES P. *Agents that reduce work and information overload*. Communications of the ACM, vol.37, n°7, juil. 1994, pp.31-40.
- [MALONE 87] MALONE T.W. *Modeling coordination in organizations and markets*. Management Science, vol.33, n°10, Oct., 1987, pp.1317-1332.
- [MANDIAU 93] MANDIAU R. *Contribution à la modélisation des univers multi-agents : génération d'un plan partagé*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 22 fév. 1993.
- [MARCH 71] MARCH J.G., SIMON A.H. *Les organisations*. Ed. Dunod, coll. Organisation et sciences humaines, 1971, 253 pages.
- [MARUICHI 90] MARUICHI T., ICHIKAWA M., TOKORO M. *Modeling autonomous agents and their groups*. Decentralized A.I., Y. Demazeau & J.P. Müller (eds), Elsevier Science Publishers, 1990, pp.215-234.
- [MENSCH 94] MENSCH A. *Le projet REAKT : Environnement et méthodologie pour le développement de systèmes à base de connaissances temps réel*. Bulletin de l'AFIA, n°16, Janv. 1994, pp. 36-41.
- [MINSKY 80] MINSKY M. *K-Lines : a theory of memory*. Cognitive Science, vol.4, n°2, 1980, pp.117-133.
- [MINTZBERG 86] MINTZBERG H. *Structure et dynamique des organisations*. Les éditions d'organisation (Paris) et les éditions Agence d'ARC Inc. (Montreal), 1986 (1ère édition en 1982), 434 pages.
- [MITCHELL 94] MITCHELL T., CAMERNER R., FREITAG D., MC DERMOTT J., ZABOWSKI D. *Experience with a learning personal assistant*. Communications of the ACM, vol.37, n°7, juil. 1994, pp.81-91.
- [NUMAOKA 92] NUMAOKA C. *Conversation for organizational activity*. Decentralized A. I. 3 Proceedings of the 3rd European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Werner & Demazeau (ed.), Elsevier Science, 1992, pp.189-197.
-

-
- [PATTISON 87] PATTISON H., CORKILL D., LESSER V. *Instantiating descriptions of organizational structures*. Distributed artificial intelligence, Huhns (ed.), Research notes in artificial intelligence, Pitman, London, tome1, 1987, pp.59-96.
- [PLEIAD 92] PRC-GDR Intelligence Artificielle. Actes de la Journée "Systèmes Multi-Agents" du P.R.C.-G.D.R. Intelligence Artificielle, Nancy, 18 déc.1992, pp. 1-11.
- [POLLACK 92] POLLACK M. *The uses of plans*. Artificial Intelligence, n°57, Elsevier Publishers, 1992, pp.43-68.
- [POTET 90] POTET A. Etude d'un système à logique épistémique et temporelle. Application aux univers multi-agents. Thèse de doctorat, ENSM, Nantes, 16 nov. 1990.
- [RASMUSSEN 86] RASMUSSEN J. *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering*. North-Holland, 1986.
- [REGNIER 91] REGNIER P. *Planification : historique, principes, problèmes et méthodes (de GPS à ABTWEAK)*. Rapport IRIT n°90/22/R, IRIT Toulouse, mars-avr. 1991, 98 pages.
- [REICHGELT 90] REICHGELT H. *Different styles of agent architectures*. Proceedings of the 1st belief representation and agent architectures workshop, Cambridge, Galliers J.R. (ed.), mai 1990, pp.29-39.
- [SABAH 93] SABAH G. *Vers une conscience artificielle ? Modèles et concepts pour la science cognitive*. P.U. de Grenoble, 1993, pp. 207-221.
- [SCHMIDT 89] SCHMIDT K. *Modelling cooperative work in complex environments*. Proceedings of the 2nd European meeting on cognitive science: Approaches to process control, Siena, Italy, 24-27 Oct, 1989, pp. 173-192.
- [SELKER 94] SELKER T. *Coach: a teaching agent that learns*. Communications of the ACM, vol.37, n°7, juil. 1994, pp.92-99.
- [SHIN 90] SHIN D., LEONE J. *AM/AG model : a hierarchical social system metaphor for distributed problem solving*. International Journal of Pattern Recognition and A.I., vol.4, n°3, 1990, pp.473-487.
- [SHOHAM 89] SHOHAM Y., MOSES Y. *Belief as defeasible knowledge*. Actes des IJCAI'89, 1989, pp.1168-1173.
- [SHOHAM 91] SHOHAM Y. *AGENTO : A simple agent language and its interpreter*. AAI-91, pp.704-709.

