

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mentouri Constantine



Faculté des Sciences de L'ingénieur
Département d'Informatique

N° Ordre:

N° Série:

THÈSE

POUR OBTENIR LE DIPLÔME DE
DOCTORAT EN SCIENCES

LES SYSTEMES MULTI-AGENTS DYNAMIQUEMENT ADAPTABLES

Par

Imane BOUSSEBOUGH ép. BOUGHERRA

Soutenue le, 06/07/2011

Devant le Jury :

Pr M.BENMOHAMMED	Professeur à l'Université Mentouri Constantine	Président de Jury
Dr R. MAAMRI	Maitre de Conférences à l'Université Mentouri Constantine	Rapporteur
Pr N. ZAROUR	Professeur à l'Université Mentouri Constantine	Examineur
Dr O.KAZAR	Maitre de conférence à l'Université de Biskra	Examineur
Dr F.MOKHATI	Maitre de Conférences à l'Université d'Oum el Bouaghi	Examineur

Résumé

Ce travail de recherche porte sur les systèmes multi-agents adaptatifs. Les systèmes adaptatifs constituent actuellement un domaine à part entière en intelligence artificielle distribuée. En effet, la complexité des environnements et des systèmes informatiques actuels nécessite la conception de systèmes dotés de capacités d'adaptation c'est-à-dire qui sont aptes à évoluer dynamiquement et de manière autonome. Dans cette thèse nous proposons une approche de systèmes multi-agents adaptatifs, nous nous intéressons aux systèmes multi-agents coopératifs composés d'agents qui partagent les mêmes buts, tels que les sociétés d'agents ayant des intérêts communs ou les sociétés d'agents dont les compétences sont complémentaires.

Nous proposons une approche d'adaptation qui consiste à maintenir un degré acceptable de coopération dans le système se basant sur l'évolution de l'organisation et l'évaluation des interactions entre les différents agents. A un niveau local, ces derniers observent les perturbations que peut rencontrer le système et ce par évaluation des interactions avec leurs accointances et procèdent par conséquent à un ajustement des liens qui les unissent, un processus de réorganisation est alors observé. Cette vision locale s'avère parfois insuffisante, comme il est le cas des systèmes communautaires, nous proposons un niveau d'adaptation global complémentaire basé sur les algorithmes génétiques et dont le but est de produire une structure organisationnelle coopérative.

Nous nous sommes, par la suite, intéressés aux systèmes de filtrage d'informations faisant partie d'un domaine de recherche en plein expansion à savoir les systèmes communautaires et réseaux sociaux, nous avons essayé d'illustrer sur un SMA adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents les différents aspects de notre approche. Enfin, des expérimentations de cette approche ont été menées principalement dans deux travaux d'implémentation, nous avons réalisé une simulation d'un SMA adaptatif où l'on a essayé d'analyser le niveau global d'adaptation, et une application de filtrage collaboratif de documents où l'on a essayé d'illustrer le processus de réorganisation locale et globale.

En perspective à cet humble travail, nous souhaitons nous intéresser d'avantage à l'aspect social dans les SMA et mettre en place une plate-forme basée sur cette approche permettant la conception des SMA sociaux adaptatifs.

Abstract

This research focuses on adaptive multi-agent systems. Adaptive systems are currently an important field in distributed artificial intelligence. Complexity of environments and existing computer systems requires the design of systems with adaptive capacity able to evolve dynamically and autonomously. In this thesis, we propose an approach of adaptive multi-agent systems, we are interested in cooperative multi-agent systems composed of agents who share the same goals, such as societies of agents with common interests or agents with complementary of competences. Our goal of adaptation is to maintain an acceptable degree of cooperation in the system based on organizational evolution and interactions evaluation. At a local level, agents observe the system disturbances, evaluate interactions with their acquaintances and therefore proceed to an adjustment of relationships between them, a process of reorganization is then observed. The local vision is sometimes insufficient, as is the case of community systems, we offer a global level adaptation based on genetic algorithms, whose goal is to produce a cooperative organizational structure. We are, thereafter, interested in information filtering systems that are part of a research area of community systems and social networks, we have

tried to illustrate on an adaptive MAS for collaborative filtering the various aspects of our approach. Finally, experiments of this approach were conducted in two main implementation works: a simulation of an adaptive MAS where we tried to analyze the global level of adaptation and an application of collaborative filtering where we tested the process of reorganizing local and global.

In perspective to this work, we will focus more on social aspect in MAS and we will implement a platform based on this approach. The plat-form will be dedicated to design social adaptive MAS.

ملخص

هذا البحث يركز على التكيف في الأنظمة متعددة الوكلاء. تعتبر نظم التكيف حاليا حقل بحث كامل في مجال الذكاء الاصطناعي الموزع. والواقع أن تعقد البيئات والنظم الحاسوبية القائمة يتطلب تصميم نظم قادرة على التكيف بشكل مستقل. في هذه الرسالة نقترح نهج لتكيف الأنظمة متعددة الوكلاء، ونحن مهتمون أساسا بالأنظمة متعددة الوكلاء التعاونية المكونة من وكلاء يشتركون في نفس الأهداف إما بمصالح مشتركة أو بمهارات متكاملة. ونحن نقترح نهجا للتكيف بالحفاظ على درجة مقبولة من التعاون في النظام يقوم على التطوير التنظيمي وتقييم التفاعلات بين مختلف العملاء. على المستوى المحلي، العملاء يلاحظون الاضطرابات التي يواجهها النظام ويقيموا التفاعلات مع معارفهم وبالتالي يقوموا بتسوية العلاقات بينهم، تلاحظ بعد ذلك عملية إعادة التنظيم. الرؤية المحلية غير كافية في بعض الأحيان، كما هو الحال بالنسبة لأنظمة المجتمع، ونحن نقدم مستوى التكيف الشامل على أساس الخوارزميات الجينية، التي تهدف إلى إنتاج هيكل تعاوني تنظيمي. بعد ذلك، اهتمنا بأنظمة التصفية المعلوماتية التي تشكل جزءا من منطقة الأبحاث التي تتوسع بسرعة، لتوضيح مختلف جوانب نهجنا. أجرينا أخيرا، التجارب على هذا النهج في اثنين من الأعمال التنفيذية، وهو نظام التكيف حيث حاولنا تحليل المستوى العام للتكيف وثاني تطبيق للتصفية التعاونية للوثائق التي حاولنا توضيح عملية إعادة تنظيم المحلية و الشاملة. و تبعا لهذا العمل، نود أن نركز أكثر على الجانب الاجتماعي في الأنظمة.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Professeur Zaidi SAHNOUN et Docteur Ramdane MAAMRI d'avoir accepté de m'accorder une partie de leur temps précieux pour être rapporteurs de cette thèse. Leurs questions et remarques ont été pour moi une grande source de réflexion.

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Professeur Mohamed BENMOHAMMED qui préside ce jury, Professeur Nacereddine ZAROOUR, Docteur Okba KEZZAR et Docteur Farid MOKHATI qui ont accepté d'examiner cette thèse.

Je remercie tous les membres de l'équipe GL&IA pour la collaboration que nous avons menée depuis quelques années, je tiens à citer particulièrement mon amie et ma collègue Samira Hammoud.

Je remercie également tous les membres du laboratoire LIRE pour l'ambiance et le climat chaleureux qui y ont toujours existé.

Un remerciement particulier pour Adla, Aicha, Chafia, Chahinez, Faiza, Fatiha. B, Fatiha.K, Fatima, Ilhem, Meriem, Nadia.B, Nadia.C, Nadia.Z, Raida, Razika, Salima, Samia.

Je voudrais remercier Professeur Dalila NAIMI du département de biologie de l'Université Mentouri de Constantine pour toutes les discussions que nous avons eu sur les sciences du vivant.

Je remercie Docteur Nadia MESSACI du département d'architecture de l'Université Mentouri de Constantine pour ses encouragements.

Je n'oublie pas les étudiants que j'ai eu le plaisir d'encadrer, d'abord pour la confiance qu'ils m'ont accordée et pour les richesses qu'ils m'ont apportés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Je remercie, tous ceux qui m'ont accompagné au cours de toutes ces années, famille et amis, et qui m'entourent tous les jours de leur affection attentionnée :

- Toute ma famille et en premier lieu mes parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien permanent ; mes frères et sœurs Salah, Yacine, Kheiro, Hamza, Chahrazed, Asma, Sonia, mes petites nièces que j'aime beaucoup ;
- Ma belle famille et en premier lieu mes beaux parents, Khellil, Boubaker, Nabila, Nadira et Gamra pour leur affection ;

Enfin, je remercie tout particulièrement Driss, Khaled et Mouad pour leur présence chaleureuse et pour leur patience durant ces années de thèse et surtout durant cette dernière année de rédaction.

Table des matières

Chapitre I Introduction	1
1.1. Problématique générale	2
1.2. Motivations, proposition et approche	3
1.3. Plan de la thèse	4
Chapitre II Agents et systèmes multi-agents	7
2.1. Introduction	8
2.2. Agent	9
2.2.1. Définitions	9
2.2.2. Typologie des agents	11
2.2.2.1. Selon la nature	11
2.2.2.2. Selon l'utilisation	13
2.2.2.3. Selon la technologie employée	13
2.3. Système multi-agents	13
2.3.1. Définitions	14
2.3.2. Environnement	15
2.3.2.1. Définition	15
2.3.2.2. Propriétés des environnements	16
2.3.3. Propriétés attendues des SMA	16
2.3.3.1. Rationalité	16
2.3.3.2. Autonomie	17
2.3.4. Typologie des SMA	17
2.3.4.1. SMA cognitifs	18
2.3.4.2. SMA réactifs	18
2.3.4.3. Espace SMA	18
2.3.5. Domaines d'application des SMA	20

2.4. Communication dans les SMA	20
2.4.1. Définition	20
2.4.2. Types de communication	21
2.4.2.1. Communication indirecte	21
2.4.2.2. Communication directe	21
2.5. Interactions dans les SMA	22
2.5.1. Définition	22
2.5.2. Coopération	23
2.6. Organisations dans les systèmes multi-agents	24
2.6.1. Définition	25
2.6.2. Types d'organisation	25
2.7. Conclusion	27
Chapitre III Adaptation dans les systèmes multi-agents	28
3.1. Introduction	29
3.2. Principes et définitions	30
3.2.1. Définition	31
3.2.2. De l'adaptable à l'adaptatif	32
3.2.3. Quelques travaux sur l'adaptation	33
3.2.4. Synthèse et bilan	36
3.3. L'auto-organisation	37
3.3.1. Définition	38
3.3.2. Mécanismes d'auto-organisation	38
3.4. Les algorithmes génétiques	39
3.4.1. Principes fondamentaux des AGs	40
3.4.2. Vocabulaire utilisé	41
3.4.3. Concepts de base	42
3.4.3.1. Codage des chromosomes	42
3.4.3.2. Population initiale	43
3.4.3.3. Fonction d'évaluation ou fitness	44
3.4.3.4. Opérateurs génétiques	44
3.4.4. Fonctionnement d'un AG	47
3.4.4.1. Organigramme général	47

3.4.4.2. Choix des paramètres d'un AG	47
3.5. Conclusion	48
Chapitre IV Notre approche GAMuS : Genetic auto-Adaptive Multi-agent System	49
4.1. Introduction	50
4.2. GAMuS : vue d'ensemble	53
4.2.1. Systèmes coopératifs	53
4.2.2. Approche proposée	54
4.2.3. Notre modèle	56
4.3. Modèle des agents du système	58
4.3.1. Task Agents	58
1. Compétences	58
2. Description de l'environnement	59
3. Langage d'interaction	59
4. Perception de l'environnement et adaptation	59
4.3.2. Agent médiateur	60
1. Perception	60
2. Décision	60
3. Exécution	60
4.3.3. Croyances sur la coopération	61
4.3.3.1. Présentation	61
4.3.3.2. Initialisation des croyances	63
4.4. Adaptation	64
4.4.1. Evaluation de l'interaction	64
4.4.2. Détection des perturbations	67
4.4.3. Adaptation locale par correction des croyances	67
4.4.4. Adaptation globale par évolution génétique des structures organisationnelles	68
4.4.4.1. Evaluation des perturbations au niveau global	68
4.4.4.2. Algorithme génétique proposé	70
4.4.4.2.1. Codage des individus	70
4.4.4.2.2. Fonction de survie (fitness)	71

4.4.4.2.3. Processus global	72
4.5. Conception du système et algorithmes	73
4.5.1. Conception du système	73
4.5.2. Adaptation locale	74
4.5.3. Adaptation globale	74
4.5.4. Evaluation des individus	75
4.6. Conclusion	76
Chapitre V Etude de cas : Le filtrage collaboratif	77
5.1. Le filtrage collaboratif de documents : état de l'art	79
5.1.1. Introduction	79
5.1.2. Recherche et filtrage d'information	79
5.1.3. Recherche d'information	80
5.1.3.1. Définitions et principes	80
5.1.3.1.1. Notion de RI	80
5.1.3.1.2. Notion de profil	82
5.1.3.2. Modèles de recherche	82
5.1.3.2.1. Modèle booléen	82
5.1.3.2.2. Modèle vectoriel	83
5.1.3.2.3. Modèle probabiliste	84
5.1.3.3. Reformulation de requête : formule de Rocchio	85
5.1.4. Filtrage d'information	86
5.1.4.1. Définition	86
5.1.4.2. Modes de filtrage d'information	87
5.1.4.2.1. Filtrage basé sur le contenu	87
5.1.4.2.2. Filtrage collaboratif	88
5.1.4.2.3. Filtrage hybride	93
5.1.5. Conclusion	93
5.2. Un système multi-agent adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents	94
5.2.1. Introduction	94
5.2.2. Proposition	95

5.2.2.1 Le système proposé	95
5.2.2.2. Production des recommandations et adaptation	96
5.2.3. Description détaillée	97
5.2.3.1. Description des Task Agents	97
5.2.3.1.1. Compétences	97
5.2.3.1.2. Description locale de l'environnement	101
5.2.3.1.3. Langage d'interaction	101
5.2.3.1.4. Perception de l'environnement et adaptation	103
5.2.3.2. Architecture du système	103
5.2.3.3. Initialisation des croyances	104
5.2.3.3.1. Inscription d'un nouvel utilisateur	104
5.2.3.3.2. Quitter la communauté	106
5.2.3.3.3. Rejoindre une autre communauté	107
5.2.4. Conclusion	107
Chapitre VI Application et évaluation	108
6.1. Introduction	109
6.2. Environnement logiciel	110
6.2.1. Description	110
6.2.2. Architecture générale	110
6.3. Une simulation d'un système multi-agents auto-adaptatif	111
6.4. Un système multi-agents auto-adaptatif pour le filtrage d'informations	118
6.5. Conclusion	120
Chapitre VII Conclusion et perspectives	121
7.1. Conclusion et bilan	122
7.2. Perspectives et travaux futurs	124
Bibliographie	126

Table des Figures

FIGURE 2.1. L'agent et son environnement.	10
FIGURE 2.2. Structure classique d'un agent.	11
FIGURE 2.3. Système multi-agents et environnement [Ferber 95].	14
FIGURE 2.4. Positionnement d'un agent dans le monde.	15
FIGURE 2.5. Espace SMA [El Fellah 06].	19
FIGURE 2.6. Communication indirecte.	21
FIGURE 2.7. Communication directe.	21
FIGURE 3.1. Représentation binaire d'un individu.	43
FIGURE 3.2. Représentation réelle d'un individu.	43
FIGURE 3.3. Représentation du croisement simple à un point	45
FIGURE 3.4. Représentation du croisement à 2 points	45
FIGURE 3.5. Représentation du Croisement uniforme.	46
FIGURE 3.6. Représentation de mutation binaire	46
FIGURE 3.7. Organigramme général d'un AG.	47
FIGURE 4.1. Evolution du système.	52
FIGURE 4.2. Modèle d'adaptation.	55
FIGURE 4.3. Evolution génétique du système.	56
FIGURE 4.4. Système multi-agents adaptatif dans notre modèle.	58
FIGURE 4.5. Modèle d'un Agent Task.	60
FIGURE 4.6. Modèle de l'agent médiateur.	61
FIGURE 4.7. Variation des CC en fonction de la coopération	62
FIGURE 4.8. Représentation d'une structure organisationnelle par une table globale de croyances sur la coopération.	63
FIGURE 4.9. Structure du chromosome dans l'AG	70
FIGURE 4.10. Processus évolution / évaluation du système.	71
FIGURE 4.11. Processus d'évolution génétique.	72
FIGURE 5.1. Processus en U de la recherche d'information [Tamine et al. 05]	81
FIGURE 5.2. Processus du filtrage d'information [Lopez 05].	86
FIGURE 5.3. Principe du filtrage collaboratif [Nguyen 06].	89

FIGURE 5.4. Evaluations explicites dans un système de filtrage collaboratif	90
FIGURE 5.5. Vue globale du système	96
FIGURE 5.6. Le système comme ensemble de communautés.	96
FIGURE 5.7. Processus de Recherche d'information personnalisée.	99
FIGURE 5.8. Diagramme d'interaction illustrant les interactions possibles et leurs évaluations respectives.	103
FIGURE 5.9. Architecture générale du Système.	104
FIGURE 6.1. Architecture de la plate-forme JADE.	111
FIGURE 6.2. Un système auquel ont adhéré 8 agents.	112
FIGURE 6.3. Processus de sélection / évaluation d'un individu.	113
FIGURE 6.4.a. Interactions échangées entre les TAs avec des signaux de perturbation envoyés à l'agent médiateur.	114
FIGURE 6.4.b. Interactions entre les TAs et l'agent médiateur au début du processus d'adaptation global.	114
FIGURE 6.4.c. Interactions entre les TAs et l'agent médiateur durant le processus de sélection /évaluation.	115
FIGURE 6.5. Evolution du taux de non coopération dans l'adaptation globale.	116
FIGURE 6.6.a. Interface d'inscription et de définition du profil.	118
FIGURE 6.6.b. Espace personnel d'un utilisateur	118
FIGURE 6.7. Architecture globale du système de filtrage sous JADE.	119
FIGURE 6.8. Le Sniffer illustrant un nouvel utilisateur qui rejoint le système et communique avec des TAs de la communauté qui l'intéresse.	120

Chapitre I

Introduction

Chapitre I

Introduction

« Quand plusieurs personnes sont rassemblées avec esprit de coopération, alors un groupe ou une équipe est en train de naître. Le potentiel d'un groupe est très souvent plus grand que la somme des contributions de ses membres. » [Akola et al. 06]

1.1. Problématique générale

La notion d'agent et de système multi-agents (SMA) est relativement récente en informatique, mais elle tend à prendre de plus en plus d'importance. Ce domaine est né au début des années 80, de l'idée de distribuer les connaissances et le contrôle dans les systèmes d'Intelligence Artificielle. Il offre aujourd'hui une alternative intéressante pour la conception, la mise en œuvre ou la simulation et la compréhension de systèmes coopératifs, distribués et ouverts. En effet, l'approche par agents recouvre plusieurs domaines bien différents mais complémentaires à savoir : la résolution des problèmes en intelligence artificielle distribuée où l'on s'intéresse à une vision sociale de la pensée, les systèmes adaptatifs où les problèmes relèvent des domaines sociaux avec leur complexité organisationnelle, le génie logiciel pour l'évolution vers des composants logiciels de plus en plus autonomes et proactifs. Notons que d'autres domaines tels que la vie artificielle, la biologie, la sociologie, les sciences cognitives, etc., ont beaucoup apporté à cette discipline.

Cependant, l'ouverture et la complexité sont des propriétés inhérentes des systèmes informatiques actuels, elles ne sont voulues par personne mais c'est un état des choses que l'on ne peut plus se permettre d'ignorer. En effet, ces systèmes sont plongés dans des environnements qui changent dynamiquement de manière imprévue. Dans de tels environnements une question importante est comment doivent réagir les systèmes face aux situations inattendues. La faculté d'adaptation devient, par conséquent, de plus en plus importante et nécessaire dans de tels systèmes fonctionnant dans des

environnements dynamiques et stochastiques et qui ne peuvent être complètement connus ou décrits à l'avance. Les systèmes multi-agents adaptatifs apportent, dans ce cadre, des solutions intéressantes et prometteuses et constituent actuellement un domaine à part entière en intelligence artificielle distribuée. Notre travail de recherche se situe dans cet axe, où l'on s'est intéressé particulièrement aux systèmes multi-agents coopératifs.

1.2. Motivations, proposition et approche

Comme nous l'avons déjà précisé, la complexité des environnements et des systèmes informatiques actuels nécessite la conception de systèmes dotés de capacités d'adaptation c'est-à-dire qui sont aptes à faire face aux changements imprévus de leur environnement et évoluer et maintenir leur équilibre de manière autonome. En d'autres termes le système doit réagir et se maintenir sans aucune intervention externe. Toutefois, un système adaptatif doit être aussi capable d'identifier les circonstances de perturbations qu'il rencontre durant son fonctionnement. Comme le souligne plusieurs chercheurs dans ce domaine, l'adaptation dynamique peut être structurelle ou comportementale, la première correspond à un changement organisationnel incluant un comportement organisationnel proactif, la deuxième correspond à une régulation des aptitudes comportementales et communicationnelles, et ce dans le but d'améliorer la performance globale du système.

Nous soulevons deux questions importantes, comment un système adaptatif doit-il identifier les perturbations qui l'entourent ? et, quel est le mécanisme d'adaptation adéquat qu'il faudra proposer ?

Nous proposons, dans cette thèse, une approche d'adaptation des systèmes multi-agents se basant sur l'évolution de l'organisation et l'évaluation des interactions entre les différents agents. Nous nous intéressons particulièrement aux systèmes multi-agents coopératifs. En effet, la coopération est une attitude sociale assez importante et se voit augmenter, dans les sociétés humaines ou artificielles, la performance globale. On coopère tout simplement parce que nos capacités sont limitées. Les systèmes que nous considérons sont composés d'agents coopératifs qui partagent les mêmes buts, ont des intérêts communs ou ont des compétences complémentaires, tels que :

- les sociétés d'agents partageant les mêmes centres d'intérêts comme les systèmes de e-Learning, de filtrage d'informations, de recommandations, travail collaboratif ...
- sociétés où les agents doivent se compléter dans la réalisation de la tâche (complémentarité de compétences) tels que les systèmes de production, l'entreprise virtuelle, reconnaissance de formes

Notre approche d'adaptation consiste à maintenir un degré acceptable de coopération entre les agents du système. En fait, les agents du système évoluent, leurs intérêts

(respectivement leurs compétences) ainsi que leurs besoins en coopération évoluent dans le temps; face aux perturbations résultant de ces changements le système se réorganise dans le but de faire évoluer sa structure organisationnelle vers une structure organisationnelle coopérative.

L'identification des situations de perturbations rencontrées par le système est une étape très importante dans le processus d'adaptation, nous proposons de nous baser sur l'évaluation des interactions des différents agents entre eux. A leur niveau local, les différents agents évaluent leurs interactions avec leurs accointances (qui sont dans ce cas des agents partageant les mêmes intérêts), et procèdent par conséquent à un ajustement des liens qui les relient, un processus d'auto-organisation est alors observé. La vision locale des agents s'avère parfois insuffisante, comme il est le cas des systèmes communautaires, nous proposons un deuxième niveau d'adaptation global complémentaire basé sur les algorithmes génétiques et dont le but est de chercher à produire une structure organisationnelle coopérative. Les algorithmes génétiques ont montré leur efficacité dans plusieurs problèmes complexes et c'est pourquoi nous allons les appliquer à un problème d'auto-organisation.

Nous nous sommes, par la suite, intéressés aux systèmes de filtrage d'informations faisant partie d'un domaine de recherche en plein expansion à savoir les systèmes communautaires et les réseaux sociaux. Le filtrage collaboratif se base sur l'hypothèse que les gens à la recherche d'information devraient pouvoir se servir de ce que d'autres, partageant les mêmes intérêts, ont déjà trouvé et évalué. En effet, le travail en groupe et la coopération entre personnes distantes dans un cadre professionnel sont des facteurs essentiels à la survie de toute communauté sociale. Un système de filtrage collaboratif de documents est un système composé d'agents coopératifs regroupés par centres d'intérêts, c'est ainsi qu'émerge la notion de communautés. Nous avons essayé d'illustrer sur *un système multi-agent adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents* les différents aspects de notre approche.

Enfin, des expérimentations de cette approche ont été menées principalement dans deux travaux d'implémentation, nous avons réalisé une simulation d'un SMA adaptatif où nous avons essayé d'analyser le niveau global d'adaptation, et une application de filtrage collaboratif de documents où l'on a essayé d'illustrer le processus de réorganisation locale et globale.

En perspective à cet humble travail, nous souhaitons nous intéresser d'avantage à l'aspect social dans les SMA et mettre en place une plate-forme basée sur cette approche permettant la mise en œuvre des SMA sociaux adaptatifs.

1.3. Plan de la thèse

Cette thèse est composée principalement de deux parties, dont la première présente un état de l'art du domaine et la deuxième concerne principale nos contributions.

Chapitre II – Agents et systèmes multi-agents

Ce chapitre donne quelques définitions sur les agents et les systèmes multi-agents et leur environnement. Les concepts de communication, de coopération et d'interaction qui nous intéressent dans notre travail seront par la suite présentés.

Chapitre III – Adaptation dans les systèmes multi-agents

Nous nous intéressons dans ce chapitre à des concepts essentiels pour notre proposition. Nous définissons l'adaptation et l'auto-organisation. Nous mettons l'accent sur les algorithmes génétiques qui peuvent être vus comme processus d'adaptation.

Chapitre IV – Notre approche GAMuS : Genetic auto-Adaptative Multi-agents Systems.

Ce chapitre constitue le cœur de notre contribution. Il présente de manière approfondie les bases de notre travail, en commençant par énoncer les motivations de l'utilisation de cette approche. Ensuite, nous expliquons les différents points clés de l'adaptation à savoir l'identification des circonstances de perturbations par évaluation d'interactions, ensuite les mécanismes d'adaptation au niveau local et au niveau global proposés. Nous terminerons par la présentation des différents algorithmes de l'approche.

Chapitre V - Etude de cas : Le filtrage collaboratif.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à une étude cas où l'on fait le point sur les problèmes de filtrage collaboratif de documents. Nous présentons d'abord un état de l'art sur le filtrage collaboratif de documents, nous en tirons les propriétés de ce type de systèmes nécessitant la mise en œuvre de systèmes coopératifs et adaptatifs.

Nous décrivons par la suite un SMA auto-adaptatif basé sur GAMuS dédié au filtrage collaboratif de documents. Nous illustrons les différents aspects de l'approche proposée dans cette étude.

Chapitre VI - Applications et évaluation.

Nous présentons dans ce chapitre les deux applications que nous implémenté durant ce travail. Une première où nous expérimentons sur une simulation d'un système multi-

agents l'évaluation des interactions et la performance de l'adaptation globale par l'algorithme génétique.

La seconde application est une application plus concrète. Elle concerne le problème du filtrage collaboratif où l'on a expérimenté par la mise en œuvre du système décrit dans le chapitre V de l'adaptation aux deux niveaux local et global ainsi que la prise en compte de l'ouverture du système.

Chapitre VII - Conclusion et perspectives.

La thèse s'achève par un bilan général, rappelant les problèmes que nous avons traités. Nous en déduisons un ensemble de perspectives pouvant être développées par la suite, ouvrant ainsi de nouvelles voies et propositions dans le but d'améliorer ce travail.

Chapitre II

Agents et systèmes multi-agents

Chapitre II

Agents et systèmes multi-agents

Agent vient de 'agir' : un agent est donc une entité susceptible d'action.

[Ganascia 06]

2.1. Introduction

La notion d'agent et de système multi-agents (SMA) est relativement récente en informatique, mais elle tend à prendre de plus en plus d'importance. Ce domaine est né au début des années 80, de l'idée de distribuer les connaissances et le contrôle dans les systèmes d'Intelligence Artificielle. Il offre aujourd'hui une alternative intéressante pour la conception, la mise en œuvre ou la simulation et la compréhension de systèmes coopératifs, distribués et ouverts [Ferber 06], [Sycara 98], [Nguyen et al. 07]. En effet, l'approche par agents recouvre plusieurs domaines bien différents mais complémentaires à savoir : la résolution des problèmes en intelligence artificielle distribuée où l'on s'intéresse à une vision sociale de la pensée (pouvoir raisonner sur les connaissances et capacités de soi-même et des autres), les systèmes adaptatifs où les problèmes relèvent des domaines sociaux avec leur complexité organisationnelle, le génie logiciel pour l'évolution vers des composants logiciels de plus en plus autonomes et proactifs. Notons que d'autres domaines tels que la vie artificielle, la biologie, la sociologie, les sciences cognitives, etc., ont beaucoup apporté à l'approche agent [Vidal 06].

La motivation du domaine des SMA est d'essayer de réaliser des entités artificielles (des programmes, des robots) qui interagissent entre elles et avec leur environnement. Une attention particulière est alors portée sur l'aspect multi-agents. Le passage de l'individu (l'agent) au collectif (le système multi-agent) a nécessité l'extension et la généralisation de divers concepts issus de l'intelligence artificielle tels que

l'apprentissage multi-agent, le raisonnement sur les connaissances de groupes ou encore la décision collective [El Fellah 06].

L'importance des SMA repose sur trois concepts fondamentaux :

- l'autonomie de l'activité d'un agent, c'est-à-dire sa capacité d'exécuter une action de sa propre initiative afin d'atteindre une plus grande satisfaction ;
- la sociabilité des agents, c'est-à-dire le fait qu'ils agissent en relation avec d'autres agents dans une perspective sociale ;
- l'interaction qui est une mise en relation de deux ou plusieurs agents et qui permet à des structures organisées d'apparaître.

Du fait de cette diversité d'influences, il n'est pas surprenant que, encore aujourd'hui, les notions d'agent et de système multi-agents n'aient pu faire l'objet d'un consensus complètement établi, comme le remarquent Jennings et al. [Jennings et al. 98].

2.2. Agent

Il n'y a pas une notion d'agent unique, car le terme *agent* est utilisé dans de très différentes applications par des communautés venant d'horizons divers. En informatique même, le terme agent est « pluridéfini » puisqu'on trouve dans la littérature une multitude de définitions. Elles se ressemblent toutes, mais elles n'ont pas abouti à une définition consensuelle. Nous présentons dans ce qui suit les plus utilisées :

2.2.1. Définitions

Définition 1 [Ferber 95]

On appelle agent une entité physique ou virtuelle

a) qui est capable d'agir dans un environnement,

b) qui peut communiquer directement avec d'autres agents,

c) qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),

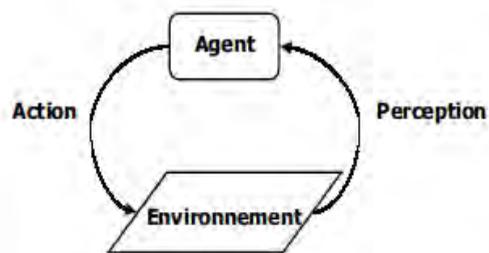
d) qui possède des ressources propres,

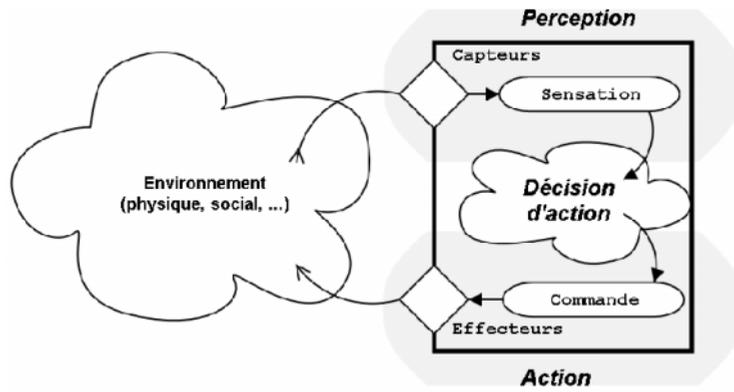
e) qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,

f) qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),

g) qui possède des compétences et offre des services,

h) qui peut éventuellement se reproduire,





Les agents réactifs : souvent qualifiés de peu intelligents, les agents réactifs possèdent une représentation très simplifiée de leur environnement. Leurs capacités consistent à réagir uniquement en mode stimulus/ action vu comme une forme de communication (ou perception) [Jarras et al 02]. Un SMA constitué d'agents réactifs possède généralement un grand nombre d'agents (des milliers) et le succès, dans ce type de systèmes, porte sur l'émergence d'un comportement collectif intelligent. Bien que très simples dans leur conception, un ensemble d'agents réactifs peut avoir un comportement complexe ; il s'agit de l'émergence d'un comportement. Ainsi, par exemple un système multi-agents reproduisant le comportement de fourmis pour trouver le chemin le plus rapide entre deux points d'un réseau dont le nombre de nœuds et de passerelles est inconnu fait émerger une intelligence collective dans son comportement.

Les agents cognitifs : possèdent une représentation (partielle mais sophistiquée) de leur environnement, ont des buts explicites et sont capables de planifier leur comportement, de mémoriser leurs actions passées, de communiquer par envoi de messages ou via des langages d'interaction élaborés, de négocier, etc. Un SMA constitué d'agents cognitifs possède généralement un nombre restreint d'agents (des dizaines). Les agents cognitifs peuvent être intentionnels (dotés d'attitudes intentionnelles telles que les croyances, les désirs et les intentions), rationnels (agissant selon une rationalité donnée telle que la rationalité économique), normés (agents évoluant dans un système doté de normes sociales), etc.

L'une des architectures cognitives les plus connues est sans doute l'architecture BDI : Belief (Croyance), Desire (Désir), Intention (Intention) qui comme son nom l'indique, est basée sur les notions d'attitudes mentales que sont la croyance, le désir et l'intention :

- Les croyances correspondent aux informations dont dispose l'agent sur son environnement.
- Les désirs correspondent aux états de l'environnement que l'agent souhaiterait voir réalisés.
- Les intentions correspondent aux projets de l'agent pour satisfaire ses désirs.

Agents hybrides : d'autres types d'agents qualifiés d'hybrides, utilisant donc ces deux types de comportement, sont ensuite apparus. Les agents hybrides intègrent l'aspect cognitif et réactif. L'idée est de combiner les deux types d'approches qui peuvent être vues comme complémentaires. Dans une telle architecture un agent est composé de modules qui gèrent indépendamment la partie réactive et la partie cognitive. Le problème central reste de trouver le mécanisme idéal assurant cette combinaison.

Partageant l'opinion d'un nombre croissant de chercheurs en IA, nous croyons que ni les architectures réactives, ni les architectures cognitives n'offrent la solution unique. En fonction du contexte, certaines architectures sont plus adaptées que d'autres.

Le choix du ou des types d'agents à utiliser dépend en fait du système multi-agents le plus pertinent pour le problème à résoudre. Ainsi, certains SMA n'utilisent qu'un seul type d'agents regroupés par objectif, d'autres plusieurs types correspondant à des rôles précis nécessaires à la résolution.

2.2.2.2. Selon l'utilisation

Agents collaboratifs : Ces agents ont des capacités de coopération. Un regroupement de ces agents permet, entre autres, de réduire un problème complexe en sous-problèmes moins complexes.

Agents d'interface : Ces agents collaborent avec l'utilisateur pour effectuer certaines tâches telles que les activités de bureautique, les systèmes tuteurs intelligents qui doivent faciliter l'apprentissage et diminuer la surcharge cognitive chez l'apprenant.

Agents pour la recherche d'informations : Ces agents effectuent, en premier lieu, une recherche d'informations parmi une collection de données et, en second lieu, procèdent à une analyse des informations utiles trouvées afin de découvrir de nouvelles connaissances.

Agents pour le commerce électronique : La montée de l'Internet a bien entendu créé de nouvelles nécessités. Les agents issus de cette tendance permettent la promotion, la vente ainsi que l'achat de produits et de services par l'entremise des réseaux informatiques, etc.

Agents conversationnels animés : ce sont des interfaces de dialogue entre des utilisateurs et des systèmes d'information. Ils se déploient sur des sites Internet, notamment des sites marchands. Ils sont pourvus de bases de dialogues correspondant aux contextes d'interaction dans lesquels ils agissent.

Agents guide ou assistants : ce type d'agents essayent de suggérer des sites susceptibles d'intéresser l'utilisateur, en observant son comportement sur Internet. Le principe est assez simple. Généralement les sites que l'on visite sur Internet reflètent les goûts ou les besoins de l'utilisateur. Ainsi, en analysant ses habitudes de navigation, un « agent assistant » tente d'apprendre des habitudes de son utilisateur et de lui suggérer des sites en relation avec ce qu'il désire.

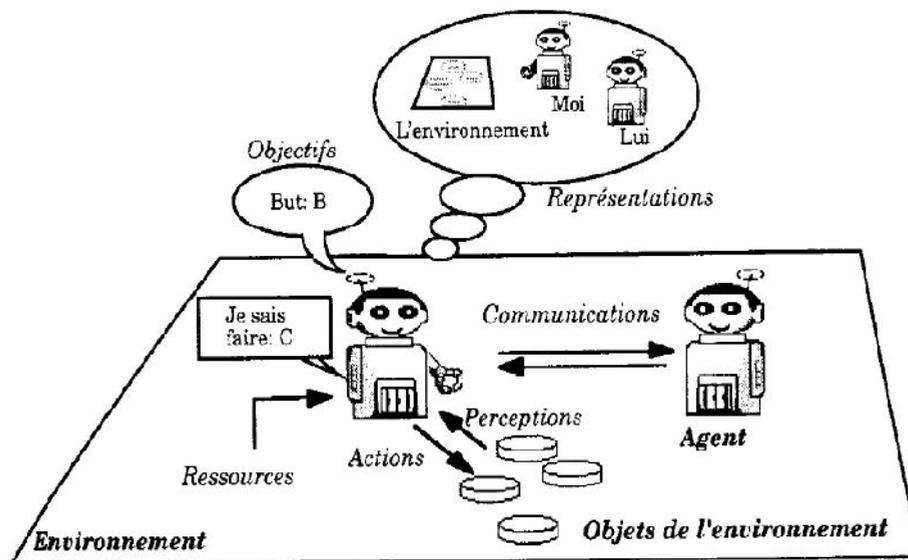
2.2.2.3. Selon la technologie employée

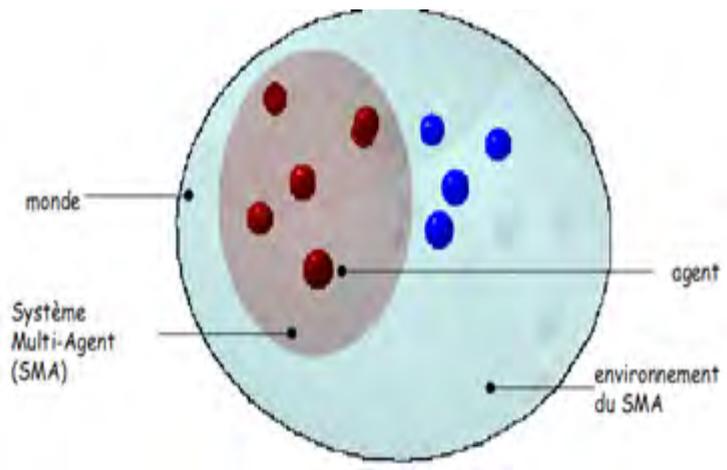
Agents stationnaires: Il s'agit du cas où l'agent s'exécute toujours sur la même machine.

Agents mobiles : Ces agents s'exécutent sur différentes machines en se promenant d'un hôte à l'autre. Typiquement, ils suivent ce que l'on appelle un « itinéraire ».

2.3. Systèmes multi-agents

Au premier abord, un système multi-agents peut d'une manière simpliste être considéré comme un ensemble d'agents partageant un environnement commun. Certes, la notion d'environnement est primordiale dans un système multi-agents mais





décomposé en deux parties. L'environnement social qui est composé des autres agents du système et l'environnement physique au sein duquel les agents évoluent.

2.3.2.2. Propriétés des environnements

La nature de l'environnement ainsi que ses propriétés influent de manière considérable les actions de l'agent, nous présentons dans ce qui suit les propriétés [Russel et al. 06] les plus importantes:

Entièrement observable par opposition à partiellement observable : si l'agent a accès à la totalité de l'environnement à tout moment, ce dernier est dit entièrement observable ; l'agent peut obtenir dans ce cas une information complète, exacte et à jour sur l'état de son environnement. Dans un environnement partiellement observable ou inaccessible, seule une information partielle est disponible.

Déterministe par opposition à non déterministe ou stochastique : si l'état suivant de l'environnement est complètement déterminé par l'état courant et par l'action qu'exécute l'agent, on dit que l'environnement est déterministe ; sinon, il est stochastique. Dans un environnement non déterministe, une action n'a pas un effet unique garanti. Toutefois, si l'environnement est partiellement observable, il pourra paraître stochastique.

Dynamique par opposition à statique : si l'environnement peut changer alors qu'un agent est entrain de prendre une décision (délibérer), on dit qu'il est dynamique sinon il est statique. L'état de l'environnement dynamique dépend des actions du système qui se trouve dans cet environnement, mais aussi des actions d'autres processus. Ainsi, les changements ne peuvent pas être prédits par le système. Un environnement statique ne change pas sans que le système agisse.

Continu par opposition à discret : Le nombre d'actions et de perceptions possibles dans un environnement continu est infini et indénombrable. Dans le cas discret, l'environnement est défini par un nombre d'états.

Monoagent ou par opposition multi-agents : La distinction entre environnements mono-agents et multi-agents peut sembler relativement simple. Un agent qui résout un problème seul ne doit pas considérer les évènements et actions exercés par les autres agents.

2.3.3. Propriétés attendues des SMA

Le fait d'avoir plusieurs entités dans le système les propriétés en termes de rationalité et d'autonomie doivent être précisées.

2.3.3.1. Rationalité

Tout d'abord, la rationalité peut s'exprimer de manière différente selon les types de systèmes multi-agents:

- Pour certains systèmes, chaque agent dispose d'une rationalité propre et mesure de manière individuelle sa performance. Cette vision des choses est principalement compétitive, chaque agent cherche alors à maximiser ses gains (critères de performance) éventuellement au détriment des autres agents du système.
- D'autres systèmes s'intéressent à une mesure de performance globale : le système est caractérisé par une fonction globale de performance (éventuellement calculée à partir d'une combinaison de mesures de performance locales). La rationalité est forcément limitée puisque l'agent ne connaît pas le monde ni surtout le comportement des autres agents. Nous soulignons la présence de capacité sociale permettant d'estimer les comportements des autres agents pour agir au mieux par la suite. Les systèmes de cette catégorie seront intelligents, collectifs et coopératifs du fait qu'une mesure de performance globale caractérise les performances du système.

Nos travaux dans cette thèse se situent dans la deuxième catégorie, nous nous intéressons aux systèmes coopératifs dont la performance globale est réalisée par les performances locales perçues et mesurées au niveau des différents agents, cette performance dépend étroitement du degré de coopération dans le système.

2.3.3.2. Autonomie

La notion d'autonomie d'un agent s'exprime elle aussi de manière différente dans un système multi-agents :

- La définition de Russel et Norvig [Russel et al. 06] correspond à la capacité de l'agent à s'adapter à partir de ses expériences passées. Dans un système multi-agents, cette capacité inclut la capacité à s'adapter à l'environnement global du système mais aussi aux autres agents présents dont le comportement est inconnu et peut évoluer au cours du temps.
- Celle de Jennings [Jennings 00], implique que chaque agent décide de manière autonome de son action sans intervention extérieure. Cette définition implique que toute action émise dans le système est uniquement à l'initiative d'un agent.

Nous pouvons dire que l'autonomie dans un système multi-agents coopératif doit permettre à l'ensemble du système d'évoluer.

2.3.4. Typologie des systèmes multi-agents

De la même manière qu'il existe deux types principaux d'agents, on distingue les systèmes multi-agents en fonction du type des agents qui les composent. On compte ainsi deux grandes classes de systèmes à savoir les systèmes multi-agents cognitifs et les systèmes multi-agents réactifs.

2.3.4.1. Les systèmes multi-agents cognitifs

Ce sont des systèmes constitués d'agents cognitifs généralement en faible nombre. Leur étude est fondée sur l'idée que la construction de systèmes multi-agents « intelligents » peut se faire à partir d'agents dont les capacités de représentation sont complexes et pouvant disposer de processus de communication élaborés. De tels systèmes peuvent mettre en œuvre et tirer profit de mécanismes complexes de représentation des autres, de négociation et d'échanges d'information. Néanmoins cette approche se heurte au problème de la représentation des connaissances déjà présent pour des agents isolés. Toutefois, la représentation complexe des autres agents du système limite le nombre d'agents et peut mener à des raisonnements souvent coûteux. A cela, s'ajoute enfin la complexité des processus de communications entre agents.

2.3.4.2. Les systèmes multi-agents réactifs

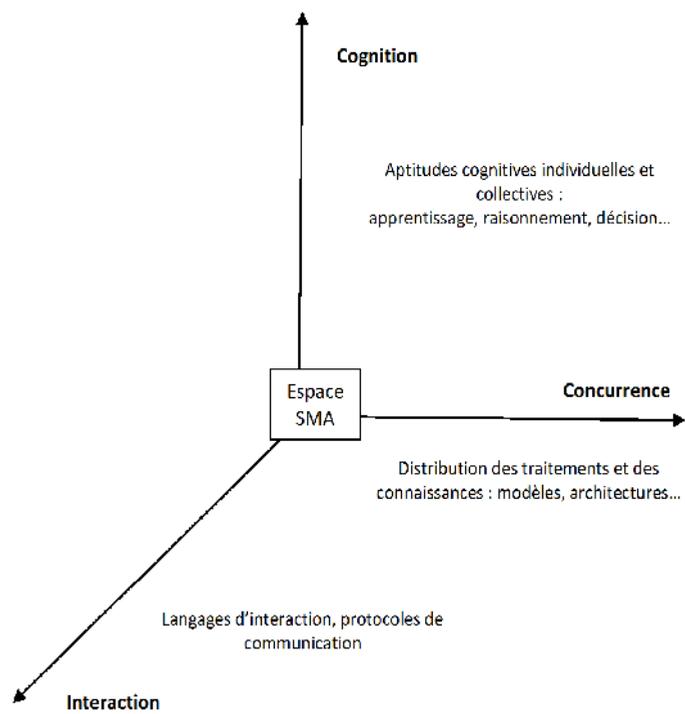
Ces systèmes sont composés d'agents réactifs souvent en grand nombre. De tels systèmes se basent sur l'hypothèse qu'il est possible de produire des comportements collectifs *intelligents complexes* malgré la simplicité des comportements individuels. Dans un système multi-agent, un comportement global complexe peut apparaître comme le résultat des interactions entre des composants simples en grande quantité. De nombreux phénomènes naturels peuvent s'expliquer de cette manière (par exemple systèmes inspirés des sociétés d'insectes comme les colonies de fourmis, les réseaux neuronaux, etc.). Les systèmes multi-agents réactifs présentent habituellement des intérêts en termes d'émergence de comportements intelligents, qui lui-même présente des difficultés de prédiction du comportement global non représenté explicitement dans le système et de contrôle des comportements individuels par rapport à un objectif non représenté explicitement.

Nous distinguons de plus les systèmes multi-agents *homogènes* et les systèmes multi-agents *hétérogènes* ; le premier type de systèmes concerne les systèmes composés d'agents de même type et donc de même architecture interne, le second type comme son nom l'indique inclue les systèmes composés d'agents d'architectures internes différentes. Notons que les systèmes actuels sont généralement hétérogènes [Moujahed 07].

2.3.4.3. Espace SMA

Les systèmes multi-agents constituent un espace qui s'articule autour de trois axes principaux et nécessaires pour la conception et la mise en œuvre de systèmes complexes :

- L'axe cognition fait référence aux aptitudes cognitives d'un agent telles que l'apprentissage, le raisonnement, la prise de décision, la planification autonome, etc... Ces aptitudes permettent aux agents de s'adapter aux changements de leur environnement. Cependant, les agents étant dans un environnement multi-agents, leurs capacités doivent être considérées dans un contexte collectif



2.3.5. Domaines d'application des SMA

Les applications des systèmes multi-agents couvrent de plus en plus de domaines. Citons les systèmes d'information coopératifs, la simulation sociologique, les outils documentaires adaptés au Web, les robots autonomes coopératifs, jeux vidéo (multi-joueurs), résolution distribuée de problèmes, etc. Néanmoins les systèmes multi-agents développés actuellement peuvent être classés en trois catégories [Glizes 04], [Ferber 06], [Rejeb 05] :

- Les simulations dont l'objectif est la modélisation de phénomènes du monde réel, afin d'observer, de comprendre et d'expliquer leur comportement et leur évolution. Les systèmes multi-agents ont trouvé rapidement un champ extrêmement propice à leur développement dans le domaine de la modélisation de systèmes complexes ne trouvant pas de formalisation mathématique adaptée. Dans le domaine des sciences du vivant d'abord, ensuite dans celui des sciences humaines et sociales, les SMA ont montré qu'il était possible de modéliser au niveau micro les comportements d'entités élémentaires et d'étudier au niveau macro le résultat global de l'interaction de ces entités. En effet, la simulation multi-agents permet de tester rapidement le changement de certaines hypothèses ; elle permet aussi d'intégrer de nouveaux agents et d'éditer, sur un plan pratique, les résultats pour comparer les expérimentations les unes aux autres ; de plus elle permet de préserver l'hétérogénéité du système à simuler.
- Les applications dans lesquelles les agents jouent le rôle d'êtres humains. La notion d'agent simplifie la conception de ces systèmes et amène de nouvelles problématiques centrées utilisateur telles que la communication, la sécurité... Les systèmes de ventes aux enchères dans laquelle les agents jouent les rôles de commissaire priseur et d'acheteurs, représentent une classe d'applications de cette catégorie.
- La résolution de problèmes : telle qu'elle avait été définie en Intelligence Artificielle, étendue à un contexte distribué. Dans ce cadre, l'objectif est de mettre en œuvre un ensemble de techniques pour que des agents, pertinents pour la résolution d'une partie ou l'ensemble du problème, participent de manière efficace et cohérente à la résolution du problème global.

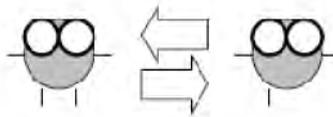
2.4. Communication dans les systèmes multi-agents

2.4.1. Définition

« **La communication** est l'échange intentionnel d'informations occasionné par la production et la perception de signes issus d'un système partagé de signes conventionnels. » [Russel 06]

Les communications dans les SMA comme chez les humains sont à la base des interactions et de l'organisation sociale. Sans communication, l'agent n'est qu'un individu isolé. C'est parce que les agents communiquent qu'ils peuvent coopérer, coordonner leurs actions et réaliser des tâches en commun [Dutta et al. 05][Glizes 04].

Environnement



Ce modèle simple est à la base de plusieurs travaux en SMA. Il a été étendu par la théorie des actes de langages. Plusieurs langages d'interactions (ACLs, Agent Communication Languages), ont été proposés dans la littérature citons par exemple KQML, KIF et FIPA ACL.

2.5. Interactions dans les SMA

La notion d'interaction constitue l'essence d'un système multi-agents puisque c'est grâce à elle que les agents vont pouvoir produire des comportements collectifs complexes et dépendants les uns des autres. En effet, la fonction interactionnelle d'un agent porte sur l'ensemble des mécanismes lui permettant de faire le lien avec ce qui l'entoure (son environnement ainsi que l'ensemble des autres agents). L'interaction peut être vue comme une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques [Thomas 05]. Elle représente de plus un élément nécessaire à la constitution des organisations.

2.5.1. Définition

« On appelle situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles » [Ferber 95].

De cette définition on peut faire sortir une classification des situations d'interaction selon plusieurs critères :

- la présence d'objectifs *communs* ou *compatibles*
- l'accès à des ressources *communes*
- la *répartition des compétences* au sein des agents.

En fonction de ces critères et de l'objectif du système, la notion de situation d'interaction peut s'exprimer comme les attitudes adoptées par les agents vis-à-vis des autres agents. Ferber [Ferber 95] distingue trois grandes catégories d'interactions :

- **l'antagonisme entre agents** : les agents ont des objectifs conflictuels (compétition) ou ont besoin de ressources communes (conflit sur les ressources).
- **l'indifférence entre agents** : les agents n'ont pas besoin les uns des autres pour atteindre leurs objectifs et ne sont pas gênés par ceux-ci.
- **la coopération entre agents** : les agents doivent s'entraider pour atteindre leurs objectifs qui peuvent être éventuellement communs.

En effet, un des aspects importants de la dynamique d'un SMA est la nature des interactions entre ses entités, puisqu'elles constituent un support effectif de la coopération [Panait et al. 05]. Les agents interagissent en vue de coopérer et de coordonner leurs actions afin d'atteindre des buts locaux (individuels) ou globaux

(collectifs). L'interaction est réalisée à travers un langage compréhensible et commun à tous les agents et peut être :

- sélective sur un nombre restreint d'agents (par exemple en fonction des accointances c'est-à-dire les agents qu'il connaît) ;
- ou étendue à l'ensemble des agents c'est-à-dire par diffusion.

De plus, les interactions permettent dans les systèmes multi-agents la combinaison des fonctionnalités des agents pour faire émerger le comportement global du système [Sabouret 09].

D'autre part, une interaction du point de vue d'un agent peut être dans à l'une des trois catégories suivantes selon le gain perçue :

- incidence nulle ;
- incidence positive : l'agent perçoit l'interaction comme une aide ;
- incidence négative : l'agent perçoit l'interaction comme une gêne.

Nos travaux se concentrent sur des systèmes purement coopératifs où les agents doivent résoudre ensemble un problème donné, par conséquent les interactions entre eux doivent avoir une incidence positive.

2.5.2. Coopération

Les études dans le domaine de la sociologie ont montré que les humains doivent coopérer à cause de leurs capacités limitées. Nous coopérons parce que nous ne pouvons pas atteindre nos buts, ou parce que nous ne pouvons pas les atteindre de manière efficace et rapide.

En effet, la coopération est la forme générale d'interaction la plus étudiée dans les SMA, elle représente l'attitude sociale qui permet l'augmentation des performances de groupe [Doran et al. 97], [Glizes et al. 99], [Velagapudi et al. 07]. De plus la coopération se fonde à la fois sur la complémentarité d'intérêt et la confiance [Melaye et al. 05]

Nous nous intéressons particulièrement à cette forme d'interaction, nous présentons dans ce qui suit deux définitions qui nous semblent répondre à ce dont nous avons besoin.

Définition 1:

Les caractéristiques de la coopération idéale sont aussi celles d'une coopération totale où la moindre activité est bénéfique pour autrui [Glizes 04]:

- **Compréhension** : un signal perçu doit être interprétable par un système coopératif. La compréhension mutuelle n'a pas à être postulée mais doit émerger de l'ajustement mutuel entre le système et son environnement.
- **Raisonnement** : toute information (un signal interprété) doit avoir des conséquences logiques dans le système. En d'autres termes, toute information

doit apporter de la nouveauté (en différence avec les informations actuellement mémorisées).