-
- [SHOHAM 93] SHOHAM Y. *Agent-oriented programming*. Artificial Intelligence, Elsevier, n°60, 1993, pp.51-92.
- [SINGH 93] SINGH M., HUHNS M., STEPHENS L.M. *Declarative representations of multiagent systems*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol.5, n°5, Oct. 1993, pp.721-739.
- [SMITH 80] SMITH R.G. *The contract net protocol : high-level communications and control in a distributed problem solver*. IEEE Transactions on computers, n°12, vol.C-29, dec 1980, pp.1104-1113.
- [STARY 92] STARY C., STUMPTNER M. *Representing organizational changes in distributed problem solving environments*. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, vol.22, n°5, Sep./Oct. 1992, pp. 1168-1177.
- [STEELS 90] STEELS L. *Cooperation between distributed agents through self-organisation*. Decentralized artificial intelligence, Y. Demazeau & J.P. Müller (eds), vol.2, Elsevier Science P., 1990, pp.175-196.
- [TROUILHET 93] TROUILHET S. *Représentation et traitement des connaissances sociales chez l'agent : application à l'environnement multi-agent Synergic*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 8 juil. 1993.
- [WERBER 91] WERBER B. *Les fourmis*. A. Michel (ed.), France, 1991.
- [WERNER 88] WERNER E. *Toward a theory of communication and cooperation for multiagent planning*. Theoretical aspects of reasoning about knowledge : Proceedings of the 2nd conference, Morgan Kaufman Publishers, 1988, pp.129-143.
- [WERNER 92] WERNER E. *The design of multi-agent systems*. Decentralized artificial intelligence, Werner E. & Demazeau Y.(eds.), vol.3, North-Holland, Elsevier Science P., 1992, pp.3-30.
- [ZEGHAL 93] ZEGHAL K. *Champs de forces symétriques : un modèle de coordination d'actions réactive appliqué au trafic aérien*. Rapport LAFORIA 93/14, Institut B. Pascal, Paris VI et VII, mai 1993, 16 pages.