- **Action** : les conclusions du processus de raisonnement doivent être utiles à l'environnement du système.

Définition 2:

On dira que plusieurs agents coopèrent ou encore qu'ils sont dans une situation de coopération si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- l'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différentiellement les performances du groupe ;
- l'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels.

[Ferber 95] propose un certain nombre de méthodes permettant de mettre en œuvre cette attitude coopérative entre agents comme :

- la communication pour échanger des informations ;
- le regroupement physique des agents ;
- la spécialisation pour rendre certains agents plus adaptés à leur tâche ;
- la répartition des tâches, des informations et des ressources ;
- la coordination d'actions qui correspond à l'exécution de tâches supplémentaires permettant d'exécuter d'autres actions critiques dans les meilleures conditions.

De plus, certains chercheurs distinguent la coopération indirecte qui est due aux actions individuelles émises par les agents faisant évoluer l'environnement et la coopération directe résultante des signaux directs émis par les agents.

De ces définitions nous déduisons qu'un système coopératif doit avoir les caractéristiques suivantes :

- c'est un système composé d'agents coopératifs, ce sont des agents qui s'entraident, se complètent et se comprennent ;
- ce sont des agents qui doivent accomplir la tâche pour laquelle ils ont été conçus dans un milieu coopératif ;
- le maintien d'un degré de coopération élevé assure la survie du système.

2.6. Organisations dans les SMA

Lorsqu'on parle d'organisations on suppose l'existence d'un ensemble d'entités en relation formant une unité.

Dans un système multi-agents, l'organisation permet aux agents de savoir quels sont leurs partenaires et quels rôles ils jouent de façon à répondre à un objectif donné. C'est un arrangement des agents et de leurs comportements conditionné par les contraintes

imposées par l'environnement [Ferber et al. 09], [Deloach 09]. C'est une structure du système [Jiquan et al. 08].

2.6.1. Définition

Plusieurs définitions du terme organisation existent dans la littérature, naturellement ce terme possède différents sens dans différents domaines de recherche tels que les sciences humaines, les sciences économiques. Nous présentons dans ce qui suit deux définitions que l'on rencontre dans le domaine des systèmes multi-agents :

L'organisation est agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité ou système dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou évènements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. Elle assure solidarité et solidité relative, donc assure une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires [Ferber 95].

Une organisation est un ensemble d'individus regroupés au sein d'une structure régulée, ayant un système de communication pour faciliter la circulation de l'information, dont le but est de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés [Moujahed 07].

Dans un système multi-agents, l'organisation est le facteur structurant, elle permet aux agents de savoir quels sont leurs partenaires et quels rôles ils jouent de façon à répondre à un objectif donné. Ferber [Ferber 95] insiste sur la dualité entre l'aspect statique et l'aspect dynamique de l'organisation en précisant que « l'organisation est à la fois le processus d'élaboration d'une structure et le résultat même de ce processus ». L'auteur distingue alors l'organisation qui est le processus même de la *structure organisationnelle* qui en est le résultat.

[Kota et al.] de leur part précisent que l'organisation est le *résultat d'un comportement* social des agents et elle ne peut être créée explicitement par le concepteur.

Dans notre travail, nous considérons l'organisation comme processus de mise en ordre résultant des interactions des agents, et la structure organisationnelle le regroupement de ces agents.

2.6.2. Types d'organisation

Dans la littérature [Mkademi et al. 08], [Akola et al. 06], [Rahwan et al. 07] on distingue plusieurs types d'organisations :

- **Groupe** : plusieurs types de groupes existent :
 - **Groupe simple**: dès qu'un groupe existe, on peut avoir une coordination coopérative afin d'atteindre un but commun et partagé.

- **Équipe:** une collection d'individus qui ont été rassemblés pour travailler ensemble. Dans une organisation plusieurs équipes sont formées pour des raisons de communication. Dans cette définition, des individus appartenant à une équipe doivent nécessairement communiquer entre eux, ce qui entraîne l'introduction de la notion d'environnement (cadre dans lequel les agents existent et évoluent).
 - **Groupe d'intérêts:** chaque membre a les mêmes intérêts, ils partagent les informations et coopèrent pour réaliser un but commun.
 - **Communauté de pratique:** se constitue lorsque des professionnels se regroupent et s'organisent pour partager des informations et des expériences relatives à leurs activités. Les membres de ces communautés peuvent ainsi échanger et coopérer afin de résoudre ensemble les problèmes auxquels ils peuvent être confrontés, apprendre ainsi les uns des autres et construire ensemble des connaissances et des pratiques communes.
- **Hiérarchie** où l'on distingue :
 - **Hiérarchie simple:** basée sur une relation maître/esclave, ce type d'organisation n'est plus utilisé.
 - **Hiérarchie multi niveaux:** les liens d'autorité forment un arbre. Le contrôle dans ce type d'organisation est très complexe, citons par exemple le problème d'allocation de ressources ou de planification qui doivent être pris en compte.
 - **Organisation décentralisée:** c'est une hiérarchie multi divisions où chaque sommet d'une branche est une organisation à part entière. La difficulté principale dans ce type d'organisations est l'intégration des différents résultats provenant des différentes divisions.
 - **Marché:** ce type d'organisation se base sur la relation consommateur/producteur. Une instance spéciale du marché est le Contract Net Protocol qui est un protocole permettant l'élaboration et l'exécution d'un contrat entre un agent *manager* et un agent *contractant*. Il fait intervenir des agents interagissant entre eux pendant l'élaboration et l'exécution du contrat au moyen de performatifs.
 - **Coalitions :** Une coalition est une organisation à court terme basée sur des engagements spécifiques et contextuels permettant aux agents de bénéficier de leurs compétences respectives de façon opportuniste.

2.7. Conclusion

Les SMA proposent aujourd'hui une nouvelle technologie effective de mise en œuvre de systèmes complexes dès lors que ceux-ci requièrent distribution, ouverture, coopération et autonomie ajustable. Ces systèmes forment une communauté de recherche issue de plusieurs influences. Les principales sont :

- l'intelligence artificielle distribuée ;
- la vie artificielle ou les systèmes inspirés d'organismes vivants ;
- les sciences sociales et les sciences cognitives.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les agents et systèmes multi-agents, tout en mettant l'accent sur les concepts d'environnement, de coopération, et d'interaction. En effet, l'objectif de nos travaux se situe autour des systèmes multi-agents coopératifs plongés dans des environnements dynamiques et imprévisibles. En particulier la coopération est une attitude caractérisant ces systèmes et doit être maintenue dans la vie de ces derniers. L'interaction étant nécessaire pour la coopération, elle nous permet d'observer de manière locale le système. L'importance de ces différents concepts sera mise en évidence dans le chapitre IV.

Chapitre III

Adaptation dans les systèmes multi-agents

Chapitre III

Adaptation dans les systèmes multi-agents

« La sélection naturelle serait un mécanisme de création d'ordre à partir du désordre ».

[Landau et al. 02]

3.1. Introduction

L'ouverture et la complexité sont des propriétés inhérentes des systèmes informatiques actuels, elles ne sont voulues par personne mais c'est un état des choses que l'on ne peut plus se permettre d'ignorer. De plus, ces systèmes sont plongés dans des environnements incertains, initialement inconnus et qui changent dynamiquement de manière imprévue. Dans de tels environnements, nous sommes confrontés à une question importante qui est :

Comment doivent réagir les systèmes face aux situations inattendues de manière efficace et autonome ?

La *faculté d'adaptation* devient, par conséquent, de plus en plus importante et nécessaire dans de tels systèmes. Le système doit réagir et se maintenir sans aucune intervention externe. Toutefois, un système adaptatif doit être aussi capable d'*identifier les circonstances de perturbations* qu'il rencontre durant son fonctionnement afin de pouvoir réagir et s'adapter.

A cet effet, les systèmes multi-agents adaptatifs viennent apporter des solutions intéressantes et prometteuses et constituent actuellement un domaine à part entière en intelligence artificielle distribuée.

Les systèmes multi-agents adaptatifs deviennent de plus en plus nécessaires, dans les cas suivants [Picard et al. 04], [Lerman et al. 03] :

- les systèmes qui sont composés de plusieurs agents autonomes dont les capacités sont limitées : un agent émet des actions qui modifient l'environnement localement, l'organisation interne du système par conséquent peut changer et évoluer ;
- l'environnement dans lequel évolue le système est dynamique et stochastique : les environnements actuellement deviennent de plus en plus évolutifs, inconnus et imprévisibles, le système peut alors rencontrer des situations qui ne peuvent être décrites à l'avance ;
- les systèmes qui sont complexes : ce sont des systèmes composés d'un ensemble d'entités interagissant entre elles de façon non linéaire (interactions rétroactives), mettant ainsi en œuvre une dynamique permettant à l'ensemble du système d'exister comme un tout, différent de la simple somme de ses composants ;
- les systèmes qui sont ouverts, répartis, à grande échelle : la robustesse est cependant une exigence forte, les systèmes doivent supporter les pannes, l'évolution des ressources (ajout, mise à jour, suppression), ainsi que l'augmentation significative du nombre d'utilisateurs (évolution de l'organisation du système où des agents peuvent rejoindre ou quitter le système à tout moment) ;
- les systèmes interopérables : qui sont des systèmes qui peuvent fournir un service, s'intégrer dans un nouvel environnement, ou utiliser un service externe.

Ce chapitre est consacré à la présentation des concepts les plus importants de cette problématique, et nous allons nous intéresser particulièrement aux algorithmes génétiques. Ce sont des algorithmes qui ont la particularité de considérer un très grand nombre d'hypothèses (individus) non ordonnés, qui sont évaluées à chaque étape, et dont les plus prometteuses sont transformées en de nouvelles hypothèses par des opérateurs inspirés de la théorie de l'évolution [Nedellec 06]. Ces algorithmes sont qualifiés par la communauté scientifique d'auto-adaptatifs.

3.2. Principes et définitions

Le terme « *adaptation* » est utilisé dans différentes disciplines, telles que l'économie, la sociologie, la biologie, la psychologie, l'informatique, etc., avec des sémantiques différentes. En informatique même ce terme a différents sens et implique différents mécanismes de mise en œuvre. Nous pouvons citer à titre d'exemple son utilisation dans le domaine de l'ingénierie logicielle, l'interaction homme-machine (IHM) et l'intelligence artificielle. Notons de plus que l'adaptation dans un système informatique est toujours réalisée dans un but précis qui dépend du domaine applicatif.

On distingue tout d'abord l'adaptation statique et l'adaptation dynamique [Rejeb 05], [Leriche 06]:

Adaptation statique

L'adaptation statique correspond uniquement à une réaction automatique aux pressions et aux changements de l'environnement, qui peut être par exemple, définie par un ensemble statique de règles connues à l'avance, comme il est le cas des agents réactifs ; ou d'autre part les activités de maintenance dans le cycle de vie d'un logiciel sont nécessaires pour conserver un système opérationnel et satisfaisant pour les utilisateurs. On distingue alors: la maintenance corrective, la maintenance adaptative qui s'opère suite à une modification d'une spécification, la maintenance perfective qui consiste à améliorer le fonctionnement du système, la maintenance évolutive où l'on ajoute des fonctionnalités ou la maintenance préventive qui consiste en l'enrichissement du système par des mécanismes de traitement d'erreurs. Les besoins d'adaptation statiques doivent être pris en compte dès la conception, en proposant des architectures logicielles adéquates, permettant leur configuration.

Adaptation dynamique

Lors de la construction ou du déploiement de systèmes ouverts répartis à grande échelle, il est très difficile de faire l'hypothèse sur les situations que peuvent rencontrer ces systèmes durant leur fonctionnement telle que la disponibilité de services ou de ressources, et même sur l'organisation globale du système qui est généralement appelée à changer au cours de son fonctionnement. Les applications doivent supporter l'ouverture, les pannes ainsi que les évolutions des ressources : elles doivent pouvoir *s'adapter dynamiquement* à ces situations.

L'objet d'étude des systèmes multi-agents adaptatifs est concerné par cette deuxième catégorie. Nous présentons dans ce qui suit quelques définitions proposées dans la littérature décrivant l'adaptation dynamique.

3.2.1. Définition

Le domaine de l'adaptation est pluridisciplinaire, les recherches se sont déployées autour : l'auto-organisation, les systèmes dynamiques, la reconfiguration logicielle, les systèmes intégrant des facultés d'apprentissage, les mécanismes et techniques bio-inspirés, la métaphore des organisations collectives, la modélisation des sciences sociales et humaines etc., ce sont des recherches qui sont autour des systèmes complexes [Hassas 03], [Dewolf et al. 04], [Georgé 04]. Plusieurs manières de voir et définitions ont été attribuées au terme adaptation, nous en citons quelques unes :

Sornn-Friese [Rejeb 05] définit l'adaptation dynamique comme étant un phénomène correspondant à *un changement organisationnel* incluant d'un côté un comportement organisationnel proactif et de l'autre côté un comportement réactif et protecteur.

Kota et Jennings [Kota et al.] soulignent que l'adaptation doit se focaliser au niveau des *interactions locales* afin d'atteindre une meilleure performance globale. Le changement de caractéristiques des différents agents, peut ne pas être suffisant pour améliorer la performance globale surtout que les tâches et buts font intervenir plusieurs agents qui sont en interaction. Les agents du système doivent par conséquent avoir la liberté d'adapter leurs interactions locales avec les autres. Des agents adaptatifs doivent être capables d'*identifier les relations* les plus souhaitées dans leur contexte en se basant sur les tâches qui leur sont confiées. *L'adaptation de la structure joue un rôle important dans la performance globale de l'organisation.*

Ferber [Ferber 95], [Ferber et al. 09] distingue l'adaptation *structurelle* et l'adaptation *comportementale* d'un ensemble d'agents, où la première est considérée comme caractéristique individuelle des agents qui serait alors un *apprentissage* une *spécialisation* ou un *changement de rôle*, et la deuxième se présente comme un *processus collectif* mettant en jeu des mécanismes *reproductifs* et qui sera alors une *évolution*.

Cardon et Guessoum [Cardon 00 (b)] affirme que l'adaptation est une propriété générale d'un système qui confère à son *architecture* une trajectoire *non permanente*, *évolutive* et *périssable*, conforme à l'environnement du système.

Glizes [Glizes 04] définit l'adaptation comme étant un processus *d'ajustement mutuel* qui s'opère aussi bien dans le système que dans son environnement. Un système multi-agent adaptatif est donc défini comme un système multi-agent qui est capable de *changer son comportement* en cours de fonctionnement pour l'ajuster dans un environnement dynamique, soit pour réaliser la tâche pour laquelle il a été conçu, soit pour améliorer sa fonction ou ses performances.

Lerman [Lerman et al. 03] considère que l'adaptation s'effectue par un changement de *comportements* des différents agents en réponse aux changements de l'environnement ou aux actions exercées par les autres agents, et ce dans le but d'améliorer la performance globale du système.

Gandon [Gandon 02] de sa part dit que l'adaptation automatique consiste en une *capacité* du système à *identifier les circonstances* nécessitant l'adaptation, et en fonction de celles-ci, il entreprend les actions appropriées. Ceci implique que le système a la capacité de contrôler ses interactions.

3.2.2. De l'adaptable à l'adaptatif

Certains auteurs distinguent *l'adaptabilité* de *l'adaptativité* :

- Un système est dit *adaptable* lorsque l'intervention humaine est nécessaire pour enclencher le processus de modification, c'est un système qui est personnalisable sur intervention explicite de l'utilisateur.

- Un système est dit *adaptatif* s'il sait reconnaître, sans aucune intervention extérieure, la situation et est capable de modifier son comportement selon les déclencheurs qui sont mis en œuvre.

3.2.3. Quelques travaux sur l'adaptation

Nous présentons dans ce qui suit quelques travaux sur l'adaptation pour que nous puissions dégager les concepts clés de cette approche.

Dans [Charrier 09] l'auteur propose un système multi-agents auto-organisateur adaptatif basé sur les réseaux d'itérations couplées (RIC). Ces réseaux sont constitués de cellules comportant chacune une application non linéaire à temps discret que l'on itère en la couplant avec les cellules voisines. Ce modèle de calcul est intégré dans le paradigme agent pour donner naissance à SMAL (système multi-agent logistique), dont le générateur de la dynamique décisionnelle interne des agents est basé sur ce calcul. L'environnement est composé d'un espace géométrique de base sur lequel a été défini un ou plusieurs champs en fonction des problèmes. Les champs ont un rôle de médiation des interactions (qui sont indirectes) entre agents et environnement, ils mémorisent les informations du système, et deviennent de ce fait des éléments essentiels à *l'auto-organisation* et à *l'adaptation* au sein du système multi-agent. Le modèle SMAL a été adapté à l'intelligence en essaim, où l'auteur a mis en œuvre des métaheuristiques (intelligence en essaim) pour aborder des problèmes d'optimisation à l'aide des phénomènes d'auto-organisation et d'adaptation intégrées dans le système.

Les auteurs dans [Florea et al. 00] de leur part, proposent un système d'allocation de ressources composé d'agents intelligents hybrides dotés de composants évolutionnaires, leur permettant de faire face à leurs limitations en termes de croyances et de connaissances sur l'environnement. Les chercheurs proposent un modèle du processus de planification dans un système multi-agents composé d'agents compétitifs, les agents du système effectuent une prédiction de l'environnement et des autres agents en se basant sur une *représentation génétique* pour modéliser le monde imprédictible dans lequel ils vivent. Les agents, via leur composant évolutionnaire, développent des plans d'interactions avec les autres agents et leur environnement en se basant sur la co-opération des espèces co-adaptées, un composant de *simulation* permet à l'agent d'avoir une idée sur sa prédiction si elle peut fonctionner correctement dans le monde qui l'entoure. Les auteurs proposent de représenter dans chaque individu de la population génétique les ressources acquises par période et par agent, le meilleur individu peut être celui qui a le maximum de profit avec un coût minimal pour l'ensemble des agents. Le modèle peut être utilisé de plusieurs manières dont l'une d'entre elles est la planification dans l'allocation de ressources dans le but de prévoir une *évolution* dans l'environnement.

Dans l'approche des systèmes multi-agents adaptatifs décrite dans [Cardon et al. 00 (b)], les auteurs proposent un modèle de systèmes artificiels adaptatifs se basant sur

l'auto-organisation, dont la principale caractéristique est la satisfaction de besoins généraux qui orientent leur comportement de manière décisive. Ces besoins multiples et contradictoires sont appelées *tendances fondamentales*. Le modèle proposé est une organisation multi-agents composé de deux parties une statique et l'autre adaptative. Cette dernière est dotée d'un composant connexionniste (basé sur les réseaux de neurones de type cartes de Kohonen) qui permet de représenter les tendances fondamentales et ce sur la base de l'état et des comportements des agents. Un agent adaptatif est par conséquent un agent capable de générer et d'interpréter implicitement des indications relatives aux tendances fondamentales du système : une réorganisation est alors observée.

La théorie des AMAS (Adaptive Multi-Agent Systems) [Picard et al. 04], [Glizes 99] est une approche théorique et pratique pour concevoir des systèmes adaptatifs. Le but de cette théorie est de permettre à un système, utilisant des critères de *réorganisation locale* au niveau de ses entités, d'atteindre un comportement global du système qui doit être adapté à la tâche courante. Cette théorie s'intéresse en particulier aux relations entre les entités constituantes des systèmes, elle se base sur la *coopération* entre elles. Selon cette approche, un système plongé dans un environnement dynamique va forcément devoir traiter des situations imprévues du point de vue local de l'agent. Cet imprévu sera pris en compte comme une situation de non coopération au niveau de l'agent qui va chercher à modifier ses relations avec les autres agents dans le but de lever cette situation. Les fonctions partielles du système se réorganisent, en changeant la fonction globale, pour réagir à la situation imprévue et la prendre en charge. Ainsi, un agent doit non seulement réaliser sa fonction partielle, mais aussi agir sur l'organisation du système. Ces décisions sur la coopération sont *locales* aux agents et ne doivent pas être dictées par la fonction globale.

Dans [Haynes et al. 97] les auteurs proposent une approche évolutionnaire pour la *co-adaptation* dans une équipe d'agents hétérogènes. Ils s'intéressent à *l'évolution* des *stratégies comportementales* qui permettent à des agents fortement couplés d'atteindre un but commun de manière coopérative. L'idée est de construire des stratégies de coordination de manière incrémentale par l'approche de la programmation génétique. Une population de structures (chacune codifie une stratégie de coordination) évolue par l'approche adoptée pour produire des stratégies efficaces. L'évaluation de ces structures s'effectue par *l'exécution* des agents eux-mêmes des stratégies de coordination dans un domaine bien spécifié. La meilleure stratégie de coordination correspondra au meilleur programme qui sera adoptée.

Vacher [Vacher 00] aborde un problème complexe qui est l'ordonnancement d'atelier et propose d'étudier l'application des algorithmes génétiques multi-objectifs dans un système multi-agents pour la résolution du problème d'ordonnancement en mettant en évidence la notion d'évolution des agents. Les agents du système sont conçus pour permettre la planification de la production, ils ont alors des tâches à réaliser, précisées à priori par une gamme de tâches, et ils règlent par eux-mêmes la coordination de ces

tâches, l'ordonnancement consiste à placer les différentes opérations d'un ensemble de lots en respectant les contraintes de ressources et de précédences afin de permettre la fabrication de produits sur les machines d'un atelier de façon optimale. L'auteur propose de réaliser un système multi-agents avec une évolution génétique des agents afin de construire une bonne solution. L'*amélioration* des agents permet de conduire à des *agents plus performants*, ces derniers peuvent se reproduire entre eux en fonction de la pertinence de leurs actions pour former de nouveaux agents ainsi que de nouveaux groupes d'agents très spécialisés et plus performants.

L'approche proposée dans [Schlegel et al. 07] est une solution distribuée pour l'allocation de ressources basée sur l'*auto-organisation* des agents du système. Les agents sont compétitifs et doivent exécuter leurs tâches sur des ressources partagées, le mode de communication adopté est le mode indirect. Les agents allouent dynamiquement les tâches aux serveurs qui sont en nombre limité et possèdent un nombre aussi limité de ressources. Ils *optimisent* le processus d'allocation de ressources par *apprentissage* à partir des décisions passées d'allocation. L'apprentissage se base sur un *raisonnement inductif* qui dote les agents de capacités d'adaptation. Les agents sélectionnent de manière autonome la plate-forme d'exécution de leurs tâches. Le contrôle nécessaire à l'algorithme est entièrement distribué sur les agents.

Gaston [Gaston 05] propose de doter les agents de capacités d'adaptation qui agissent sur la *structure* d'un réseau social dans des sociétés d'agents, il démontre que ces derniers peuvent améliorer la performance de l'organisation par *adaptation de la structure du réseau* utilisant seulement l'information *locale* et des méthodes relativement simples basées sur le Q-learning. L'adaptation s'opère sur les connexions, ajouter ou supprimer une connexion, ou par mémorisation des agents avec qui il y a eu de bonnes interactions. Les majeures considérations dans la conception des stratégies des agents est de décider *quand* adapter la connectivité et décider *quelles* connexions changer. La clé du framework proposé est de doter les agents de la capacité de détecter quand d'autres agents sont en train de faire des décisions de connectivité qui sont bénéfiques ou non. Ceci permet aux agents de profiter des actions des autres. L'approche propose alors la formation décentralisée de réseaux pour supporter un apprentissage organisationnel.

[Landau et al. 02] propose un framework *SFERES* d'évolution artificielle et de simulation multi-agent permettant de faciliter l'intégration de *l'apprentissage par algorithme évolutionniste* dans la conception de systèmes multi-agent adaptatifs. Le framework est destiné à des concepteurs de SMA, il offre un outil dédié à une forme particulière d'apprentissage, l'évolution artificielle, et un *simulateur* multi-agent. Les outils offerts permettent au concepteur d'évaluer la pertinence de plusieurs techniques pour un même problème ou celle de plusieurs protocoles expérimentaux ou architectures d'agents pour une même technique. Les deux parties sont liées par *l'évaluation des individus* de l'algorithme évolutionniste dans la simulation.

L'évaluation porte sur le comportement des agents simulés. Ce comportement est décrit plus ou moins directement selon les cas dans le génome sur lequel travaille l'évolution. Le fonctionnement global du framework consiste, après codage des agents du système en individus, en une alternance simulation pour évaluation et apprentissage et optimisation. Les individus sont soumis à la simulation pour pouvoir évaluer leur performance qui fera l'objet de la fonction de survie dans le processus génétique qui leur permet d'évoluer.

Dans [Fayekat al. 09] les auteurs proposent une approche d'adaptation dite *GAMA* basée sur les *algorithmes génétiques* qui se situe au niveau des *interactions* des différents agents. L'approche consiste à améliorer la qualité de la négociation dans un système de place de marché vis-à-vis les deux participants à savoir l'agent acheteur et l'agent vendeur. L'idée est de permettre au consommateur de trouver le meilleur produit en se basant sur les critères décrits par le vendeur. L'algorithme d'optimisation se base sur la collaboration des agents qui est basée à son tour sur les performatifs d'argumentation. Le protocole de négociation par collaboration se déroule comme suit : l'agent acheteur applique l'algorithme génétique sur les offres faites par le vendeur, pour fournir à ce dernier des critiques ; de sa part le vendeur évalue les critiques transmises par l'acheteur et lui envoie de nouvelles offres qui seront soumises chez ce dernier à la suite de l'évolution génétique produisant par conséquent les critiques associées, la négociation se poursuit jusqu'à acceptation ou rejet de la proposition par le vendeur. Les algorithmes génétiques dans ce travail aide les agents acheteurs à améliorer le processus de négociation et s'adapter aux offres du vendeur.

3.2.4. Synthèse et bilan

Nous pouvons faire sortir de ce qui précède deux questions fondamentales auxquelles il faudra trouver une réponse quand on cherche à doter un système de capacités d'adaptation :

- *Quels sont les mécanismes à mettre en place pour que le système s'adapte? En d'autres termes comment le système doit être construit pour qu'il soit adaptatif?*
- *Quels sont les indices à collecter pour que le système puisse reconnaître des situations de perturbations et s'adapter en conséquence?*

D'autre part, nous soulignons les points clés suivants :

- L'adaptation peut prendre différentes formes :
 - changement de structure, de relations, de localisation des programmes ou de localisation des données ;
 - changement de contenu, de connaissances, ou de compétences ;
- l'adaptation peut se faire par différents processus :
 - Réaction (réponse prédéterminée à un évènement particulier)
 - Raisonnement (capacité d'inférence)
 - Apprentissage (changement au cours de la vie du système)

- Évolution (changement dans une population qui apparaît dans des générations successives)
- l'auto-organisation est une faculté très importante dans l'adaptation des systèmes multi-agents ;
- les algorithmes génétiques ont été largement utilisés dans les systèmes multi-agents intégrant des facultés d'apprentissage ou d'adaptation ;
- les interactions locales entre les différents agents qui représentent sont au cœur de plusieurs travaux d'adaptation.
- l'adaptation peut être réalisée :
 - au niveau de l'agent en le dotant d'attitudes sociales, de coopération, d'évolution de connaissances et de compétences ;
 - au niveau de l'organisation en incluant un processus d'évolution vers une organisation acceptable.

Nous soulignons de plus que sur le thème de l'étude de l'adaptation de *populations d'agents* ou *d'organisations* à un environnement de nombreux travaux s'appuient sur une approche évolutionnaire dont le moteur est la *reproduction de populations* ; imitant l'évolution biologique où une population d'individus est soumise à divers transformations au cours desquelles des individus ou leurs *gènes* se battent pour survivre. En effet, l'approche des systèmes multi-agents évolutionnistes permet, une fois les objectifs précisément définis, de laisser le système développer sa *propre évolution*. L'évolution du système s'appuie sur la création, à l'aide d'opérateurs génétiques, d'une suite de populations d'entités qui converge vers une entité dont le comportement sera jugé acceptable. Les algorithmes génétiques se sont en particulier révélés efficaces pour traiter des situations souvent rencontrées en modélisation multi-agents [Spector et al. 04], en optimisation de la conception des SMA [Das et al. 01], en sciences sociales, en sciences économiques, où la structure même du problème auquel on s'intéresse change au cours du temps [Deissenberg 06], [Martinez 04], [Lei et al. 08].

Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse à la combinaison des deux niveaux d'adaptation, le premier basé sur les attitudes sociales des agents et le deuxième basé sur l'évolution génétique de l'organisation, nous nous basons essentiellement sur les interactions entre les agents et sur une évaluation qui leur est associée et qui permet de déterminer le besoin en adaptation et de guider le processus même d'adaptation.

3.3. L'auto-organisation

Depuis quelques années, l'auto-organisation a réussi à se faire adopter par plusieurs chercheurs travaillant sur des domaines scientifiques divers tels que la biologie, la sociologie, la géologie, la chimie, etc. En informatique, la notion d'auto-organisation a été initialement utilisée dans le connexionnisme et les algorithmes génétiques, elle est

maintenant employée dans une panoplie de disciplines et d'applications parmi lesquelles s'inscrivent, et sans surprise, les systèmes multi-agents [Dewolf et al. 04], [Georgé 04].

3.3.1. Définitions

Plusieurs définitions existent dans la littérature, citons parmi elles :

D'après [Glizes 04] :

L'auto-organisation est la faculté d'un système à se réorganiser de manière autonome, elle permet au système de s'adapter de manière autonome aux conditions changeantes du milieu. Un système auto-organisateur est un système qui change sa structure de base en fonction de son expérience et de son environnement.

[DeWolf et al. 04] définissent l'auto-organisation par:

“Self-organization is a dynamical and adaptive process where systems acquire and maintain structure themselves, without external control.”

L'auto-organisation est alors un processus dynamique et adaptatif à travers lequel les systèmes peuvent *acquérir et maintenir une structure sans contrôle externe*.

Dans [Mostefaoui et al. 06] les auteurs précisent qu'un système auto-organisateur est un système qui a la faculté de former *spontanément des structures bien organisées*.

Ces définitions permettent de dégager les caractéristiques fondamentales suivantes:

- la structure organisationnelle est l'une des caractéristiques les plus importantes du concept d'auto-organisation ;
- l'autonomie : le système doit prendre la décision de s'auto-organiser de manière autonome ;
- l'absence de contrôle externe : d'où le terme « auto ». Un système doit s'organiser sans interférence avec l'extérieur.

Cependant, la question qui se pose est : est-ce que l'autonomie et l'absence de contrôle externe veulent dire qu'un tel système ne peut avoir aucune interaction avec des utilisateurs? La réponse est non. Généralement, les interactions sont possibles tant qu'elles ne dictent pas des instructions de l'extérieur du système [Moujahed 07].

3.3.2. Mécanismes d'auto-organisation

De nos jours, plusieurs mécanismes d'auto-organisation sont proposés dans la littérature, citons par exemple les réseaux de neurones artificiels, les systèmes multi-agents réactifs où des mécanismes stigmergiques -se basant sur l'action sur l'environnement sont intégrés tels que les phéromones, les champs de forces-, les

approches bio-inspirées tels que les algorithmes de fourmis artificielles et les algorithmes évolutionnaires, et enfin les systèmes multi-agents coopératifs.

L'auto-organisation peut s'effectuer par différentes manières, dont nous citons :

- modification de *la connaissance des agents* (apprentissage des expériences passées, évolution des compétences, révision de croyances, buts...) ou la distribution de cette connaissance dans le système ;
- modification de *la structure* : par *changement de rôles, spécialisation, suppression et ajout d'agents, délégation* ;
- par simulation des phénomènes biologiques tels que les systèmes utilisant les algorithmes génétiques, les algorithmes à base de fourmis, etc.

3.4. Algorithmes génétiques

Genetic Algorithms

Computer programs that "evolve" in ways that resemble natural selection can solve complex problems even their creators do not fully understand

by John H. Holland

Les Algorithmes Evolutionnaires (AE) sont inspirés du concept de la sélection naturelle élaboré par Charles Darwin. Cette théorie explique comment, depuis l'apparition de la vie, les espèces ont su évoluer de générations en générations dans le sens d'une meilleure adaptation des individus à leur environnement, en favorisant la survie et la reproduction des individus les plus adaptés [Davis 92].

Les AE constituent une approche originale : il ne s'agit pas de trouver une solution analytique exacte, ou une bonne approximation numérique, mais de trouver des solutions satisfaisant au mieux différents critères, souvent contradictoires. S'ils ne permettent pas de trouver à coup sûr la solution *optimale* de l'espace de recherche, du moins on peut constater que les solutions fournies sont généralement *meilleures* que celles obtenues par des méthodes plus classiques, pour un même temps de calcul [Goldberg 94].

Différents algorithmes ont été proposés dans l'approche évolutionnaire, les principaux ayant été conçus presque simultanément et indépendamment dans les années 1960 : *les algorithmes génétiques, les stratégies évolutionnistes* et, plus récemment, la programmation génétique [Panait et al. 05].

Les algorithmes génétiques (AG) sont des procédures robustes d'exploration d'espaces complexes. Ils mettent en œuvre des principes d'évolution sur des espèces constituées d'individus informatiques :

- un principe *d'objectif à atteindre* (lié au problème posé) : cet objectif va se traduire en termes de *survie* et de *reproduction* de l'espèce. La spécification de l'objectif permet de définir une fonction dite de « *fitness* » ;
- un principe de *sélection* : l'avantage va au plus adapté, on sélectionne avec la fonction de « *fitness* » les individus les plus forts ;
- un principe de *variabilité* : on introduit des variations d'une génération à l'autre pour explorer l'espace de recherche. Un AG génère les états successeurs en combinant deux états au lieu de modifier un seul état.

Le résultat du processus d'adaptation fournit les meilleures solutions au problème. La communauté de l'algorithmique évolutionnaire emploie le terme *d'auto-adaptation* pour désigner la capacité des systèmes évolutionnaires à s'adapter dynamiquement et de façon autonome aux changements de leur environnement. Ce concept se répand dans la communauté évolutionnaire et au-delà, au même titre que *l'auto-organisation* [Charrier 09].

3.4.1. Principes fondamentaux des AGs

Les AGs sont vus comme étant des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle: croisements, mutations, sélection, etc., et dont l'idée fondamentale est la suivante : le pool génétique d'une population donnée contient potentiellement la solution, ou plutôt une meilleure solution, à un problème adaptatif donné. Cette solution n'est pas exprimée car la *combinaison génétique* sur laquelle elle repose est *dispersée* chez plusieurs individus. Ce n'est que par l'association de ces combinaisons génétiques au cours des *croisements* entre individus que la solution pourra s'exprimer. Les individus générés aléatoirement représentent donc chacun un *chromosome*, qui est composé de *gènes*. Les croisements entre chromosomes permettent d'échanger les gènes et donc de créer des individus nouveaux. Ces croisements se font de manière aléatoire, mais de façon à permettre la convergence vers une solution optimale. Il doit être également possible d'évaluer un individu sur la base de ses performances sur un problème donné. Cette évaluation doit permettre de mettre en œuvre une pression sélective efficace sur la population afin de la faire tendre vers un optimum [Goldberg 94], [Michalewicz 96].

Les caractéristiques de cette approche sont présentées ci dessous:

- les AGs travaillent sur un codage de l'ensemble des paramètres et non pas sur les paramètres eux-mêmes;
- face à un problème pour lequel il existe un grand nombre de solutions, l'AG va explorer l'espace des solutions en se laissant guider par les principes décrits précédemment, il travaille sur un ensemble de points de l'espace de recherche au lieu d'un seul point ;
- chaque individu définit ses réponses à son environnement local et ses interactions avec les autres, son *adaptation* à l'environnement et par conséquent son adéquation par rapport au problème posé ;
- il n'existe pas de chef qui donne des ordres aux autres individus ;

- tout comportement ou propriété d'un niveau supérieur émerge uniquement des interactions entre individus ;
- le principal avantage des algorithmes génétiques provient de l'opération de recombinaison [Russel et al. 06].

3.4.2. Vocabulaire utilisé

Le vocabulaire employé est directement calqué sur celui de la théorie de l'évolution et de la génétique. Nous parlerons donc d'individus (solutions potentielles), de population, de gènes (variables), de chromosomes, de parents, de descendants, de reproduction, de croisement, de mutations, etc. [Michalewisc 96].

Biologie	Algorithme Génétique
Chromosome	Solution potentielle
Gène	Trait / caractéristique
Allèle	Valeur d'une caractéristique
Locus	Position dans la solution
Génotype	Structure (codage)
Phénotype	Informations issues du décodage
Reproduction	Reproduction
Croisement	Croisement
Mutation	Mutation

TABLE 3.1. Comparaison entre les éléments de la biologie et les AGs.

Individu

Appelé aussi *chromosome*, *séquence* ou *génotype*, l'individu est la structure fondamentale qui va permettre d'encoder une solution candidate au problème traité. C'est le codage des solutions proprement dit. Une solution est représentée par son génotype.

Gène

Le gène représente la plus petite entité existante symbolisée généralement par un nombre. Le génotype se compose de plusieurs gènes, où chaque gène a une valeur possible appelée allèle et une position spécifique dans son chromosome dite locus.

Phénotype

Du décodage du génotype résulte le phénotype qui n'est rien d'autre que la solution elle-même.

Population

C'est un ensemble de chromosomes codant un ensemble de solutions potentielles du problème à résoudre à l'aide d'un mécanisme approprié de codage.

Génération

C'est l'ensemble d'individus d'une population ayant été créés au même temps.

3.4.3. Concepts de base

3.4.3.1. Codage des chromosomes

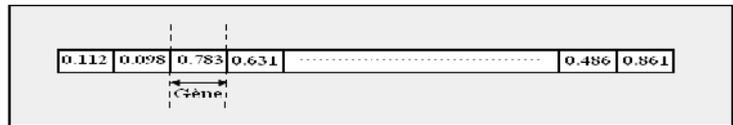
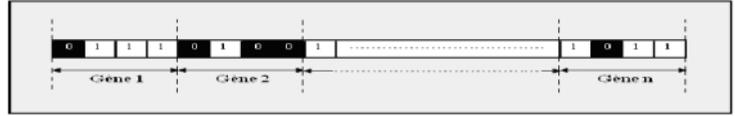
Un chromosome est un ensemble de paramètres (gènes) qui sont reliés entre eux pour former une chaîne de valeurs. Cette chaîne est de longueur donnée de caractères appartenant à un alphabet A . L'ensemble de tous les chromosomes pouvant être formés à l'aide de l'alphabet A forme « l'espace de recherche ». Le plus souvent, ces valeurs sont représentées par des bits (codage binaire) ou par un ensemble des nombres réels (codage réel). Toutefois, d'autres représentations existent dans la littérature telles que les caractères alphabétiques, les arbres, les règles de production, etc. [Deissenberg 06].

Il existe deux grandes familles de codage :

- Codage direct : l'individu représente directement la solution au problème posé (le génotype et le phénotype sont similaires).
- Codage indirect : il exprime une manière de construire une solution au problème. Par conséquent, le génotype et le phénotype sont différents et il faudra interpréter le génotype par une procédure pour pouvoir obtenir le phénotype correspondant. Le choix du code doit, entre autres, tenir compte de la complexité du processus de codage/décodage qui peut ralentir les calculs et influencer considérablement la convergence de l'AG. De plus, la qualité de ce code conditionne le succès de l'algorithme génétique.

En plus de cela, on distingue plusieurs types de représentations d'individus dont nous citons les plus utilisées :

- **Représentation binaire** : Proposée par Holland lui-même dans sa version originale des AG où les individus ont été codés sous forme de chaînes binaires, chaque gène est représenté par une sous chaîne binaire constituée d'un nombre m de bits fixé en fonction de la précision souhaitée. Certainement, ce codage est le plus répandu en raison de ses nombreux avantages notamment la simplicité des opérateurs de croisement et de mutation.



3.4.3.3. Fonction d'évaluation ou fitness

Une fois la population initiale créée, les individus les plus prometteurs seront choisis et participeront à l'amélioration de la population. Une valeur sera donc associée à chaque individu appelée *fitness*, *force*, *note*, *adaptation* ou encore *fonction d'évaluation*. Ces valeurs seront utilisées dans l'étape de sélection afin de favoriser les individus les mieux adaptés, autrement dit, les meilleures solutions au problème. L'évaluation représente donc la performance de l'individu vis-à-vis du problème à résoudre.

En effet, le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante.

En général, les différents individus ne sont pas toujours comparables, il n'est pas possible de dire qu'un individu est meilleur ou moins bon qu'un autre. C'est pourquoi, la fonction d'évaluation joue un rôle très important dans l'algorithme génétique. De plus, il est possible d'incorporer dans cette fonction d'autres composantes en rapport avec le processus d'évolution comme des contraintes liées au problème à résoudre par exemple. Un individu de la population qui viole une contrainte du problème se verra attribuer une mauvaise fitness et aura une forte chance d'être écarté.

3.4.3.4. Opérateurs génétiques

Opérateur de Sélection

C'est un processus qui consiste à choisir un ensemble de chromosomes à partir d'une population courante pour construire une nouvelle population qui contient des chromosomes qui semblent être les plus proches de la solution optimale du problème, l'ensemble des chromosomes sélectionnés constituent une population intermédiaire.

Il existe plusieurs méthodes pour la sélection parmi lesquelles la méthode de *la roue de la fortune* qui est la plus utilisée.

L'idée de la méthode est que chaque individu a une chance d'être sélectionné qui est proportionnelle à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème (proches de la solution), plus ils ont de la chance d'être sélectionnés. Le fonctionnement de cette méthode est présenté ci après :

- Chaque chromosome i de la population courante reçoit sa probabilité de sélection :

$$p_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$$

- Pour chaque chromosome i de la population courante, calculer la probabilité cumulée (la somme des probabilités de sélection de R chromosomes précédents)

$$q_i = \sum_{j=1}^R p_j \quad \text{où } R = i - 1$$

- Pour $i = 1 \dots P$ (P étant la taille de la population intermédiaire)
 - Générer un nombre réel aléatoire $r \in [0,1]$.
 - Si $r \in [q_{j-1}, q_j]$ alors sélectionner le chromosome j dans la population intermédiaire, où :
 - q_j : la probabilité cumulée de chromosome j .
 - q_{j-1} : la probabilité cumulée de chromosome qui précède le chromosome j .

Opérateurs de reproduction

Permettant la création de nouveaux individus ou chromosomes selon des mécanismes de reproduction qui sont : le croisement (crossover) et la mutation.

a) Croisement

Le rôle fondamental du croisement est de permettre la recombinaison des informations présentes dans le patrimoine génétique de la population. Il existe dans la littérature plusieurs types de croisement :

Croisement simple (à un point)

Le principe de cet opérateur est :

- Choisir aléatoirement deux chromosomes (parent1 et parent2) à partir de la population intermédiaire,
- Choisir aléatoirement un nombre $k \in [0, L-1]$ (L est la longueur du chromosome), les gènes qui se trouvent avant le gène dans la position k des deux parents choisis seront échangés entre eux.

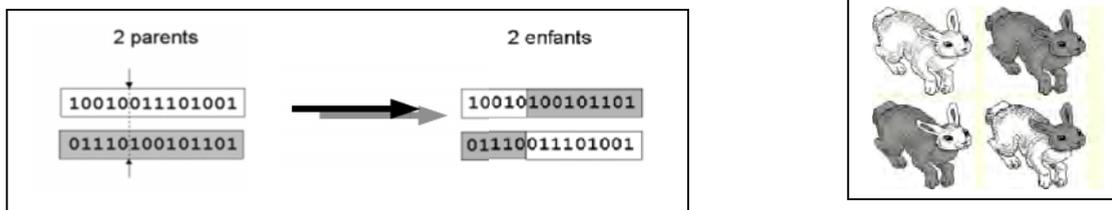


FIGURE 3.3. Représentation du croisement simple à un point.

Croisement multi-points

Le principe de cet opérateur est le même que l'opérateur de croisement simple, sauf qu'il consiste à choisir plusieurs points de croisement et échanger les gènes des deux parents situés entre les points de croisement.

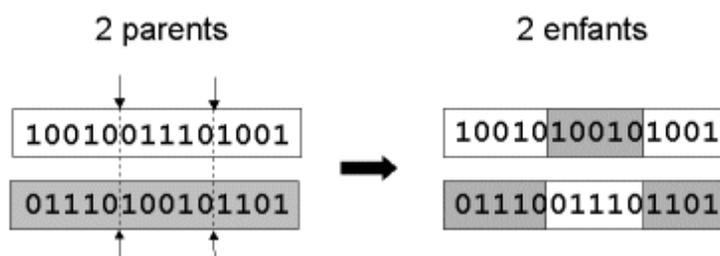
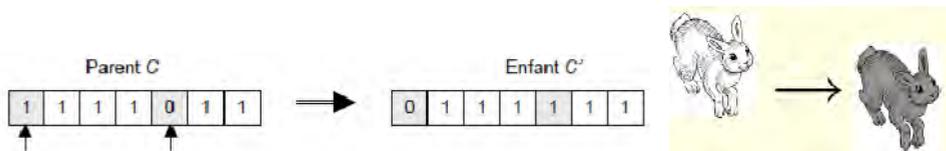
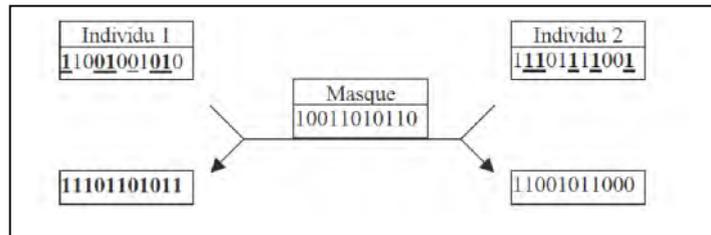
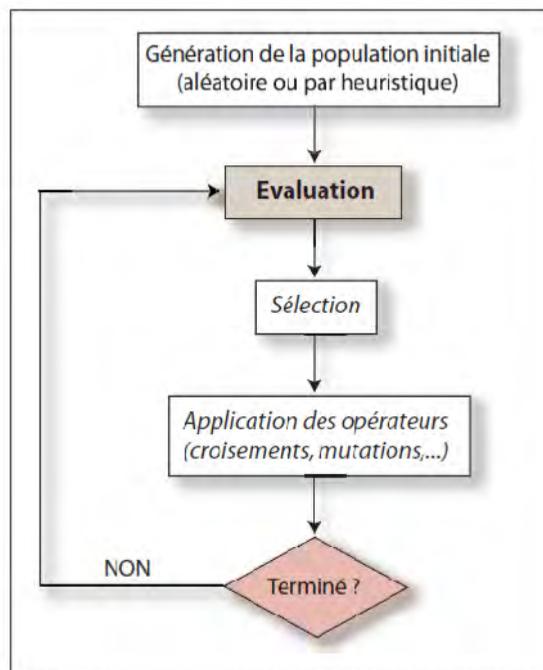


FIGURE 3.4. Représentation du croisement à 2 points





envisageables. La taille de la population doit être choisie de façon à réaliser un bon compromis entre le temps de calcul et la qualité du résultat, elle est généralement entre 20 et 100 individus.

D'autre part, le nombre d'itérations est préférable qu'il soit assez grand afin de mieux visualiser la convergence de la solution. Certains auteurs utilisent 1000 générations et d'autres 10 000. L'essentiel est de trouver des solutions en un nombre réduit de générations.

Les paramètres de croisement, sélection et mutation ont aussi une influence considérable sur la vitesse de convergence d'un AG. Certaines valeurs de bonne pratique sont données dans la littérature telles que:

Un taux de croisement de 0.6 pour une population de 100 individus, et un taux de 0.9 pour une population de 30 individus.

Un taux de mutation de 0.001 pour une population de 100, et un taux de 0.01 pour une population de 30 individus.

3.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des systèmes multi-agents adaptatifs, qui constituent actuellement un domaine de recherche à part entière. Les systèmes multi-agents adaptatifs doivent être dotés de capacités leur permettant de faire face à l'imprévu qu'ils rencontrent. A cet effet, nous avons dégagé deux questions primordiales :

- *Quels sont les indices à collecter pour que le système puisse reconnaître cet imprévu face auquel il doit s'adapter?*
- *Quels sont les mécanismes à mettre en place pour que le système ait la capacité de s'adapter?*

A partir de l'étude faite dans ce chapitre sur l'adaptation, nous pouvons identifier les caractéristiques suivantes :

- l'adaptation correspond à un changement organisationnel du système ;
- l'auto-organisation, employée actuellement dans une panoplie de disciplines et d'applications, est un mécanisme d'adaptation ;
- les interactions locales aux agents sont à la base de plusieurs approches et mécanismes d'adaptation ;
- les algorithmes génétiques qui sont considérés comme auto-adaptatifs peuvent faire émerger des solutions intéressantes.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une approche d'adaptation basée sur les interactions locales et les algorithmes génétiques.

Chapitre IV

Notre approche GAMuS

**Genetic auto-Adaptive
Multi-agent System**

Chapitre IV

Notre approche GAMuS Genetic auto-Adaptive Multi-agent System

*Pourquoi doit-on coopérer ?
Tout simplement parce que nos capacités sont limitées.*

4.1. Introduction

Un système adaptatif est un système qui doit être doté de capacités lui permettant, de manière autonome, de s'adapter aux perturbations qui lui sont exercées. Ces perturbations peuvent être externes ou internes dues par exemple à des évolutions qu'ont subies les agents le constituant. Comme le souligne plusieurs chercheurs dans ce domaine, l'adaptation dynamique peut être structurelle ou comportementale [Hoogendoorn 07], [Guessoum 03], la première correspond à un changement organisationnel, la deuxième correspond à une régulation des aptitudes comportementales et communicationnelles, et ce dans le but d'améliorer la performance globale du système. Toutefois, le système doit aussi être capable d'identifier les circonstances de perturbations qu'il rencontre durant son fonctionnement.

Nous soulevons, à cet effet, trois questions importantes :

- Quelles sont les perturbations que le système doit-il considérer ? c'est-à-dire quel est l'objectif visé par l'adaptation ?
- Comment le système doit-il identifier ces perturbations qui l'entourent ?
- et, quel est le mécanisme d'adaptation adéquat qu'il faudra adopter ?

Ce chapitre présente l'approche centrée sur l'évolution de l'organisation que nous proposons. Nous nous intéressons, dans cette thèse, aux systèmes multi-agents coopératifs. En effet, la coopération est une attitude sociale assez importante et qui permet d'augmenter, dans les sociétés humaines ou artificielles, la performance globale [Lisa et al. 01]. Elle se fonde à la fois sur la complémentarité d'intérêt et la confiance [Melaye et al. 05]. Dans de telles sociétés les agents doivent être regroupés par affinités, c'est à dire de manière à pouvoir coopérer dans la résolution du problème. A cet effet, nous soulignons que la tâche globale d'un système coopératif n'est accomplie que si les agents le constituant exercent leurs fonctions respectives en coopérant les uns avec les autres. Par conséquent, il est clair que le regroupement des agents et les relations qui les unissent sont d'une importance particulière. Les systèmes que nous considérons sont alors composés d'agents coopératifs qui partagent les mêmes buts, ont des intérêts communs ou ont des compétences complémentaires, tels que :

- les sociétés d'agents ayant les mêmes centres d'intérêts comme les systèmes de e-Learning, les réseaux sociaux, les systèmes de filtrage d'informations, de recommandations, d'édition collaborative, etc...
- les sociétés où les agents doivent se compléter dans la réalisation de la tâche globale du système, telles que les systèmes de production, les systèmes modélisant l'entreprise virtuelle, de reconnaissance de formes, co-conception, etc....

De ce fait, dans nos préoccupations principales il y a le souci de maintien d'un *degré acceptable de coopération* entre les agents du système, ce degré peut diminuer suite à des perturbations exercées par l'environnement ou par les agents eux-mêmes, ces perturbations peuvent être :

- par évolution des agents : évolution de leurs compétences, de leurs intérêts, etc....
- par évolution des contraintes imposées par l'environnement : besoin de changement de rôles, de tâches, etc....

Nous ne nous intéressons pas au fait que les composants du système doivent apprendre des connaissances ou doivent évoluer en compétences sur le domaine d'application. Cette évolution, à notre sens, peut faire partie des comportements et compétences des agents, et peut en résulter un changement imprévu dans l'environnement et pour lequel il faudra éventuellement s'adapter. Notre intérêt est centré sur l'adaptation collective de l'organisation dans le but d'améliorer ou maintenir la coopération dans le système. Notre intérêt est de rapprocher les agents les uns des autres de manière à pouvoir se rassembler par centres d'intérêt ou par complémentarité de compétences afin de

pouvoir réaliser correctement et convenablement la tâche pour laquelle ils ont été conçus.

Nous avançons alors l'idée d'une approche d'adaptation basée sur les points clés suivants :

- L'environnement dans lequel est immergé le système est un environnement ouvert et dynamique, et les agents n'ont qu'une vue partielle et locale de celui-ci.
- Dans les systèmes réels ou artificiels il n'existe pas d'organisations parfaite, il existe plutôt des organisations bonnes ou acceptables et qui sans doute évoluent.
- Les systèmes considérés sont des systèmes coopératifs, les agents les constituant sont des agents cognitifs coopératifs. Ils cherchent de manière continue à se regrouper pour former les bonnes équipes, les bons groupes ou les bonnes communautés.
- Les agents du système sont regroupés par affinités. Ils forment des réseaux d'accointances.
- Le processus d'adaptation se base sur les perceptions locales des agents. En effet, les agents détectent localement les perturbations et réagissent en conséquence par un ajustement des forces des relations qui les unissent.
- Dans certaines situations, la vision locale s'avère insuffisante, une réorganisation globale est alors à envisager. Le processus d'adaptation globale adopté se base sur l'algorithmique évolutionnaire dans le but de chercher une structure organisationnelle qui soit au mieux coopérative.

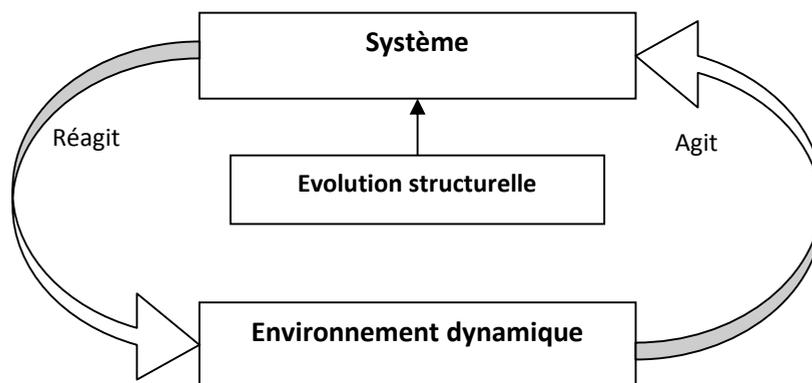


FIGURE 4.1. Evolution du système.