Index des figures

Figure 1: Plan du mémoire.	7
Fig. I.1: Description d'un univers multi-agents selon trois niveaux.	12
Fig. I.2: Interactions entre systèmes multi-agents partageant un même univers.	13
Fig. I.3: Cycle de réalisation d'une tâche.	20
Fig. I.4: Exemple de décomposition d'une tâche globale.	23
Fig. I.5: Des agents cognitifs formant un système réactif.	31
Fig. I.6: Schéma général de réalisation d'une tâche par un S.M.A.	32
Fig. II.1: Architecture d'un agent O.S.D.	36
Fig. II.2: Exemple d'organisation par regroupement d'agents	37
Fig. II.3: Méthode AM/AG	37
Fig. II.4: La dynamique de l'organisation.	38
Fig. II.5: Processus d'adaptation du S.M.A. par modification de la str. org.	39
Fig. II.6: Les cinq éléments fondamentaux d'une structure organisationnelle	40
Fig. II.7: Exemple de représentation d'une organisation	42
Fig. II.8: Cinq structures d'organisation	48
Fig. III.1: Décomposition de la phase d'organisation	54
Fig. III.2: Entrées / sorties du bloc "spécification de la tâche".	56
Fig. III.3: Méthode utilisée pour la spécification de la tâche.	57
Fig. III.4: Exemple d'un graphe de décomposition d'une tâche globale.	58
Fig. III.5: Plan de réalisation tiré du graphe de la figure III.4.	59
Fig. III.6: Exemples de cas limites pour le critère A.	63
Fig. III.7: Comparaison entre deux points représentant des tâches.	65
Fig. III.8: Huit zones d'influence des sommets du cube principal.	66
Fig. III.9: Evaluation des caractéristiques des tâches.	67
Fig. III.10: Entrées / sorties du bloc "adaptation de l'organisation".	67
Fig. III.11: Sélection d'une organisation et organisation effective du S.M.A.	68
Fig. III.12: Description d'une structure organisationnelle.	70
Fig. III.13: Spécification de la bibliothèque de structures organisationnelles.	73
Fig. III.14: Représentation du modèle hiérarchie.	74
Fig. III.15: Modèle de communauté.	75
Fig. III.16: Modèle de marché.	75
Fig. III.17: Modèle de société.	76
Fig. III.18: Associations entre les modèles de la bibliothèque et les tâches-types.	78
Fig. III.19: Méthode "tout ou rien".	80
Fig. III.20: Méthode "économique".	81
Fig. III.21: Méthode itérative.	81

Fig. III.22: Outils pour l'organisation adaptative d'un système multi-agents.	83
Fig. IV.1: Vue globale de SYGMA.	86
Fig. IV.2: Conception des interactions S.M.A./environnement au niveau Univers.	88
Fig. IV.3: Etats d'un système multi-agents.	89
Fig. IV.4: Entrées/Sorties observables d'un agent.	90
Fig. IV.5: Mode de communication au sein de SYGMA.	91
Fig. IV.6: Etats de l'environnement.	92
Fig. IV.7: Architecture de l'environnement.	93
Fig. IV.8: Modélisation de l'environnement.	94
Fig. IV.9: Architecture d'un agent de SYGMA.	97
Fig. IV.10: Exemple de test portant sur le calcul du critère de connaissances.	99
Fig. IV.11: Résultats des tests sur le critère K.	101
Fig. IV.12: Résultats de la 1ère série de tests.	103
Fig. IV.13: Résultats obtenus à la deuxième série de tests, sur des arbres à 13 noeuds.	105
Fig. IV.14: Résultats de la troisième série de tests.	107
Fig. IV.15: Plan de réalisation de la tâche T1.	116
Fig. IV.16: Plan de réalisation de la tâche T2.	117
Fig. V.1: Fonctionnement de l'architecture de l'agent selon la situation.	126
Fig. V.2: Cycles Perception-Cognition-Action aux niveaux Système et Agent.	126
Fig. V.3: Représentation de quelques unes des modifications à apporter à SYGMA	128
Fig. V.4: Apprentissage de l'agent assistant personnel.	130
Fig. V.5: Un exemple simplifié de système multi-agents humains et artificiels.	132

Index des tableaux

Tableau I.1: Les agents cognitifs vs réactifs [Reichgelt 90].	16
Tableau I.2: Classification des éléments étudiés.	18
Tableau II.1: Tableau comparatif de cinq formes de classification des organisations.	45
Tableau II.2: Récapitulatif des conclusions énoncées par Malone.	47
Tableau II.3: Evaluations d'organisations.	50
Tableau IV.1: Caractéristiques globales de SYGMA.	87
Tableau IV.2: Tests sur K.	100
Tableau IV.3: 1ère série de tests sur A et R.	102
Tableau IV.4: 2ème série de tests sur A et R.	104
Tableau IV.5: 3ème série de tests sur A et R'.	107
Tableau IV.6: L'organisation est une hiérarchie	111
Tableau IV.7: L'organisation est une communauté	112
Tableau IV.8: L'organisation est un marché	112
Tableau IV.9: L'organisation est une société	113

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00904707