Pour atteindre ces objectifs, nous nous sommes basés sur *l'évaluation locale des interactions*. Les agents, en plus de leur fonction pour laquelle ils ont été conçus, doivent de manière continue évaluer la *qualité de leurs interactions* avec leurs accointances. Cette qualité, qui dépend fortement du domaine d'application, est *un indicateur local* du taux de perturbations qui surviennent autour de l'agent. Ce dernier réagit par adaptation locale, et si le besoin se présente, c'est-à-dire que les

perturbations soient au-delà d'un certain seuil, le système procède à une adaptation globale. Dans les deux niveaux d'adaptation proposés un processus d'auto-organisation est observé.

Notre contribution peut être résumée comme suit :

Une approche d'adaptation par auto-organisation des systèmes multi-agents coopératifs, basée sur l'évaluation des interactions et l'évolution des structures organisationnelles.

4.2. GAMUS : vue d'ensemble

GAMUS Genetic auto-Adaptive Multi-agent System est une approche pour la construction de systèmes multi-agents auto-adaptatifs. Nous proposons un modèle de systèmes dotés de capacités d'adaptation dont l'objectif principal est de rapprocher au mieux les agents pouvant coopérer dans la résolution du problème. Les systèmes considérés doivent être des systèmes coopératifs. Avant de présenter notre modèle, nous essayons d'abord de nous situer par rapport aux systèmes coopératifs.

4.2.1. Systèmes coopératifs

Quand plusieurs personnes sont rassemblées avec un esprit de coopération, alors un groupe ou une équipe est en train de naître. Le potentiel d'un groupe est très souvent plus grand que la somme des contributions de ses membres [Akola et al. 06]. C'est parce qu'ils coopèrent que les membres peuvent accomplir plus que la somme de leurs actions [Ferber 95].

Des systèmes coopératifs doivent alors être composés d'agents coopératifs –le terme agent est pris dans le sens large c'est-à-dire agent humain ou artificiel- qui sont toujours sincères (ne mentent pas) et tiennent à maintenir un degré de compréhension mutuelle, de non ambiguïté dans un but commun qui est l'accomplissement de la tâche qui leur est confiée par coopération [Glizes 04], [Hoet et al. 09]. Ils doivent alors être regroupés par affinités, et/ou par complémentarité. Les liens qui les unissent doivent se différencier par la capacité de coopération existante entre eux et qui modélise leur capacité à pouvoir accomplir ensemble une tâche donnée, cette dernière doit dépendre fortement de leurs compétences et leurs centres d'intérêt. Cette capacité est susceptible de changer dans le temps, elle peut augmenter comme elle peut diminuer du fait que tout le système est en perpétuelle évolution. Les agents doivent pouvoir alors se rendre compte de ce changement et corriger l'idée qu'ils ont l'un de l'autre.

A cet effet, nous considérons que le maintien du degré global de coopération dans le système résulte de l'ajustement du degré de coopération entre les différents agents pris deux à deux, et ce en conséquence à l'évolution imposée par et/ou au système. Quels mécanismes alors adopter pour permettre aux agents de percevoir les perturbations afin de pouvoir s'adapter ?

Nous proposons de nous baser sur les interactions entre les différents agents, puisqu'elles constituent un support effectif de la coopération [Sabouret 09], [El fellah 06]. Les interactions, dans le cadre de cette thèse, présentent pour le système un moyen d'accomplir sa fonction et un moyen d'évaluer sa stabilité ou sa perturbation.

En effet, le gain et la satisfaction que peut tirer un agent A à partir de ses interactions avec un agent B peuvent lui permettre d'évaluer l'importance de la relation qui les unie. Lorsque ce gain est considéré comme non satisfaisant ou de peu d'intérêt la relation impliquée peut être remise en cause. Une interaction satisfaisante est une interaction qui doit améliorer qualitativement ou quantitativement les actions qui y sont reliées [Rejeb 05].

4.2.2. Approche proposée

Nous proposons un modèle de systèmes multi-agents auto-adaptatifs basé sur l'évaluation des interactions et l'évolution des structures organisationnelles. Le modèle proposé se base principalement sur les points clés suivants :

- Le système est composé d'un ensemble d'agents regroupés par besoin et capacité de coopération.
- Chaque agent possède un ensemble d'acointances qui représentent les agents capables de coopérer avec lui pour la résolution du problème. En effet, plusieurs travaux en sociologie et simulations multi-agents ont montré que les simples réseaux d'acointances assurent le partage d'informations dans les équipes humaines ou artificielles [Scerri et al. 08].
- Les degrés de coopération varient d'une paire d'agents à une autre, et ce selon les compétences et centres d'intérêt respectifs.
- Ces degrés de coopération servent à indiquer la force des connexions reliant les agents du système.
- L'ensemble de ces connexions représentant un réseau d'acointances donne une information organisationnelle.
- Le processus d'adaptation consiste à faire évoluer le système vers une *structure organisationnelle coopérative*.
- Une structure organisationnelle est coopérative si les agents la constituant sont en coopération (c'est à dire s'ils sont regroupés par affinités).
- Une structure organisationnelle coopérative est une structure dont les liens expriment *bien* le degré de coopération des différents agents, dans le sens où les agents sont rapprochés les uns des autres selon leur capacité à coopérer.

- Le processus d'évolution adopté se base sur :
 - **Une évaluation locale des perturbations** : en plus des fonctions qui leurs sont confiées, les agents évaluent les interactions échangées avec leurs accointances. Cette évaluation, qui exprime le gain et la satisfaction qu'apporte l'interaction à l'agent, permet à ce dernier d'évaluer à son niveau les perturbations que le système rencontre. A notre sens, les perturbations expriment le fait que l'agent ne soit pas à la bonne place ou ne soit pas en contact avec les bons agents.
 - **Adaptation au niveau local** : les agents du système s'adaptent aux changements par ajustement des degrés de coopération (poids des liens) existant entre eux. L'ajustement s'effectue en concordance avec l'évaluation de l'interaction : certaines relations se renforcent et d'autres s'affaiblissent. *Une réorganisation locale est alors observée.* Les agents communiquent leur sensation de perturbation à un agent médiateur responsable de l'adaptation globale.
 - **Adaptation au niveau global** : au-delà d'un certain seuil de perturbations subies par les agents du système, un récapitulatif des évaluations locales est établi par un autre agent dit médiateur. Ce dernier procède à un processus d'évolution du système qui s'appuie sur la création, à l'aide d'opérateurs dérivés de l'algorithmique génétique, d'une suite de populations d'organisations d'agents afin de converger vers une organisation dont le comportement sera jugé bon.

Le diagramme suivant résume le modèle d'adaptation proposé :

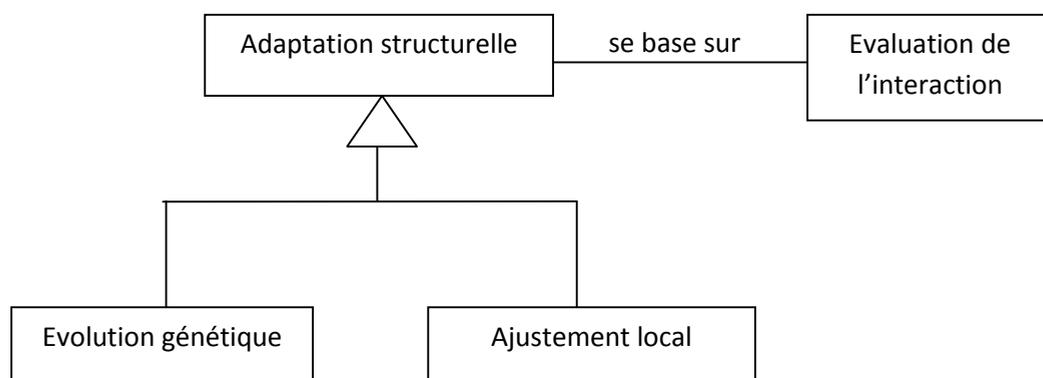


FIGURE 4.2. Modèle d'adaptation.

L'adaptation au niveau global se base sur une évolution génétique des structures organisationnelles, l'approche génétique permet de retrouver un ordre à partir d'un désordre, nous adoptons cette approche à un niveau global dans le sens où l'on peut voir émerger une structure organisationnelle qui regroupe les agents du système d'une

manière assez intéressante et parfois que l'on peut rater par l'adaptation locale. Nous présentons les concepts importants dans le diagramme suivant :

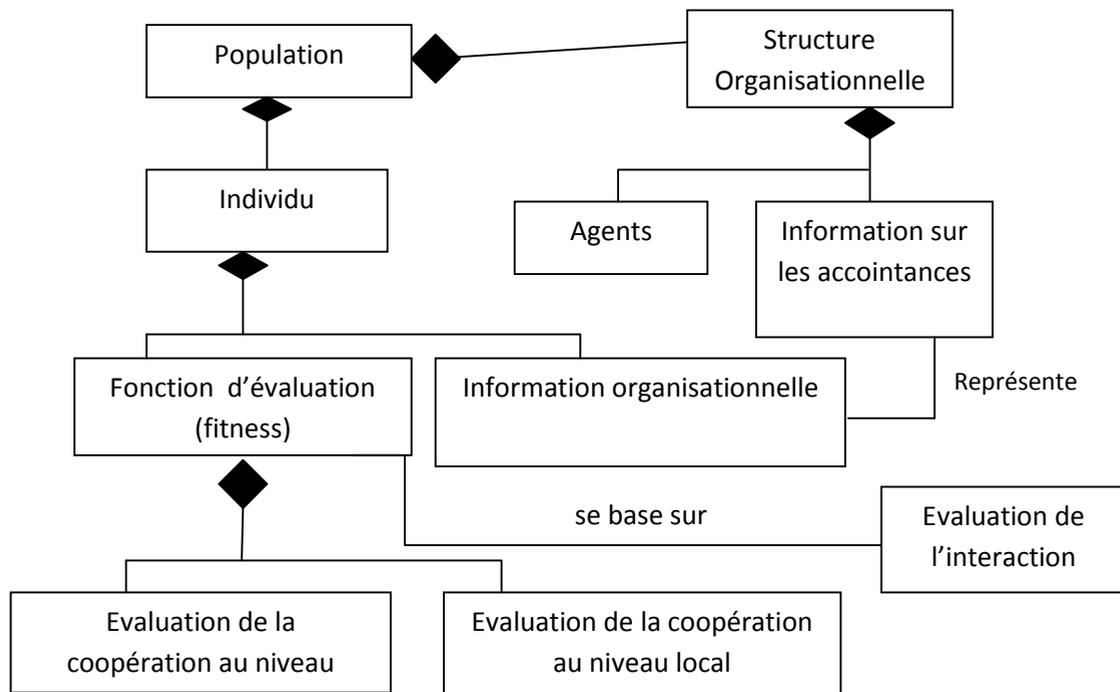


FIGURE 4.3. Evolution génétique du système.

4.2.3. Notre modèle

Dans GAMuS un système adaptatif est composé de :

- Un ensemble d'agents dits *Task Agents (TAs)* conçus pour réaliser la fonction du système et qui sont caractérisés par :
 - Ceux sont des agents coopératifs et généralement cognitifs (nous ne posons aucune condition sur leurs compétences, le libre choix est accordé au concepteur).
 - Chaque *TA* possède un ensemble d'accointances auxquels il est relié. Ces accointances doivent être, à tout instant de la durée de vie du système, les agents du système qui lui conviennent le plus pour pouvoir coopérer. Notons que nous ne posons aucune condition sur le fait que les agents soient fortement ou faiblement couplés, ceci dépend du domaine d'application.
 - Les connexions des *TAs* sont pondérées, les poids correspondants expriment le degré de coopération entre eux. Deux agents dont les compétences se complètent doivent avoir un haut degré de coopération. Ce degré est représenté dans ce modèle par ce que nous appelons *croissance sur la coopération* que nous définirons par la suite.

- En plus de leurs compétences relatives au domaine d'application qui leur permettent d'assurer la tâche qui leur est confiée, les *TAs* sont dotés d'aptitudes d'adaptation. Ils se basent sur l'évaluation des interactions établies entre eux pour ajuster les poids des connexions les reliant. L'ajustement est modélisé par une correction de leurs croyances sur la coopération.
- Un **agent médiateur** dont le rôle est d'assurer la fonction d'adaptation globale se basant sur les algorithmes génétiques, les points clés de sa fonction sont présentés ci-dessous :
 - Les algorithmes génétiques ont montré leur efficacité dans la résolution de nombreux problèmes et notamment dans les problèmes d'optimisation. Ce sont des procédures de recherche numérique sur des paysages de grandes dimensions et/ou compliqués. Une de leurs caractéristiques les plus importantes est qu'ils combinent efficacement exploration/exploitation, et ils explorent l'espace de recherche de façon massivement parallèle.
 - Ces algorithmes reposent en premier lieu sur les théories Darwiniennes de l'évolution des espèces par des mécanismes d'héritage génétique et de sélection naturelle. Le principe fondamental est la manipulation de *populations d'individus* qui représentent des points de l'espace de recherche pour un problème donné. Il s'agit alors d'appliquer stochastiquement un ensemble d'opérations sur chacun des individus tout en les catégorisant par *générations* du processus artificiel d'évolution. Si ce principe est appliqué correctement, il produit alors une recherche stochastique dynamique dans l'espace de recherche qui converge vers un état d'optimum global pour le problème traité [Fatima et al. 05]. Nous proposons d'exploiter les performances de cette approche dans l'évolution des populations d'organisations.
 - Dans notre cas, nous cherchons à maintenir ou améliorer le degré de coopération entre les *TAs*, il s'agit alors de trouver la structure organisationnelle la plus adéquate au système à un instant donné. Ce problème peut être vu comme un problème de recherche dans un espace d'états où l'ensemble des solutions (états) est un ensemble de structures organisationnelles ; ce problème peut être aussi vu comme un problème d'optimisation de la structure organisationnelle dans le but d'atteindre une structure coopérative. Dans l'un ou l'autre cas nous pensons que les algorithmes génétiques peuvent beaucoup apporter. Par conséquent, nous proposons de les utiliser comme mécanisme d'adaptation globale.
 - L'*agent médiateur* doit guetter les perturbations qui surviennent dans le système, quand celles-ci dépassent un certain seuil les *TAs* l'informent des taux respectifs qu'ils perçoivent à leur niveau.
 - L'*agent médiateur* procède à une réorganisation au niveau global des *TAs*. En se basant sur l'évolution des populations d'organisations, l'agent médiateur applique un algorithme génétique qui cherche à optimiser les liens organisationnels entre les *TAs*, à savoir les croyances

sur la coopération, et ce dans le but de rencontrer une structure organisationnelle qui soit satisfaisante.

- Un ensemble de *croiances sur la coopération* des *TAs* les uns sur les autres, cet ensemble modélise une structure organisationnelle du système.

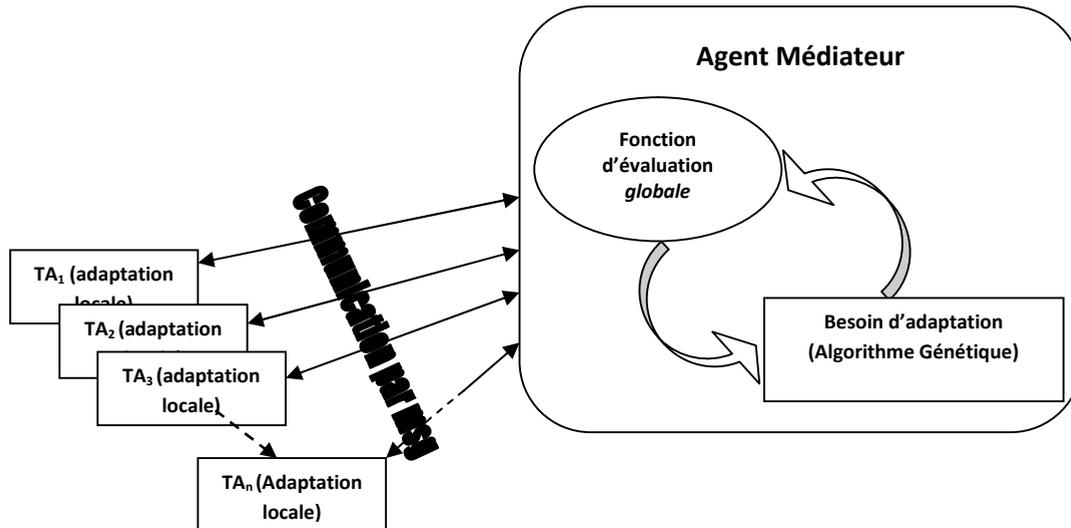


FIGURE 4.4. Système multi-agents adaptatif dans notre modèle.

4.3. Modèle des agents du système

4.3.1. Task Agents

Chaque task agent est défini par ses compétences, a un composant de description locale de l'environnement, un langage d'interactions spécifique au domaine d'application et un composant de perception et d'adaptation. Le concepteur du système doit définir les trois premiers composants qui dépendent étroitement du domaine d'application. Par contre le dernier composant modélise et définit la faculté d'adaptation des *TAs*.

Nous détaillons dans ce qui suit les différents composants :

1. Compétences

Les compétences de l'agent représentent ses capacités à pouvoir accomplir la fonction pour laquelle il a été conçu. Ce composant définit le savoir faire de l'agent et est étroitement lié au domaine d'application.

2. Description locale de l'environnement

Dans le cas d'un système coopératif comme nous l'avons fixé, les agents ont besoin d'avoir des contacts pour accomplir leurs tâches et ce sont ces contacts qui nous intéressent et que nous considérons comme étant l'environnement local des agents (naturellement d'autres objets peuvent exister tels que les ressources). La description locale de l'environnement est constituée de l'ensemble des accointances ainsi que les croyances sur la coopération correspondantes.

3. Langage d'interactions

Dans les systèmes que nous considérons, basés la communication directe, un agent doit pouvoir demander à ses accointances soit d'exécuter une action qu'il ne peut effectuer lui-même, soit un avis sur quelque chose, etc... Les interactions ayant lieu doivent lui permettent d'évaluer la conformité de ses croyances sur la coopération avec les capacités respectives de ses accointances à coopérer avec lui.

De plus, les opérations de coordination au sein du système nécessitent avant tout de pouvoir déléguer des tâches ou de s'informer de l'état de l'autre agent, la forme la plus utilisée est en fait requête/ réponse.

Afin de pouvoir interagir et d'évaluer la *qualité* de ces interactions, nous proposons de définir pour chaque *TA* le langage d'interaction avec lequel il devra communiquer avec ses accointances, le langage doit contenir l'ensemble des requêtes et réponses échangées entre les agents, à chaque interaction possible une évaluation de la qualité est définie : une interaction bénéfique à l'agent devrait le satisfaire, et au contraire une interaction d'aucun intérêt devrait le gêner.

4. Perception de l'environnement et adaptation

Ce composant permet à l'agent d'analyser le résultat de toutes ses interactions avec ses accointances et de garder trace des perturbations rencontrées à son niveau. Il lui permet de plus de s'adapter de manière locale par ajustement de liens. Dans la section suivante nous détaillerons les fonctions relatives à ce composant.

La figure présentée ci après illustre le modèle d'un Task Agent :

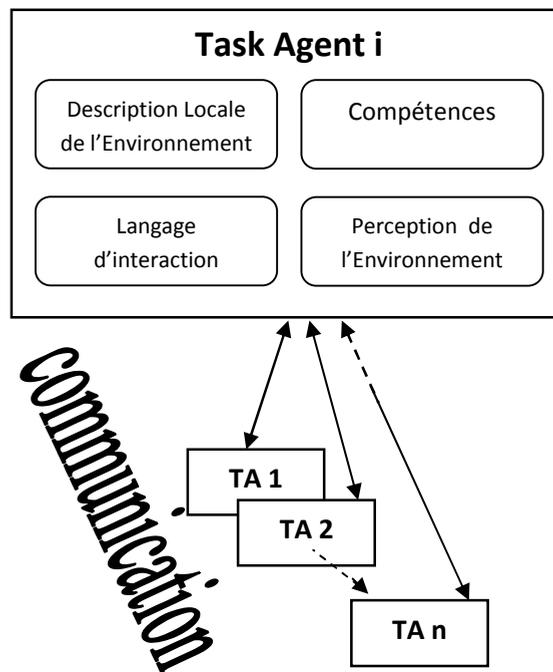


FIGURE 4.5. Modèle d'un Agent Task.

4.3.2. Agent médiateur

L'agent médiateur est conçu pour assurer l'adaptation globale du système, il est formé de 3 composants :

1. Perception

L'agent médiateur guette les perturbations du système à partir des signaux envoyés par les *TAs*. Il est continuellement à l'écoute des *TAs*, et reçoit les signaux indiquant les perturbations perçues localement à leur niveau.

2. Décision

Il évalue ces perturbations et décide à quel moment faudra-t-il lancer le processus de réorganisation globale. La décision dépend du taux global de perturbations, quand le degré de coopération dans le système descend au dessous d'un certain seuil, le système est alors jugé en besoin d'adaptation globale.

3. Exécution

Il applique un algorithme génétique qui agit sur les liens entre les *TAs*, dans le but d'améliorer à chaque pas de l'algorithme la coopération entre eux. Nous présenterons en détails le fonctionnement de ce composant dans la section suivante.

Le modèle de l'agent médiateur est présenté ci-dessous :

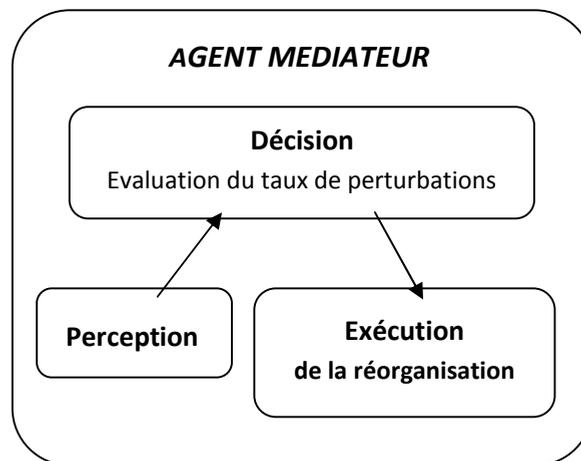


FIGURE 4.6. Modèle de l'agent médiateur

4.3.3. Croyances sur la coopération

4.3.3.1. Présentation

Dans la littérature, [Ochs et al. 08], [Scerri et al. 08] les relations sociales sont généralement représentées par un ensemble de variables, notons par exemple le degré d'*appréciation* d'un agent pour un autre, la *dominance* c'est-à-dire le pouvoir qu'un agent peut exercer sur un autre, la *solidarité* qui exprime le degré de similarité de deux agents en termes de buts, de croyances et de valeurs (e.g. membre d'une même équipe de travail, d'une même famille, etc.), la *réputation* qui à son tour correspond à une croyance ou image qu'un agent peut avoir d'un autre. Ces relations sont modélisées généralement par des variables réelles prenant des valeurs dans les intervalles [0..1] et [-1..1] selon la nature de la relation.

Dans notre modèle, nous proposons de représenter la relation *sociale* entre les *TAs* par ce que nous appelons *la croyance sur la coopération* de l'un envers l'autre.

Définition 1

La croyance sur la coopération de l'agent TA_i sur l'agent TA_j , notée $CC(TA_i, TA_j)$, est un degré exprimant la capacité de coopération de TA_j quand TA_i le sollicite.

Cette croyance dépend principalement des compétences et/ou intérêts de l'agent TA_j par rapport à ceux de l'agent TA_i . Rappelons que nos agents sont coopératifs et tiennent à s'entraider dans la résolution du problème, nous proposons alors que les valeurs des croyances sur la coopération soient comprises entre 0 et 1 ; une valeur négative de la croyance ne peut exprimer que la mauvaise volonté entre les agents ce qui est contradictoire au comportement d'un agent coopératif.

Nous avons alors :

$$CC(TA_i, TA_j) \in [0..1] \quad i,j = 1..N \quad \text{où}$$

N : étant le nombre total des task agents du système

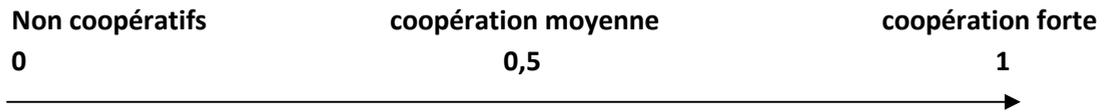


FIGURE 4.7. Variation des CC en fonction de la coopération

Pour un agent TA_i les croyances sur la coopération représentent les *poids des liens* le reliant à ses accointances, la table suivante présente un exemple :

Accointances	TA_j	TA_1	TA_m	TA_c	.....	TA_n
TA_i	0.9	0.36	0.47	0.38	.....	0.75

TABLE 4.1. Table locale des croyances sur la coopération de l'agent TA_i .

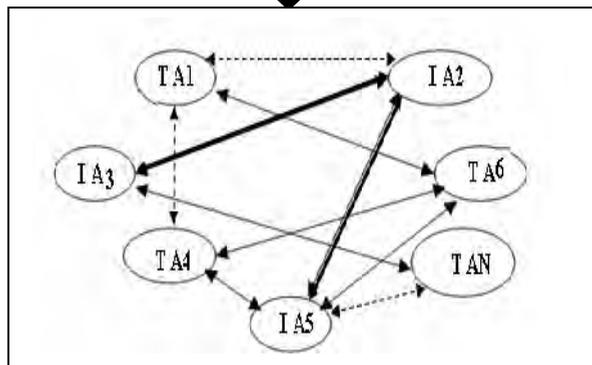
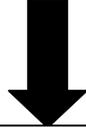
La *table locale des croyances sur la coopération* de l'agent TA_i est une table qui contient l'information sur ses accointances ainsi que leurs capacités respectives de coopérer avec lui. Elle représente sa description locale de l'environnement.

La *table globale des croyances sur la coopération* est la table récapitulative de toutes les tables locales des différents task agents.

Task Agents	TA_1	TA_2	.....	TA_n
TA_1		$CC(TA_1, TA_2)$	.....	$CC(TA_1, TA_n)$
TA_2	$CC(TA_2, TA_1)$		...	$CC(TA_2, TA_n)$
...
TA_n	$CC(TA_n, TA_1)$	$CC(TA_n, TA_2)$	....

TABLE 4.2. Table globale des croyances sur la coopération.

	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6	TAn
TA1		0.32	0	0.45	0.65	0.55	0
TA2	0.25		0.87	0.43	0.87	0.29	0
TA3	0	0.75		0.69	0.33	0.45	0.42
TA4	0.39	0.52	0.66		0.69	0.52	0.53
TA5	0.91	0.52	0.44	0.45		0.69	0.26
TA6	0.45	0.52	0.72	0.53	0.45		0.44
TAn	0	0.33	0.45	0.69	0.38	0.69	



- *Valeurs initiales calculées par les Task Agents* : toutefois, ces valeurs peuvent être calculées par les *TAs* eux-mêmes et dans ce cas le concepteur dotera ses agents du moyen de calcul adéquat.
- *Valeurs initiales aléatoires* : dans le cas où il n'existe pas d'informations sur les degrés de rapprochement des agents, les valeurs initiales des croyances doivent être aléatoires, mais dans ce cas une réorganisation du système est alors nécessaire dès sa création.

Notons que notre modèle prend en considération les trois cas cités ci-dessus ; nous montrerons dans le chapitre suivant un exemple où les agents eux-mêmes prennent en charge cette opération.

4.4. Adaptation

Nous admettons, dans cette thèse, qu'une structure organisationnelle coopérative est une structure acceptable pour le bon fonctionnement du système et elle représente un objectif primordial pour le processus d'adaptation.

Nous cherchons alors à avoir constamment une table globale de croyances sur la coopération qui exprime le plus les capacités des *TAs* à coopérer entre eux. Chaque task agent TA_i doit pouvoir retrouver les agents les plus aptes à coopérer avec lui à partir de sa table locale des croyances sur la coopération. Afin de maintenir ou d'améliorer le degré de coopération dans le système, ces croyances doivent être ajustées et corrigées selon les circonstances d'évolution de l'environnement que subissent les agents. Comme nous l'avons déjà précisé, cette évolution doit être repérée par les agents eux-mêmes. A cette fin, nous proposons de nous baser sur l'évaluation des interactions qui permet d'indiquer le taux de satisfaction de l'agent vis-à-vis de son interlocuteur (un de ses accointances).

Exemple d'une situation d'interaction

Dans une équipe de recherche, par exemple où les chercheurs sont représentés par des *TAs*, un agent TA_i peut solliciter un agent TA_j pour lui fournir des documents sur un thème particulier qui soit un centre d'intérêt commun à TA_i et TA_j , naturellement selon la croyance sur la coopération qu'a TA_i de TA_j , dans une telle situation si TA_j fournit des documents qui ne soient pas intéressants pour TA_i , l'interaction du point de vue de TA_i est considérée comme non satisfaisante, il doit penser à corriger sa croyance sur la coopération correspondante à TA_j .

Nous présentons dans cette section le processus d'évaluation des interactions sur lequel se base l'adaptation dans notre modèle.

4.4.1. Evaluation de l'interaction

Les interactions peuvent être considérées comme étant une suite d'actions (communications ou non) des agents [Fer95], [Sabouret 09] (dans notre cas

l'interaction est réalisée par une communication directe c'est-à-dire par une suite d'échanges de messages). Ces actions permettent la perception de l'incidence qui peut être positive, négative ou nulle selon que l'interaction apporte une aide, une gêne ou ne soit d'aucun intérêt [Thomas 05] ; il est clair que dans le premier cas les agents interagissant sont en situation de coopération, tandis que dans le deuxième ils doivent revoir la nature de la relation qui les unie et par conséquent ils doivent revoir la croyance sur la coopération correspondante. L'évaluation de ces interactions demeure un moyen important pour la perception des perturbations. Plusieurs critères relatifs aux interactions peuvent être considérés dans ce cas tels que la qualité de la réponse, le coût de cette réponse, le temps, etc. Nous considérons, dans le cadre de cette thèse, la qualité de la réponse qui est étroitement liée au domaine d'application et le temps de réponse qui représente une fonction de coût souvent considérée dans les interactions.

Nous introduisons pour cela les notions de temps de réponse et qualité d'interaction. Soient deux task agents TA_i et TA_j en interaction, où TA_i est l'initiateur, l'interaction peut être composée de deux messages ou plus. Nous définissons :

Définition 2

Temps de réponse noté TR le temps que met TA_j pour faire suite à la requête de TA_i , le temps de réponse peut indiquer entre autres l'intérêt qu'a le récepteur pour l'émetteur. Un seuil de temps de réponse doit être défini pour permettre d'une part d'évaluer l'interaction et d'autre part de prendre en charge le cas où le récepteur ne répond pas pour une raison de panne par exemple. Nous avons nécessairement pour une interaction satisfaisante le temps de réponse qui ne doit pas dépasser un seuil donné, soit:

$$TR \leq TRt \quad \text{où } TRt \text{ est le seuil de temps de réponse}$$

Définition 3

Qualité de l'interaction notée QuI est calculée selon les messages échangés entre TA_i et TA_j suite à la requête initiée par TA_i , ce paramètre permet d'estimer le taux de satisfaction de TA_j par rapport à la (les) réponse(s) de TA_j et ce selon le gain perçu par TA_i . La QuI est définie relativement au domaine d'application, où

$$QuI \text{ est un nombre réel appartenant à } [-1, +1].$$

Les task agents utilisent les paramètres, TR et QuI dans l'évaluation de l'interaction. Nous définissons :

Définition 4

Evaluation de l'interaction notée $Eval(QuI, TR)$ la fonction qui permet de fournir une appréciation sur l'évaluation de l'interaction. Cette fonction rend une valeur réelle appartenant à $[-1, +1]$.

Nous posons :

$$Eval(QuI, TR) = \begin{cases} +1 & \text{interaction très satisfaisante} \\ 0 & \text{interaction moyenne} \\ -1 & \text{interaction non satisfaisante} \end{cases}$$

L'évaluation de l'interaction est calculée en fonction des deux paramètres TR et QuI selon l'algorithme suivant :

Si $TR > TRt$ // l'interaction est abondannée
Alors $Eval(QuI, TR) = -1$
Sinon $Eval(QuI, TR) = QuI$

Une interaction très satisfaisante doit permettre à l'agent TA_i de renforcer son lien avec l'agent TA_j .

Définition 5

Une *interaction* est dite **fructueuse** par rapport à TA_i si elle s'est déroulée dans un temps acceptable et que la valeur de QuI correspondante est bonne, une interaction fructueuse est une interaction où:

$$Eval(QuI, TR) > 0$$

Comme nous l'avons déjà précisé, les task agents possèdent un composant décrivant les interactions qu'ils peuvent établir et que nous avons appelé langage d'interactions qui sera défini par le concepteur du système. Les interactions doivent être décrites par :

- **Sujet de l'interaction**: qui est généralement une requête avec une suite d'échanges, cette dernière peut se limiter simplement à une réponse de l'agent récepteur.
- **Evaluation** : permet à l'initiateur de calculer la qualité de l'interaction selon la réponse du récepteur. La fonction d'évaluation doit être clairement définie conformément au domaine d'application.

Notons que la définition du langage d'interactions influence en grande partie le succès du processus d'adaptation.

4.4.2. Détection de perturbations

Les perturbations dans un système, où l'objectif primordial est de maintenir un degré de coopération acceptable, peuvent être exprimées par l'affaiblissement de ce degré. Au niveau local des *TAs* cet affaiblissement est perçu suite aux interactions non fructueuses.

Suite à chaque interaction établie entre un agent TA_i et un agent TA_j , TA_i calcule d'une part $Eval(QuI, TR)$ et selon sa valeur il calcule le taux de non coopération à un instant t appelé $F_i(TA_j)$ et qui représente le taux d'interactions non fructueuses.

Nous définissons le *taux local de non coopération* $F_i(TA_j)$ par:

$$F_i(TA_j) = \frac{nFInt(TA_i)}{tInt(TA_i)} \quad (1)$$

où

$nFInt(TA_i)$: Nombre des interactions non fructueuses de TA_i

et $tInt(TA_i)$: Nombre total des interactions de TA_i ;

Ce taux ne doit pas dépasser un seuil prédéfini dit *seuil de non coopération locale*, noté **Sa**. Dans le cas contraire, c'est-à-dire que l'agent TA_i se trouve dans une situation de perturbations totale, ce dernier envoie un signal à l'agent médiateur lui transmettant son taux local de non coopération.

Si $F_i(TA_i) > Sa$

**Alors TA_i envoie un signal de perturbations
à l'agent médiateur.**

4.4.3. Adaptation locale par correction des croyances

Les task agents ont toute la volonté de coopérer ensemble, s'ils le peuvent ; dans le cas contraire nous pouvons affirmer que ce sont leurs croyances sur la coopération qui n'expriment pas correctement leurs capacités et doivent alors être corrigées. Nous proposons alors que les agents corrigent au fur et à mesure leurs croyances en fonction des évaluations des interactions établies. Nous proposons une *correction adaptative* qui soit établie *d'un pas* assez faible mais de manière *continue*, nous la qualifions d'adaptative. Nous nous inspirons un peu des systèmes connexionnistes où les poids des connexions subissent un ajustement de faible valeur mais de manière répétée afin d'atteindre la valeur optimale souhaitée.

La correction, à notre sens, s'effectue de manière continue du fait que l'on observe autour de nous une perpétuelle évolution de nos relations sociales et nos croyances les uns envers les autres.

Par analogie, suite à chaque interaction entre les agents TA_i et TA_j , TA_i corrige sa croyance sur la coopération envers TA_j et ce en fonction de l'évaluation de

l'interaction en cours ; une interaction fructueuse le pousse à *croire plus* dans la possibilité de coopération de TA_j , tandis qu'une interaction dont l'évaluation est négative le fait un peu *douter* de sa croyance. La correction qu'il doit apporter à sa croyance ne doit pas être brusque (dans le sens où il passe à une valeur maximale ou minimale selon le cas dans lequel il se trouve) mais doit être progressive à la recherche de la valeur optimale qui semble être très difficile à atteindre.

Nous considérons la correction des croyances comme étant un *ajustement* dans le sens où elle est de valeur très petite voire même négligeable (qu'elle soit positive ou négative) mais de manière continue. La même croyance peut être augmentée et par la suite diminuée suite à deux interactions dont les valeurs des évaluations sont respectivement positive et négative ; *il nous semble que quelque part dans les sociétés humaines les choses se passent de cette manière.*

Nous proposons, à cet effet, d'utiliser un ***pas de correction*** noté α à fixer au préalable (qui soit de l'ordre de 0,01), TA_i alors corrige sa croyance sur la coopération envers TA_j comme suit :

$$CC(TA_i, TA_j) = CC(TA_i, TA_j) + \alpha \cdot Eval(QuI, TR) \quad (2)$$

Naturellement la valeur calculée doit toujours être dans l'intervalle $[0, +1]$.

4.4.4. Adaptation globale par évolution génétique des structures organisationnelles

Quand le taux global de perturbations dépasse un certain seuil, les task agents –qui doivent coopérer dans la réalisation de leur fonction- se trouvent confrontés à une situation de gêne qui les bloque dans leur fonctionnement, un processus de réorganisation globale s'avère alors nécessaire, l'agent médiateur en est responsable. Ce dernier reçoit les signaux de perturbations des task agents et décide selon le taux global de non coopération du lancement du processus de réorganisation du système, lorsque ce taux dépasse un certain seuil l'agent médiateur lance un algorithme génétique dans le but de chercher une structure organisationnelle où les agents peuvent coopérer au plus : c'est-à-dire chercher à regrouper au mieux les agents selon leurs affinités.

4.4.4.1. Evaluation des perturbations au niveau global

L'évaluation du taux global de perturbations est en fonction des taux locaux de non coopération calculés au niveau des task agents, comme il a été précisé dans la section précédente. Le taux global des perturbations est exprimé par un taux global de non coopération dans le système que nous définissons ci après.

Soit $F(O)$ le taux global de non coopération de la structure organisationnelle actuelle. L'agent médiateur calcule $F(O)$ comme suit :

$$F(\mathbf{O}) = \frac{\sum_{i=1}^N F_i(TA_i)}{N} \quad (3)$$

Où N : est le nombre total des task agents.

et $F_i(TA_i)$ le taux de non coopération de l'agent TA_i

Sachant que $F_k(TA_k)$ vaut 0 si TA_k n'a rien signalé.

Le système doit tout le temps avoir un taux de non perturbation qui ne dépasse pas un certain seuil, soit S_o le seuil global de non coopération de l'organisation et ce selon l'algorithme suivant :

Si $F(\mathbf{O}) > S_o$

Alors Agent Médiateur lance l'algorithme génétique

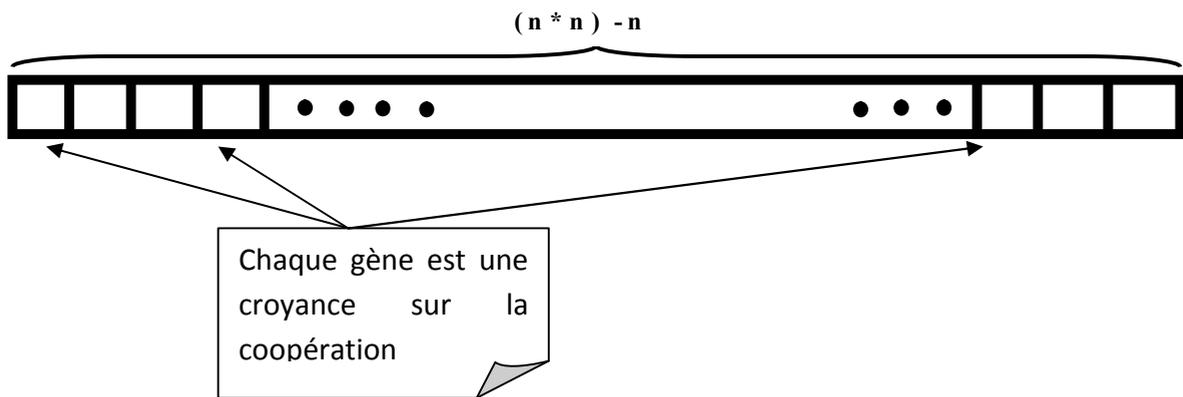
Les algorithmes génétiques sont en fait des méthodes de recherche heuristiques qui se basent sur les lois de la sélection naturelle et le fameux principe de survivants de Darwin. Ils représentent une exploitation intelligente de la recherche aléatoire de la solution dans un espace de solutions. L'avantage que peuvent nous apporter les AGs c'est qu'ils peuvent faire émerger par les opérateurs de reproduction (combinaison des gènes) des solutions difficiles à atteindre par d'autres algorithmes. Dans le cas d'un système multi-agents coopératif où l'on cherche à optimiser le degré de coopération et à trouver la meilleure configuration pour que ses agents arrivent à coopérer de la meilleure manière, l'AG peut permettre à *une bonne structure organisationnelle d'émerger*.

De leur nature, les AGs ne nécessitent pas une connaissance initiale assez bonne, c'est des algorithmes qui utilisent un codage simple et des mécanismes de reproduction, qui réalisent un comportement compliqué, et sont utilisés pour résoudre des problèmes extrêmement difficiles. La réussite du processus d'optimisation des AGs dépend principalement du codage des solutions et de la définition de la fonction de survie [Spector et al. 02].

Avant de présenter le processus d'évolution, nous devons d'abord dégager l'objectif recherché ce qui nous permettra de définir un codage et une fonction de survie adéquats à notre problème.

Dans notre modèle, l'algorithme génétique a pour objectif de rechercher une *structure organisationnelle coopérative*, nous dégageons alors deux points importants pour son bon fonctionnement :

- Les *individus* qui doivent évoluer sont des *structures organisationnelles*, et comme nous l'avons déjà précisé auparavant l'information organisationnelle qui nous



$C_1^2 \ C_1^3 \ C_1^4 \ \dots \ C_1^n \ C_2^1 \ C_2^2 \ \dots \ C_n^1 \ C_n^2 \ \dots \ C_n^{n-1}$

C_i^j

4.4.4.2.2. Fonction de survie (fitness)

Dans l'utilisation des techniques évolutionnaires pour l'évolution des systèmes multi-agents, il est important de laisser chaque individu -qu'il soit agent ou SMA- *agir dans son monde réel* pour pouvoir évaluer son adaptation au problème c'est-à-dire calculer la valeur de la fonction de fitness correspondante [Landau 02], [Cardon 00].

Dans notre cas, la fonction de survie doit exprimer le degré de coopération d'une structure organisationnelle, qui ne peut être calculé qu'à partir des interactions des task agents entre eux, ce sont eux qui calculeront les taux de non coopération. Pour chaque individu nous posons alors:

- L'individu est d'abord converti en un système multi-agents composé de l'ensemble des task agents, le réseau d'acointances avec des liens pondérés est construit à partir de la table globale de croyances, c'est exactement l'opération de *décodage de l'individu* ;
- Le système est alors prêt à fonctionner, une fois immergé dans son environnement le système exécute sa fonction ;
- Il lui est fixé un temps d'exécution, les task agents exécutent seulement leur fonction pour laquelle ils sont conçus et calculent les taux locaux de non coopération à leur niveau, mais ils n'effectuent aucune adaptation locale ;
- L'agent médiateur calcule le taux global de non coopération à partir des évaluations locales transmises par les task agents ;
- La fitness que nous proposons est justement ce taux global de non coopération $F(O)$ calculé selon l'équation (3).

La figure suivante illustre les interactions entre le système et l'agent médiateur dans le processus d'évolution génétique.

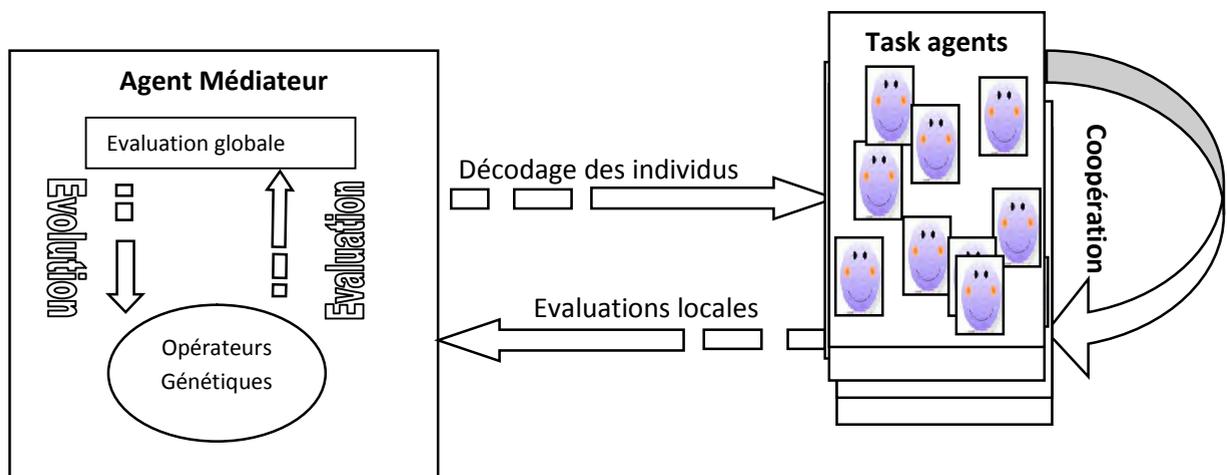


FIGURE 4.10. Processus évolution / évaluation du système.

4.4.4.2.3. Processus global

L'algorithme maintient une population d'*individus* qui représentent un ensemble de solutions (structures organisationnelles). Chaque solution est évaluée, comme il a été montré dans ce qui précède, pour fournir une mesure de sa fonction de survie (*fitness*). Les opérateurs génétiques à savoir *croisement* et *mutation* sont appliqués pour donner naissance à de nouvelles solutions plus adaptées au problème. Une itération de l'algorithme est répétée jusqu'à aboutir à une solution acceptable.

La bonne solution est alors une structure organisationnelle coopérative, elle est alors convertie en un système et est appliqué au monde réel. Le processus global de l'évolution génétique est illustré dans la figure ci-après :

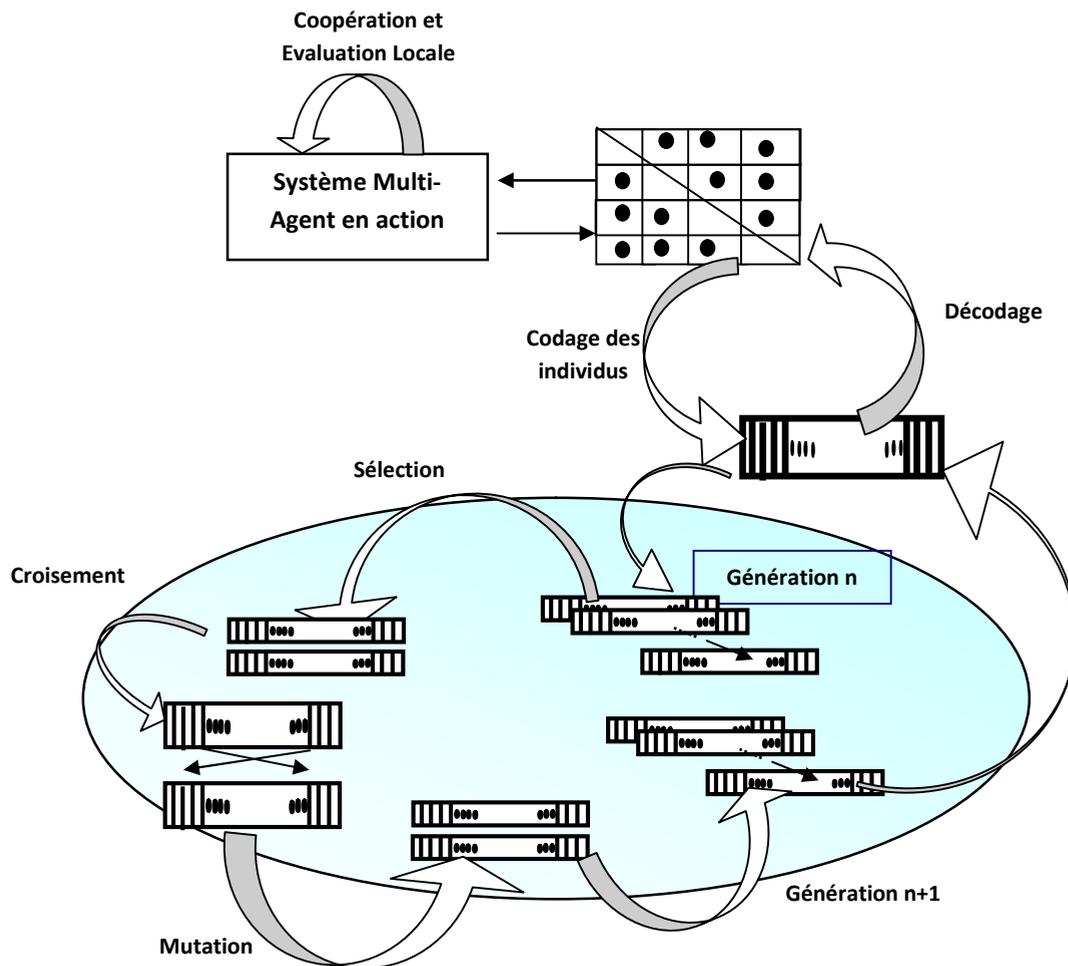


FIGURE 4.11. Processus d'évolution génétique.

4.5. Conception du système et algorithmes

4.5.1. Conception du système

Nous proposons dans cette thèse une approche de construction de systèmes multi-agents adaptatifs, où l'on définit le modèle des agents constituant le système, la faculté d'adaptation avec laquelle ils seront dotés et la structure organisationnelle qui permettra de les organiser afin qu'ils puissent accomplir leurs fonctions respectives. La construction d'un système sous GAMuS suivra certaines étapes que nous illustrons dans cette section.

Dans un premier temps, le système doit être bien défini, le concepteur doit définir les différents task agents.

- Chaque task agent est défini par :
 - o ses compétences ;
 - o ses accointances, et selon le cas, les valeurs initiales des croyances sur la coopération correspondantes ;
 - o son langage d'interaction ;
 - o à cet agent sera ajoutée la faculté de perception de l'environnement (évaluation du taux local de coopération) et d'adaptation (ajustement des croyances).
- Un agent médiateur est automatiquement créé, selon la description illustrée dans ce qui précède.

Le système est alors immergé dans son environnement et commence à fonctionner.

Nous présentons dans ce qui suit les algorithmes correspondant à cette approche :

Algorithme 1

Conception du système: description des TAs et de l'information organisationnelle

- 1- *Définir le système multi-agent*
 - 2- ***Pour chaque*** task agent *définir*
 - a) *Compétences*
 - b) *Accointances et les croyances sur la coopération*
 - c) *Langage d'interactions*
 - d) *Perception de l'environnement et adaptation est automatiquement créé***
 - 3- *Initialiser les paramètres d'adaptation S_o , S_a , α , TRt*
 - 4- *Création de l'Agent Médiateur*
 - 5- *Mettre le système en action*
-

4.5.2. Adaptation locale

Le système immergé dans l'environnement s'adapte aux changements imprévus et qui se manifestent par des comportements non coopératifs de ses agents. L'algorithme suivant illustre ce mécanisme :

Algorithme 2:

Adaptation locale (TA_i) /* Perception des perturbations et correction des croyances sur la coopération au niveau de TA_i */

Pour chaque interaction avec TA_j

// Calcul Eval (Q_{ul}, TR)

Si TR > TR_t *// l'interaction est abandonnée*

Alors Eval (Q_{ul}, TR) = -1

Sinon Eval (Q_{ul}, TR) = Q_{ul}

Sauver (TA_j, Eval (Q_{ul}, TR))

CC (TA_i, TA_j) = α · Eval (Q_{ul}, TR) + CC (TA_i, TA_j) (1)

Si Eval (Q_{ul}, TR) > 0 *// interaction non fructueuse*

Alors $F_i(TA_j) = \frac{nInt(TA_i)}{tInt(TA_i)}$ (1)

Si F_i(TA_j) > Sa

Alors signaler_perturbations (TA_i, F_i(TA_j), Agent Médiateur)

Fin Si

Fin Si

4.5.3. Adaptation globale : Action de l'agent médiateur

La réorganisation des task agents au niveau global est réalisée par l'agent médiateur comme suit :

Algorithme 3 :**Adaptation Globale (Fi(Ai)) /* action de l'agent médiateur */**

/* calcul du taux global de non coopération */

$$F(O) = \frac{\sum_{i=1}^N F_i(TA_i)}{N} \quad (3)$$

Si $F(O) > S_o$ **Alors**

1. Initialiser les paramètres de l'algorithme (taille de la population, taux de mutation, taux de croisement)
2. Initialiser la population;
/* chaque individu est un vecteur de réels représentant les croyances sur la coopération*/
3. **Pour chaque** individu (structure organisationnelle)
 - a) Evaluation
 - b) Sélection
 - c) Reproduction (croisement et mutation)
4. **Revenir à 3- jusqu'à** observer une structure organisationnelle coopérative
Où $F(O) < S_o$

4.5.4. Evaluation des individus

Chaque individu est décodé en un système multi-agents selon la structure représentée, l'ensemble des croyances sur la coopération représente les liens entre les agents. Le système est alors exécuté pour être évalué. Le processus est décrit par l'algorithme suivant :

Algorithm 4 :**Evaluation(Oi) /*Evaluation d'une structure organisationnelle i*/**

- a) Convertir le vecteur des CC en un SMA
- b) Action dans l'environnement
- c) Observer le comportement du système
- d) Evaluer le taux global de non coopération
 - Pour chaque** TA_i /*niveau local */
Calculer $F_i(TA_i)$
 - Calculer $F(O)$ /*niveau global */
- e) Fitness = $F(O)$

4.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre approche GAMuS qui est une approche de conception de systèmes multi-agents auto-adaptatifs basée sur l'évolution des structures organisationnelles et l'évaluation de l'interaction assurant une adaptation à deux niveaux global et local.

Nous nous intéressons dans cette thèse aux systèmes multi-agents coopératifs regroupant un ensemble d'agents devant se compléter ou s'aider pour accomplir la tâche qui leur est confiée. Ce sont des systèmes composés d'agents qui partagent les mêmes centres d'intérêt ou d'agents qui ont des compétences complémentaires. Nous fixons comme objectif d'adaptation le maintien et l'amélioration du degré de coopération entre les agents du système. Les agents possèdent des croyances sur la coopération des uns envers les autres et ce sont ces croyances que nous proposons de corriger à un niveau local par ajustement et à niveau global par un algorithme génétique, le processus de correction est basé sur l'évaluation de l'interaction. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une application du modèle décrit.

Chapitre V

Etude de cas : Le filtrage collaboratif

Chapitre V

Etude de cas : Le filtrage collaboratif

Pourquoi ne pas utiliser ce que trouve un utilisateur A pour aider un utilisateur B à trouver l'information pertinente relative aux centres d'intérêt qu'ils partagent ?

Afin de montrer l'intérêt de l'approche auto-adaptative décrite dans le chapitre IV, nous nous sommes intéressés à un domaine d'application où l'on a besoin de concevoir des systèmes typiquement coopératifs, ouverts, plongés dans des environnements dynamiques et qui sont les systèmes de filtrage collaboratif. Ce chapitre est partagé en deux parties, nous présentons dans la première partie un état de l'art sur le filtrage d'information tout en mettant l'accent sur les aspects qui nous intéressent le plus dans notre étude, la deuxième partie du même chapitre sera consacrée à la description d'un système adaptatif pour le filtrage d'information.

5.1. Le filtrage collaboratif de documents : état de l'art

5.1.1. Introduction

Le web est devenu le plus grand espace d'information accessible à l'échelle mondiale. Dans cet espace, l'information sous ses différentes formes croît de façon exponentielle, et l'obtention des réponses pertinentes à une recherche d'information est le besoin de tous les usagers. Cette situation a engendré l'apparition *des systèmes de recherche d'information* qui ont permis d'améliorer sans cesse la qualité des services d'accès à l'information [Tamine et al. 05].

Cependant, les usagers ont tendance à ne pas exprimer tout ce qu'ils savent, mais seulement ce qu'ils estiment suffisant pour le système de recherche d'informations. Même lorsqu'ils ont une bonne définition de leur besoin, ils ont tendance à le caractériser dans leur requête initiale avec très peu de termes. Le problème de pertinence de l'information par rapport à un contexte souhaité persiste alors toujours. Il devient nécessaire de pouvoir offrir à l'internaute des informations en lien avec ses goûts et ses attentes en un temps raisonnable et c'est ainsi que «*les systèmes de filtrage d'informations* » ont vu le jour [Berrut et al. 03].

5.1.2. Recherche et filtrage d'information

Les problèmes liés à la recherche d'informations sont nombreux dont les plus importants sont liés au développement rapide des nouvelles technologies de l'information et de la communication ainsi que l'essor du web qui nous ont confrontés à une très grande masse d'informations hétérogènes (langue, média, etc.), instables, redondantes, non persistantes (l'information naît, évolue et disparaît rapidement), et sous différents formats (texte, vidéo, graphe, son, image). [Boughanem 08], [Lopez 05], [Chevalier 02].

En effet, le problème n'est plus la disponibilité de l'information mais la capacité de sélection de cette information en vue de répondre aux besoins précis d'un utilisateur. Notons de plus, que les utilisateurs n'ont pratiquement aucune connaissance du fonctionnement interne des moteurs de recherche, ils n'utilisent généralement que

quelques mots (4 ou 5 au maximum) pour formuler leurs requêtes, ce qui donne des spécifications incomplètes et imprécises sur leur besoin. Lorsque la même requête est soumise par différents utilisateurs, la plupart des moteurs de recherche fournissent le même résultat, or les utilisateurs peuvent avoir des besoins différents exprimés par des mots identiques.

Ces différents facteurs rendent la tâche d'accès à l'information pertinente adaptée aux besoins de l'utilisateur de plus en plus difficile et nécessaire. Les travaux de recherche actuellement s'orientent vers la révision de la chaîne d'accès à l'information dans la perspective d'intégrer des outils prenant en compte les préférences et centres d'intérêt de l'utilisateur, la *personnalisation de la recherche* en général et le *filtrage d'informations* en particulier en sont des exemples [Bouzeghoub et al. 05], [Chevalier 02].

A l'heure actuelle, l'accès à l'information s'effectue par différentes manières parmi lesquelles nous citons les plus importantes:

- la *recherche active* de documents via des systèmes de recherche d'information (l'utilisateur cherche lui-même l'information qu'il désire) ;
- la *recherche passive* permettant à l'utilisateur de recevoir *des documents* ou des *recommandations* par des tierces personnes généralement partageant les mêmes centres d'intérêts. Les systèmes de filtrage s'inscrivent parmi les systèmes permettant la réception de documents jugés intéressants [Berrut et al. 03].

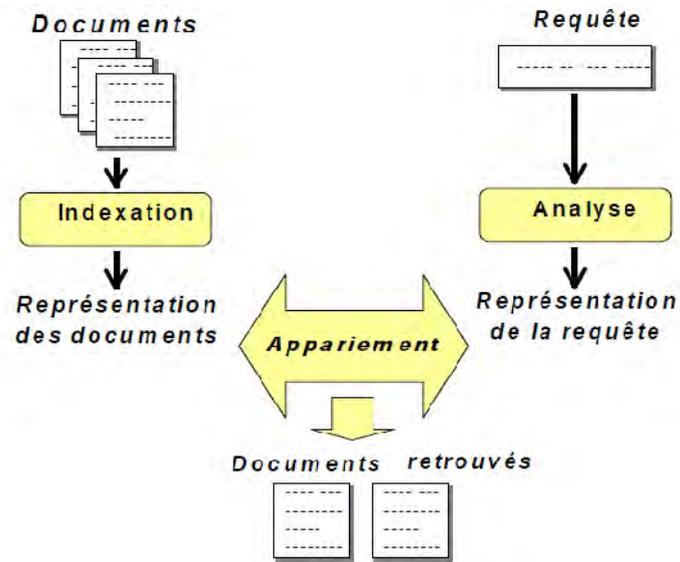
5.1.3. Recherche d'information

5.1.3.1. Définitions et principes

5.1.3.1.1. Notion de RI

Dans un contexte très large, la recherche d'information abrégée en RI ou IR (Information Retrieval) est une science qui étudie et offre des techniques et des outils permettant de localiser l'information pertinente relativement à un besoin en information, exprimé par la requête de l'utilisateur.

Selon Boughanem [Boughanem 08] *la tâche principale d'un système de recherche d'informations (SRI) est de sélectionner dans une collection de documents ceux qui sont susceptibles de répondre aux besoins en information de l'utilisateur. Son but est de retourner à l'utilisateur le maximum de documents pertinents pouvant satisfaire son besoin et le minimum de documents non pertinents.*



Ces différentes approches utilisent généralement des *profils* représentant des intérêts relativement stables des utilisateurs [Nguyen 06], [Zaier 10].

5.1.3.1.2. Notion de Profil

Le concept de profil est directement lié à l'utilisateur, on appelle *profil utilisateur* toute structure qui permet de *modéliser* et de *stocker* les données caractérisant l'utilisateur [Tamine et al. 08].

Ces données représentent particulièrement les centres d'intérêt de l'utilisateur, auxquels s'ajoutent ses informations personnelles; d'autres éléments peuvent être intégrés au profil tels que sa familiarité avec le sujet de recherche, son domaine professionnel, le contexte de la recherche d'information etc. Notons que le concept de profil est un concept très important dans tout le processus d'accès à l'information, la modélisation de ce concept a pour objectif fondamental de représenter puis faire évoluer les besoins en information de l'utilisateur à court et moyen terme.

5.1.3.2. Modèles de recherche

Les travaux de recherche dans le domaine de la RI ont conduit à la proposition de nombreux modèles. *Un modèle de RI a pour rôle de fournir une formalisation du processus de recherche d'information et un cadre théorique pour la modélisation de la mesure de pertinence* [Boughanem 08].

On distingue trois principaux modèles, à savoir :

5.1.3.2.1. Modèle booléen

Une requête q dans ce modèle est composée de termes liés par les connecteurs logiques ET, OU et NON. Le processus de recherche mis en œuvre, consiste à effectuer des opérations sur l'ensemble de documents définis par la présence et l'absence de termes d'indexation, afin de réaliser un appariement exact avec l'équation de la requête. La similarité entre un document d et une requête est définie par :

$$R_{sv}(q,d) = \begin{cases} 1 & \text{si } d \text{ appartient à l'ensemble décrit par la requête} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

Le modèle booléen présente le principal avantage de simplicité de mise en œuvre. Toutefois, il présente certains inconvénients tels que la difficulté de formulation de requêtes qui sont considérées complexes et non accessibles à un large public, les modèles de représentation des requêtes et documents ne sont pas uniformes, la pertinence se base sur un critère binaire sans notion d'échelle de gradualité. Ceci diminue des performances du modèle et le rend inadapté à une recherche progressive.

5.1.3.2.2. Modèle vectoriel

Ce modèle fait partie des modèles statistiques, il repose sur les bases mathématiques des espaces vectoriels. L'utilisation des statistiques a pour but d'une part de caractériser d'un point de vue quantitatif les termes et les documents et d'autre part de mesurer le degré de pertinence d'un document vis-à-vis d'une requête. Ce degré de pertinence étant un objectif primordial dans les SRI permet d'ordonner les documents retournés.

Dans ce modèle, un document est représenté sous forme d'un vecteur de mots, à chaque mot composant le vecteur est associé un poids (« *word frequency weighting* »), soit :

$$d_j = (w_{1,j}, w_{2,j}, w_{3,j}, \dots, w_{n,j}) \quad (5.2)$$

où $w_{i,j}$ est le poids des termes dans le document d , n est le nombre total de termes dans l'index. La requête est de même représentée par un vecteur de mots pondérés. Dans ce modèle, un document est considéré d'autant plus pertinent par rapport à une requête que le vecteur associé est similaire à celui de la requête.

Plusieurs fonctions de similarité sont proposées dans la littérature, de la plus simple qui considère l'absence ou la présence d'un mot dans le document, le nombre d'occurrences du mot dans le document, le fait que le mot soit mis en valeur ou pas (en gras ou italique, mis dans la rubrique des mots clé...), la pondération *TFIDF* (« *Term Frequency/Inverse Document Frequency* ») faisant l'hypothèse qu'un terme est important pour un document donné s'il apparaît souvent dans ce document et que peu de documents le contiennent, etc.

La pondération des termes étant l'une des fonctions fondamentales en RI en général et dans le modèle vectoriel en particulier, le poids d'un terme dans un document représente l'importance de ce terme dans le document. Nous présentons ci après la pondération *TfIdf* permettant de combiner une pondération locale et globale d'un terme et sur laquelle se basent de nombreuses techniques.

Pondération TF*IDF

La mesure de poids la plus connue et la plus utilisée à ce jour est certainement la mesure *tf*idf*. Elle regroupe un ensemble de schémas de pondération et de sélection de termes [Picarougne 04]. On distingue :

Tf signifie '*term frequency*', et désigne une mesure proportionnelle à la fréquence du terme dans le document (pondération locale), l'idée sous-jacente est que plus un terme est fréquent dans un document, plus il est important dans la description de ce document.

Idf signifie '*inverted document frequency*', ce facteur mesure l'importance d'un terme dans toute la collection (pondération globale), l'idée sous-jacente est que les termes qui apparaissent dans peu de documents de la collection sont plus représentatifs du contenu de ces documents que ceux qui apparaissent dans tous les documents de la collection.

On retrouve dans la littérature plusieurs formules tf et idf. Généralement on utilise les formules suivantes pour calculer les éléments $tf \cdot idf$ d'un document, la valeur TFIDF d'un terme quelconque i dans un document d par rapport à une collection de N documents est donnée :

$$TFIDF_i = TF_{i,d} * IDF_{i,d} \quad (5.3)$$

$$IDF_{i,d} = \log (N / DF_i) \quad (5.4)$$

i : le terme., D : un document, $TF_{i,d}$: le nombre d'apparition de i dans D .

N : le nombre total de documents.

DF_i : le nombre de documents qui contiennent le terme i au moins une fois.

Cette fonction de pondération demeure simple, efficace et très utilisée. Toutefois des problèmes se posent quant à son utilisation quand il s'agit de documents longs, où les termes y appartenant apparaissent fréquemment et l'emportent en poids sur les termes appartenant à des documents moins longs. De nouvelles investigations ont été effectuées pour améliorer cette fonction telle que l'intégration de la taille des documents dans la formule, le calcul de la somme des produits $tf \cdot idf$, etc...

L'utilisation répandue du modèle vectoriel en recherche d'information est principalement due d'une part à l'uniformité de son modèle de représentation requête-document, et d'autre part à l'ordre induit par la fonction de similarité ainsi que les possibilités aisées offertes pour ajuster les fonctions de pondération afin d'améliorer les résultats de la recherche.

Toutefois, le modèle présente un inconvénient majeur lié au traitement des termes de documents de manière indépendante. Cependant, le modèle vectoriel a été comparé à d'autres méthodes d'ordonnement, et malgré sa simplicité il a donné des résultats meilleurs ou au moins aussi bons que les autres alternatives [Boughanem 08].

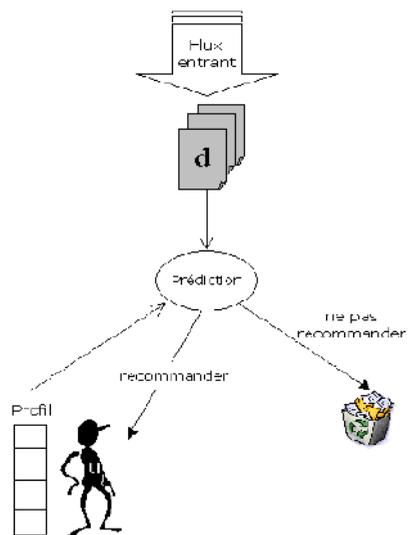
5.1.3.2.3. Modèle probabiliste

Ce modèle aborde le problème de la recherche d'information dans un cadre probabiliste. La pertinence document-requête est traduite par le calcul de la probabilité de pertinence d'un document par rapport à une requête. La pertinence entre un document et une requête est mesurée par le rapport entre la probabilité qu'un document d donné soit pertinent pour une requête q , notée $p(R/D)$, et la probabilité qu'il soit non pertinent, notée $p(\bar{R}/D)$, où R est l'ensemble de pertinence et \bar{R} de non pertinence. Le score d'appariement entre le document d et la requête q est donné par :

$$RSV (q,d) = \frac{p(R/D)}{p(\bar{R}/D)} \quad (5.5)$$

Un document est alors sélectionné si la probabilité qu'il soit pertinent à q est supérieure à la probabilité qu'il soit non pertinent. Ces probabilités sont estimées par

$$\underline{Q}_{t+1} = \alpha \cdot \underline{Q}_t + \frac{\beta}{n} \sum_{n_p} D_p^{(t)} - \frac{\gamma}{n_{np}} \sum_{n_{np}} D_{np}^{(t)}$$



Il existe à présent de nombreux systèmes de filtrage –que l’on appelle aussi systèmes de recommandation- utilisés dans divers domaines comme la recherche documentaire, le commerce électronique, les loisirs, etc. Les systèmes de recommandation deviennent nombreux et très répandus, nous citons à titre d’exemple Amazon, MovieLens, Wikilens, Google, Yahoo, etc.

Nous pouvons dégager les propriétés principales d’un système de filtrage comme suit:

- ✓ Filtrer l’information non désirée pour ne garder que ce qui est pertinent et intéressant.
- ✓ Le flux d’informations est très dynamique, et particulièrement quand il s’agit du web.
- ✓ Ils réalisent une fonction de personnalisation via la *construction* et la *maintenance* d’un profil utilisateur.
- ✓ L’adéquation entre le besoin et la ressource (document ou autre) peut être faite avec plusieurs techniques: indexation, évaluation, contenu sémantique, ...
- ✓ Ils se basent sur l’interaction avec l’utilisateur, pour l’évaluation des ressources recommandées, pour la mise à jour de son profil.

5.1.4.2. Modes de filtrage d’information

Actuellement, il existe trois grandes approches de filtrage [Wei et al. 08]:

- Le filtrage basé sur le contenu,
- Le filtrage collaboratif,
- Le filtrage hybride.

5.1.4.2.1. Filtrage basé sur le contenu (*Content-based Filtering*)

a. Principe

Le filtrage basé sur le contenu, appelé aussi filtrage cognitif, comme son nom l’indique, s’appuie sur le contenu des documents (thèmes abordés) pour les comparer à un profil lui-même constitué de thèmes, dans ce cas les documents recommandés doivent être les plus proches de ce profil [Zaier 10], [Castagnos et al. 07]. Ce dernier peut, par exemple, contenir une liste de thèmes que l’utilisateur aime bien ou qu’il n’aime pas.

La mise à jour du profil s’effectue en fonction du *retour de pertinence* fourni par l’utilisateur sur les documents qu’il a reçus. L’utilisateur peut évaluer les documents de manière explicite en attribuant une note à chacun d’eux, ou de manière implicite où le système déduit à partir de ses actions l’importance du document, par exemple un document supprimé est souvent considéré comme non pertinent. La mise à jour du profil se fait par intégration des thèmes abordés dans les documents jugés pertinents.

b. Limites du filtrage basé sur le contenu

Le filtrage basé sur le contenu s’appuie sur un profil qui décrit le besoin de l’utilisateur du point de vue thématique, ce profil peut prendre diverses formes, mais il repose

généralement sur des termes (mots clé) qui seront comparés aux termes qui indexent les documents. Ceci présente certaines limites dont nous citons [Zaier 10]:

- *la difficulté d'indexation des documents multimédias* : la croissance des documents multimédias (texte, image, vidéos, etc) pose le problème de la prise en compte de l'information structurelle des documents pour aider à identifier les contenus multimédias pertinents.
- *l'effet « entonnoir »* : le profil de l'utilisateur évolue par restriction progressive sur les thèmes recherchés, il ne reçoit alors que les recommandations relatives aux thèmes présentés dans son profil. Le filtrage par contenu peut restreindre alors le champ de vision de l'utilisateur qui ne peut pas découvrir de nouveaux domaines potentiellement intéressants pour lui.
- *L'effet de masse* : l'utilisateur ne bénéficie pas des jugements que d'autres utilisateurs peuvent faire sur les documents qu'il reçoit, l'utilisateur doit procéder lui-même à l'analyse des documents reçus, analyse qui fait intervenir d'autres critères que celui de la thématique.

5.1.4.2.2. Filtrage collaboratif (*Collaborative Filtering*)

a. Principe

La motivation du *filtrage collaboratif (Collaborative Filtering)*, terme introduit en 1994, est d'étendre la notion de *bouche à oreille entre amis* à des milliers de personnes sur Internet : vos amis (quelques personnes) peuvent vous recommander ce qu'ils ont apprécié; sur Internet des milliers d'individus sont susceptibles de vous donner leur avis. Les objets pour lesquels on veut évaluer l'intérêt des internautes peuvent être de toute sorte: films, restaurants, jeux, blagues, articles, etc... [Bedi et al. 09], [Gao et al. 02].

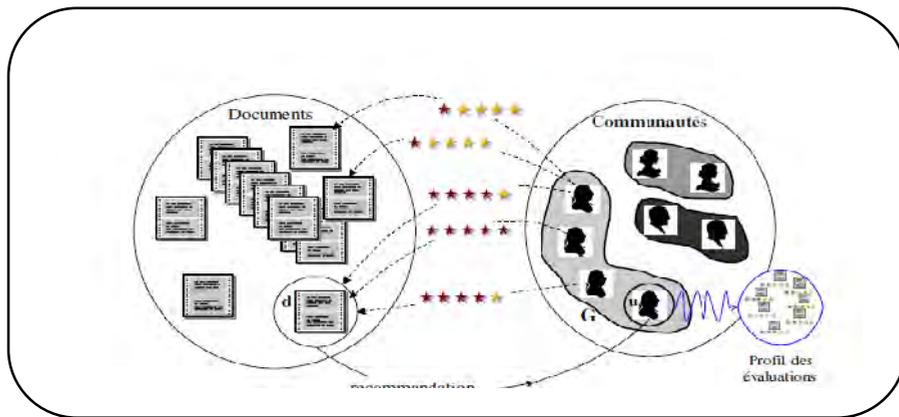
Dans le cadre de cette nous nous intéressons particulièrement aux objets de type documents et groupe d'amis à la recherche de documents.

De ce point de vue, le filtrage collaboratif se base sur l'hypothèse que les gens à la recherche d'information devraient pouvoir se servir de ce que d'autres ont déjà trouvé et évalué. Un système de filtrage collaboratif utilise l'information que tel document a plu à tel utilisateur, notamment grâce à des évaluations fournies explicitement par cet utilisateur, ces évaluations vont permettre d'estimer l'intérêt que ce même document peut présenter pour tel autre utilisateur, cette estimation étant appelée *prédiction*.

Pour fournir une recommandation personnalisée, le filtrage collaboratif tient compte de la *proximité* entre les utilisateurs, cette proximité traduit bien la similitude des goûts et intérêts des utilisateurs, et ce dans le but de ne recommander un document qu'aux utilisateurs proches de celui qui l'a apprécié. Ce phénomène de proximité entre les utilisateurs fait émerger la notion de *communautés* [Lopez 05].

Exemple pour mieux comprendre

Si deux utilisateurs A et B ont *évalué* un certain nombre de documents de façon *similaire*, il y a de fortes chances que A et B partagent les mêmes goûts et les mêmes



Already Own It? Rate It!

To improve your recommendations, rate this product:

Not Rated

★☆☆☆☆

★★☆☆☆

★★★☆☆

★★★★☆

★★★★★

I own it

	Doc1	Doc2	Doc3	Doc4	Doc5
U1			5	6	
U2	3	2	5	6	1
U3			6	6	3
U4	7	5			6
U5	7	6			4

$$w(a,i) = \frac{\sum_j (v_{a,j} - \bar{v}_a)(v_{i,j} - \bar{v}_i)}{\sqrt{\sum_j (v_{a,j} - \bar{v}_a)^2 \sum_j (v_{i,j} - \bar{v}_i)^2}}$$

- D'autre part, tous les systèmes de recommandation souffrent du problème de « *démarrage à froid* ». Lorsqu'un utilisateur s'inscrit et commence à utiliser le système, son profil est souvent très pauvre, voire inexistant, et ses communautés sont encore inconnues. Même avec un profil de démarrage, une période d'apprentissage est toujours nécessaire avant que le profil ne reflète concrètement les préférences de l'utilisateur. Par conséquent, le système ne peut pas lui fournir des recommandations pertinentes.

f. Architectures des systèmes de filtrage collaboratif

On distingue deux types d'architectures : les systèmes de filtrage centralisés et les systèmes distribués [Zaier 10].

- *Approche centralisée*

Une grande partie des recherches sur le filtrage collaboratif ont été consacrées aux systèmes de recommandation centralisés. Les utilisateurs de ces systèmes ne peuvent interagir qu'à travers un serveur central. En effet, le serveur doit rassembler les informations sur les préférences et les goûts des utilisateurs directement à partir des évaluations implicites ou explicites effectués par ces utilisateurs. En se basant sur leurs profils, il doit leur fournir ses recommandations. Les systèmes de recommandation centralisés souffrent de plusieurs problèmes:

- *le problème de surcharge* : Le serveur central doit stocker une quantité considérable de données pour un nombre important d'utilisateurs, il représente, de plus, le noyau de la procédure d'échange de ressources. De ce fait, le système doit mobiliser de plus en plus de ressources coûteuses (puissance de calcul, mémoire, bande passante, etc.). Ainsi, une panne dans ce serveur peut menacer tout le système.
- *Le manque de confidentialité* : la confidentialité des informations relatives aux utilisateurs est une caractéristique importante et pose un problème dans les systèmes centralisés où le serveur définit les politiques de sécurité et de protection de ces informations.
- *Le problème du passage à l'échelle* : l'ajout d'un nouvel usager peut poser un problème dans un système de filtrage collaboratif centralisé.

- *Approche distribuée*

Un système de recommandation distribué se charge de faire communiquer plusieurs utilisateurs entre eux par le biais d'une architecture répartie pour former des groupes d'utilisateurs selon les mesures de similarité. Ainsi, les données sont stockées sur la machine locale de l'utilisateur afin de préserver ses informations privées, et les recommandations sont aussi calculées au niveau des utilisateurs.

Cependant la distribution des procédés de filtrage pose le problème de localisation des données qui ne sont plus soumises à un contrôle centralisé.

En résumé, le filtrage collaboratif a pour principe *d'exploiter les évaluations* que des utilisateurs ont faites de certains documents, afin de *recommander ces mêmes documents* à d'autres utilisateurs, et *sans qu'il ne soit nécessaire* d'analyser le contenu des documents.

Un système de filtrage collaboratif est un système qui se base principalement sur la collaboration d'un ensemble utilisateurs, qui se rapprochent les uns des autres selon leurs centres d'intérêt, dans un but commun de pouvoir accéder de manière continue à l'information pertinente : *la coopération est une attitude qui caractérise ce type de systèmes et est nécessaire pour leur survie.*

5.1.4.2.3. Filtrage hybride

Ces deux approches précédentes ayant chacune des avantages et des inconvénients, des approches *hybrides* dites «*filtrage basé sur le contenu et sur la collaboration*» les font cohabiter afin d'exploiter au mieux les avantages des deux approches [Berrut 03].

Plus généralement, les systèmes hybrides gèrent des profils d'utilisateurs orientés contenu, et la comparaison entre ces profils donne lieu à la formation de communautés d'utilisateurs permettant le filtrage collaboratif.

5.1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale sur la recherche d'information où l'on s'intéresse aux techniques et mécanismes permettant de faire parvenir à l'utilisateur l'information qui correspond le plus à son besoin. Nous avons mis l'accent sur le filtrage d'information en général et le filtrage collaboratif qui constitue une approche importante de personnalisation de la recherche d'informations. Les principales conclusions que nous pouvons en tirer sont les suivantes :

Une forme de *coopération* apparaît alors clairement dans cette approche. Les utilisateurs sont de plus reliés par affinités, ceux qui partagent les mêmes centres d'intérêt doivent être regroupés dans la même communauté. Nous admettons qu'un système de filtrage collaboratif est un système coopératif et qui ne peut être que coopératif : *le degré de coopération élevé est nécessaire pour la survie d'un tel système.* Un système de filtrage collaboratif est un système dynamique et ouvert, il doit sans doute être doté de capacités d'adaptation.

5.2. Un système multi-agent auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents

Le travail en groupe et la coopération entre personnes distantes dans un cadre professionnel sont des facteurs essentiels à la survie de toute communauté sociale. [Mkademi 08]

5.2.1. Introduction

Nous nous intéressons dans cette thèse aux systèmes de filtrage d'information adoptant l'approche collaborative et nous considérons particulièrement l'information de type document. Les systèmes de filtrage collaboratif offrent des richesses et un intérêt indéniables comme il a été précisé dans la partie de l'état de l'art. En effet, dans la plupart des communautés partageant des centres d'intérêt, les personnes se recommandent ou s'échangent régulièrement des documents parmi leurs amis ou collègues. Ces recommandations véhiculent explicitement ou non un message tel que : « ça va t'intéresser » ou « ça va te plaire ».

Le champ d'investigation des approches collaboratives peut donc correspondre à *l'aide à la recherche d'informations* au sein des entreprises, des laboratoires de recherche qui sont des organisations ayant des besoins en information importants ou dans un cadre plus général à toute communauté ou groupe d'individus. La collaboration mise en place par le système doit offrir à chaque utilisateur la possibilité de bénéficier des compétences d'autres utilisateurs qui partagent avec lui les mêmes centres d'intérêt.

D'autre part, une approche assez intéressante du filtrage collaboratif dite « *filtrage collaboratif actif* » offre une fonctionnalité interactive importante entre les utilisateurs, le terme « filtrage collaboratif actif » [Berrut et al. 03], [Nguyen 06] signifie que l'utilisateur décide, de sa propre initiative, d'envoyer des documents à certains membres de la communauté.

Suite à l'étude des systèmes de filtrage collaboratif, nous dégagons les points qui nous semblent les caractériser :

- ces systèmes se basent sur la formation de communautés d'individus ayant des besoins en information proches voire similaires :
 - *Les individus sont alors regroupés par affinités ou par centres d'intérêt ;*
- ces systèmes permettent à un utilisateur de proposer à d'autres utilisateurs de sa communauté ou de son groupe une aide ou en demander une :

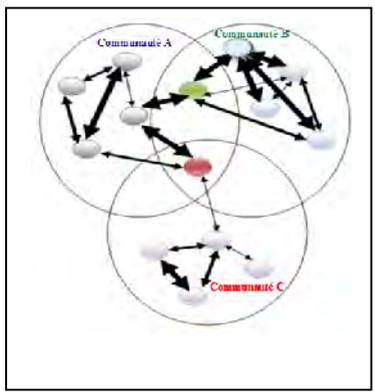
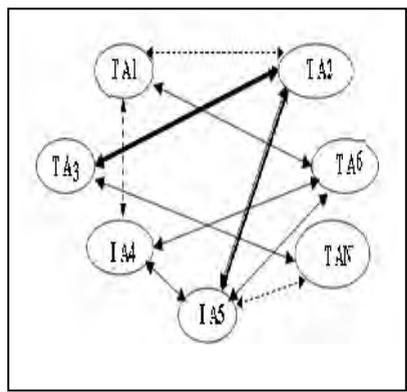
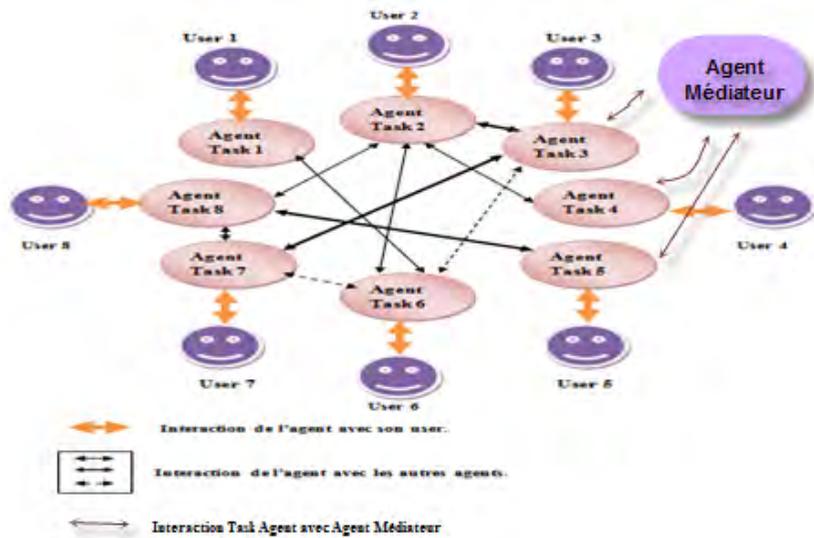
- *L'objectif d'un tel système est de regrouper les utilisateurs par centres d'intérêt afin de pouvoir tirer profit de leur relation, l'objectif principal est alors d'augmenter le taux de coopération entre les utilisateurs ;*
- *Ce sont des systèmes typiquement coopératifs, la coopération est au cœur du système et dont l'amélioration assure sa survie ;*
- les évaluations des utilisateurs constituent une source d'information précieuse pour le système :
 - *l'évaluation d'une recommandation envoyée par un ami ou un collègue peut alors servir de savoir si cette relation doit se renforcer ou s'affaiblir ;*
- ce sont des systèmes ouverts, des utilisateurs peuvent rejoindre leurs similaires et d'autres peuvent quitter le système à tout instant, ils sont plongés dans un environnement très dynamique à savoir le web ;
- et les centres d'intérêt des utilisateurs peuvent être mal définis au départ, ou évoluer dans le temps. Un chercheur, par exemple, peut se spécialiser au fur et à mesure dans un domaine de recherche, il s'y intéressera alors particulièrement, et par conséquent son intérêt aux domaines connexes peut diminuer :
 - *Ils doivent être dotés de capacités qui leurs permettent de réagir de manière autonome aux changements qu'ils rencontrent c'est-à-dire des capacités d'adaptation.*

De plus, comme il a été précisé dans la partie précédente, l'approche distribuée est la plus adaptée et apporte de meilleurs outils pour ce type de systèmes. A cet effet, nous proposons un système multi-agent auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents basé sur l'approche GAMuS que nous présentons dans ce qui suit.

5.2.2. Proposition

5.2.2.1. Le système proposé

Le système proposé est composé d'un ensemble de Task Agents et d'un agent médiateur selon le modèle GAMuS présenté dans le chapitre IV. Chaque *TA* représente un utilisateur qui est défini par son profil et qui communique de manière directe avec d'autres utilisateurs ayant des centres d'intérêt proches des siens. Les utilisateurs doivent pouvoir s'échanger librement tout type de ressources documentaires stockées au niveau de leurs propres machines et effectuer des recommandations les uns aux autres. La figure suivante présente une vue globale du système :



- les recommandations sont faites soit de manière directe d'un utilisateur à un autre via leurs Task Agents respectifs, soit par les TAs eux-mêmes et ce sur la base des croyances sur la coopération qu'ils ont les uns sur les autres ; un agent TA_i recommande de sa propre initiative des documents qui lui semblent intéressants (qu'il a reçu ou qu'il a recherché lui-même) aux agents de sa communauté c'est-à-dire ceux avec qui il possède des croyances sur la coopération ;
- l'évaluation des interactions système-utilisateur se fait par évaluation des interactions Task Agent - Task Agent, une interaction satisfaisante pour un TA_i est une interaction qui lui apporte un gain, telle que l'acquisition de nouveaux documents intéressants, nous détaillerons cet aspect dans la section suivante;
- l'ajustement des croyances sur la coopération (qu'il soit au niveau local ou au niveau global), basé sur l'évaluation de l'interaction, permet aux Task Agents de s'adapter à l'évolution ou aux changements des centres d'intérêt et profils de l'ensemble des utilisateurs appartenant au système d'une part et de découvrir de nouvelles relations intéressantes parmi les nouveaux utilisateurs qui rejoignent le système, cet ajustement permet rapprocher ceux qui sont susceptibles de pouvoir coopérer entre eux.

Exemple pour mieux comprendre

Supposons que nous avons deux utilisateurs A et B, suite à toute interaction entre A et B une évaluation est établie par le Task Agent associé à A en se basant sur la réponse de B suite à la requête de A. Lorsque A sollicite B pour lui fournir des documents sur un domaine *censé les intéresser tous les deux* (ceci en se basant sur la croyance sur la coopération qu'a A sur B), si la réponse de B n'est pas satisfaisante (les documents fournis ne sont pas pertinents par exemple) A devrait réviser sa croyance sur B ; toutefois si le taux d'insatisfaction de A devient important (le taux de non coopération dépasse le seuil prédéfini, c'est-à-dire A n'est en contact qu'avec des utilisateurs qui n'ont pas des profils proches au sien), le Task Agent de A envoie un signal de perturbation à l'agent médiateur, qui selon le taux global de non coopération décide de lancer ou pas le processus d'adaptation globale.

5.2.3. Description détaillée

5.2.3.1. Description des Task Agents

5.2.3.1.1. Compétences

Le besoin en informations étant primordial pour nos utilisateurs, nous proposons de leur offrir par conséquent des fonctionnalités complémentaires au filtrage collaboratif (qui représente l'objectif principal du système proposé), à savoir :

- la possibilité d'effectuer de la recherche d'information personnalisée (avec reformulation de la requête);

$$Q_{t+1} = \alpha \cdot Q_t + \frac{\beta}{n} \sum_{n_p} D_p^{(t)} - \frac{\gamma}{n_{np}} \sum_{n_{np}} D_{np}^{(t)}$$

Actions	Evaluation
Sauvegarder	Document pertinent
Envoyer à un ami	Document pertinent
Imprimer	Document pertinent
Lire	Document moyen
Supprimer	Document non pertinent

TABLE 5.1. Jugements des utilisateurs

- La nouvelle requête Q_{t+1} calculée par TA est envoyée à l'agent Easy-Search, et les opérations précédentes sont réitérées.
- Chaque itération du feedback, permet de corriger la direction de la recherche dans le sens des documents pertinents.

La figure suivante illustre le processus de la recherche d'information personnalisée:

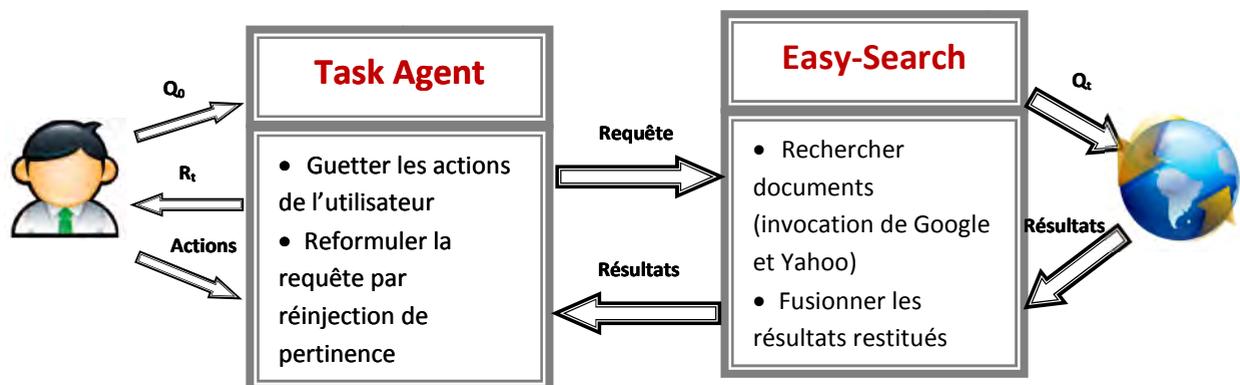


FIGURE 5.7. Processus de Recherche d'information personnalisée.

b. Production de recommandations

La production des recommandations dans les systèmes de filtrage est une fonction de base, le système prédit l'intérêt qu'un document particulier peut présenter pour un utilisateur en s'appuyant sur les évaluations que les membres de sa communauté ont faites sur ce même document. Lorsque l'intérêt prédit dépasse un certain seuil, le système recommande le document à l'utilisateur.

Le système que nous proposons est composé d'agents qui cherchent à maintenir un haut degré de coopération. Le système est auto-adaptatif, les croyances sur la coopération entre les différents agents sont en évolution continue vers les meilleures valeurs permettant d'atteindre le taux de coopération recherché. A cet effet, ces agents sont *les mieux placés* dans le système pour savoir à qui recommander tel ou tel document : les communautés doivent être bien formées de telle manière que les

membres intéressés par des recommandations soient reliés et doivent automatiquement les recevoir.

Il nous semble bénéfique de *confier* la tâche de production de recommandations aux Task Agents. Nous proposons les deux modes de filtrage collaboratif à savoir le mode actif et le mode passif, les recommandations sont alors faites :

- soit de manière directe d'un utilisateur à un autre via leurs Task Agents respectifs ;
- soit par les *TAs* eux-mêmes, un agent TA_i recommande des documents jugés pertinents, qu'il a reçus d'un autre agent ou qu'il a eus suite à ses recherches sur Internet, à ses accointances. Chaque *TA* calcule la pertinence des documents selon les actions de l'utilisateur lui correspondant, comme il a été précisé dans la table 5.1.

c. Filtrage par contenu

Afin de permettre aux utilisateurs de profiter des avantages du filtrage par contenu, cette fonctionnalité est intégrée dans les *TAs* et peut être activée par l'utilisateur lui-même s'il le désire. Le filtrage par contenu permet à ce dernier d'évaluer la pertinence de documents par rapport à ses centres d'intérêt auxquels il affecte des degrés d'importance dC_i . Ces degrés d'importance ont des valeurs comprises entre 0 et 1, et permettent à l'utilisateur de classer les mots clé décrivant ses centres d'intérêt du plus important au moins important.

Nous nous basons sur la pondération TF*IDF des différents centres d'intérêt par rapport aux documents à juger. Etant donné un document à évaluer d , le Task Agent calcule l'importance des centres d'intérêt C_i par rapport à d , en se basant sur un ensemble de N documents dont il dispose et ce selon l'algorithme suivant:

```

Pour tout centre d'intérêt ( $C_i$ )
  // Calculer  $TFIDF(C_i, d)$  ,  $d$  étant le document à évaluer
  TFIDF  $C_i, d = TF_{C_i, d} * IDF_{C_i, d}$ 
  IDF  $C_i, d = \log (N / DF_{C_i})$ 
  // Calculer  $Id(d, C_i)$  ,  $dC_i$  : degré d'importance du centre d'intérêt  $C_i$ 
  Id ( $d, C_i$ ) =  $dC_i * TFIDF_{C_i, d}$ 
Fin Pour

```

L'algorithme fournit un vecteur trié des centres d'intérêt de l'utilisateur selon les degrés d'importance calculés ayant la structure suivante :

$$((C_i, Id(d, C_i)), (C_j, Id(d, C_j)), \dots, (C_1, Id(d, C_1)))$$

Le vecteur résultat donné ci-dessus aide l'utilisateur dans le jugement de la pertinence du document d .

5.2.3.1.2. Description locale de l'environnement

L'environnement local d'un Task Agent quelconque du système est l'utilisateur et l'ensemble de ses accointances représentant les agents appartenant à sa ou ses communautés. La description locale de l'environnement représente par conséquent le profil de l'utilisateur ainsi que sa table locale des croyances sur la coopération.

Afin de permettre la distinction entre les communautés auxquelles appartiennent les agents, une accointance est identifiée par l'identifiant de l'agent et celui de la communauté. La table locale des croyances sur la coopération est la structure représentant ces accointances, un exemple est présenté ci après:

Accointances	(TA _i , C ₁)	(TA _i , C ₂)	(TA _m , C ₃)	(TA _c , C ₄)	.....	(TA _n , C _k)
TA _i	0.85	0.46	0.77	0.40	.....	0.55

TABLE 5.2. Exemple de table locale de croyances dans le système de filtrage.

5.2.3.1.3. Langage d'interaction

Le langage d'interaction dans notre modèle sert à définir les différentes interactions possibles entre les Task Agents du système, leur permettant d'accomplir de manière coopérative la tâche qui leur est confiée. Ce langage définit de plus les évaluations correspondantes qui sont nécessaires à l'ajustement des croyances sur la coopération. L'échange d'informations étant une fonction de base dans le système, les interactions suivantes y sont proposées :

Un Task Agent peut émettre les requêtes suivantes à un de ses accointances:

- Recommander un document à un autre agent ;
- Demander de l'aide dans l'évaluation d'un document ;
- Demander de l'aide dans la recherche d'information ;
- Demander un conseil ;
- Remercier un ami pour une recommandation ou une aide.

A cet effet, nous proposons de mettre à la disposition des utilisateurs une boîte d'envoi et une boîte de réception gérées par les *TAs* respectifs et leur permettant de communiquer librement.

Nous proposons un ensemble d'interactions munies d'un calcul de qualité de l'interaction *Qul* permettant ainsi à un task agent TA_i d'effectuer l'évaluation de l'interaction qu'il peut avoir avec un autre task agent TA_j pour l'ajustement de sa croyance sur ce dernier. La qualité de l'interaction est étroitement liée au domaine d'application, nous utilisons alors l'évaluation des documents à cette fin.

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre IV, l'évaluation des différentes interactions dépend de la qualité de l'interaction *Qul* et du temps de réponse *TR* de

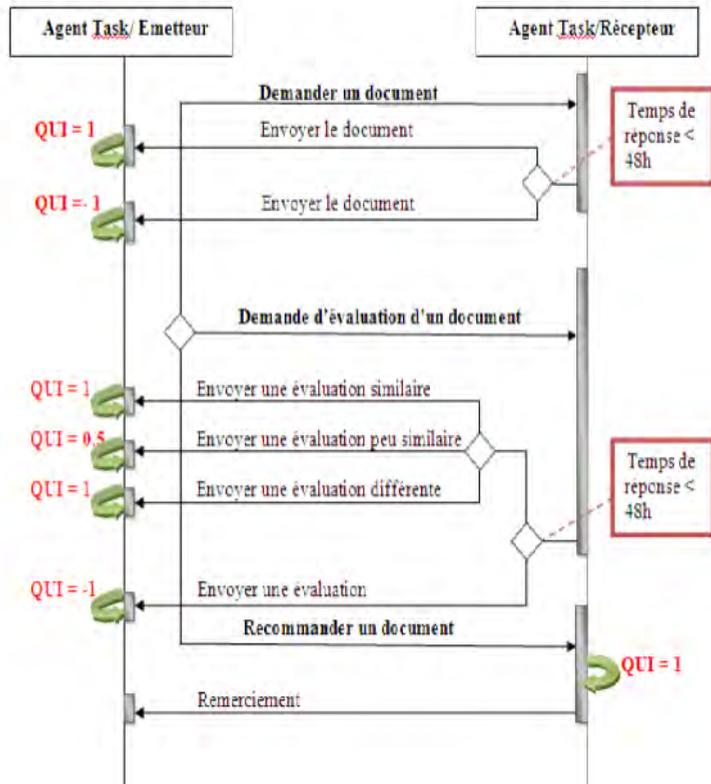
l'agent récepteur. Cependant, certaines interactions telles que *demande de conseil*, *demande d'aide* et *demande évaluation* ne dépendent que du temps de réponse.

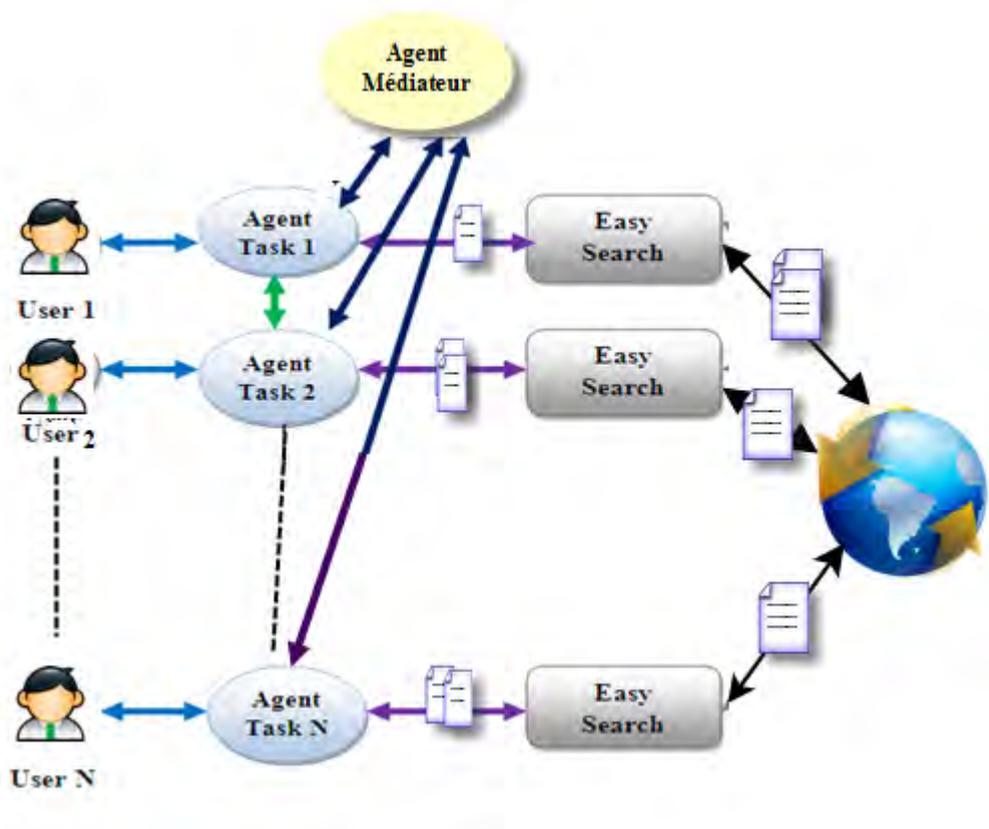
Le tableau ci après résume les interactions possibles entre les Task Agents avec les qualités correspondantes:

Emetteur	Récepteur	Evaluation de l'interaction	
Demande d'un document	Envoi de document	Pertinence du document	Qualité de l'interaction calculée chez l'émetteur
		Pertinent	Qul= 1
		Moyen	Qul = 0,5
		Non pertinent	Qul= -1
Recommandation d'un document avec son évaluation (évaluation explicite comprise entre 0 et 7)	Réponse avec remerciement	Comparaison d'évaluations	Qualité de l'interaction calculée chez le récepteur
		Evaluation similaire $|Eval(Emetteur) - Eval(Récepteur)| \leq 1$	Qul= 1
		Evaluation peu similaire $2 \leq |Eval(Emetteur) - Eval(Récepteur)| \leq 3$	Qul = 0,5
		Evaluation différente $|Eval(Emetteur) - Eval(Récepteur)| > 3$	Qul= -1
Recommandation d'un document sans évaluation	Réponse avec remerciement	Pertinence du document	Qualité de l'interaction calculée chez le récepteur
		Pertinent	Qul = 1
		Moyen	Qul=0,5
		Non pertinent	Qul=-1

TABLE 5.3. Langage d'interaction des TAs dans le système de filtrage.

Nous résumons l'ensemble des interactions dans le diagramme d'interaction AUML suivant :





Evaluation

[0..2]

[3..4]

[5..7]

Jugement

Document non pertinent

Document moyen

Document pertinent

$$w(a,i) = \frac{\sum_j (v_{a,j} - \bar{v}_a)(v_{i,j} - \bar{v}_i)}{\sqrt{\sum_j (v_{a,j} - \bar{v}_a)^2 \sum_j (v_{i,j} - \bar{v}_i)^2}}$$

 \bar{V}_a est \bar{V}_i est l

Etant donné trois utilisateurs ayant noté les quatre documents représentant les intérêts de leur communauté, si l'utilisateur a vote sur les documents comme suit :

	Doc ₁	Doc ₂	Doc ₃	Doc ₄
i_1	7	6	5	2
i_2	6	5	6	1
i_3	5	7	6	2
A	5	7	4	3

TABLE 5. 5. Exemple de matrice de notes de documents.

Par exemple, la valeur de similitude entre l'utilisateur a et l'utilisateur i_1 sera :

$$w(a, i_1) = 0,72$$

Le Task Agent va alors rendre à son utilisateur un vecteur de valeurs de (dis)similarités avec les utilisateurs de la communauté de la forme suivante :

$$(w(a, i_1), w(a, i_2), \dots, w(a, i_n))$$

en fonction duquel l'utilisateur décidera de s'intégrer dans la communauté ou non.

Si l'utilisateur décide de rejoindre la communauté, son TA calcule la valeur initiale de la croyance sur la coopération qu'il aura sur les agents de la communauté et qu'il communiquera à ses futures accointances, cette valeur est calculée par la formule suivante :

$$CC(TA, TA_i) = \frac{\sum_j^n w(a, i_j)}{n} \quad (5.8)$$

5.2.3.3.2. Quitter la communauté

N'importe quel utilisateur peut quitter une communauté s'il le désire, son Task Agent l'informe si la moyenne de ses croyances sur la coopération atteint une valeur inférieure à un seuil donné ρ , selon la formule suivante:

$$\frac{\sum_i^n CC(TA, TA_i)}{n} \leq \rho \quad (5.9)$$

Parce qu'il coopératif, le Task Agent informe dans ce cas ses accointances actuelles qu'il quitte la communauté. Les valeurs de croyances sur la coopération deviennent alors nulles.

5.2.3.3. Rejoindre une autre communauté

Quand un utilisateur du système désire rejoindre une nouvelle communauté, il fait son choix, évalue les documents représentatifs et selon le vecteur de similarités calculé, il décide de s'intégrer ou pas dans la communauté. Un changement de communauté correspond alors au fait qu'un agent quitte une communauté et rejoint une autre.

5.2.4. Conclusion

Nous avons présenté dans cette deuxième partie du chapitre étude de cas un système auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents. Ces systèmes sont des systèmes destinés à des utilisateurs cherchant d'une part à se regrouper par centres d'intérêt et d'autre part à coopérer dans la recherche documentaire qui nous a intéressés particulièrement dans cette étude. Nous avons essayé d'illustrer les différents aspects de notre approche dans ce système.

Le système proposé attribue à chaque utilisateur un agent ayant pour tâches la production de recommandation, la recherche d'informations et le filtrage par contenu. De plus, le processus d'adaptation permet de former les bonnes communautés. A cela s'ajoute l'initialisation des croyances sur la coopération à l'arrivée d'un nouvel utilisateur qui se fait par un calcul de similarité avec d'autres utilisateurs.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation deux applications que nous avons mis en œuvre pour valider l'approche dont l'une d'entre elles implémente le système décrit ci-dessous.

Chapitre VI

Applications et évaluation

Chapitre VI

Applications et évaluation

6.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'approche proposée dans le chapitre IV à travers deux applications : une simulation d'un SMA auto-adaptatif où nous avons essayé d'analyser le niveau global d'adaptation et en particulier la convergence de l'algorithme génétique, et un système auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents qui a fait l'objet de l'implémentation du modèle décrit dans le chapitre précédent.

Pour l'implémentation de ces deux systèmes, nous avons opté pour la plate-forme agents Jade, d'une part parce qu'elle répond aux besoins de distribution et d'ouverture que nous recherchons, et d'autre part parce qu'elle n'impose aucune contrainte sur l'architecture interne des différents agents. Ce chapitre est organisé en trois parties, une première pour la présentation brève de l'environnement logiciel d'implémentation, la deuxième partie présente la première expérimentation avec des résultats préliminaires, la troisième est consacrée au système auto-adaptatif pour le filtrage d'information où l'on précise certaines contraintes de réalisation et l'intégration dans l'environnement logiciel.

6.2. Environnement logiciel

6.2.1. Description

JADE est une plate-forme qui permet le développement des systèmes multi-agents conformément à la norme FIPA. Elle est entièrement implémentée en java et fournit beaucoup d'outils permettant la construction et l'analyse des systèmes multi-agents. Les propriétés qui nous ont particulièrement intéressées dans Jade sont :

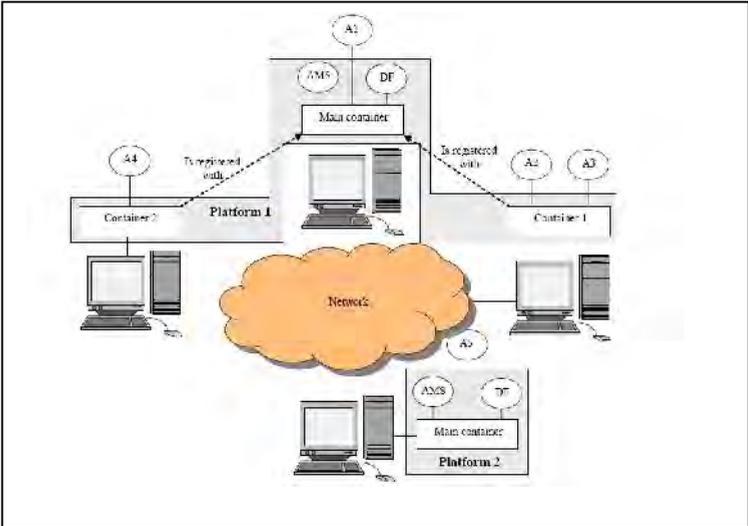
- La plate-forme d'agents peut être distribuée sur plusieurs machines, sur chacune d'elles s'exécute une machine virtuelle Java ;
- Chaque machine virtuelle est un **conteneur d'agents** (Container) qui fournit un environnement d'exécution complet pour les agents et permet d'avoir plusieurs agents qui s'exécutent simultanément sur un même hôte ;
- Il n'existe aucune contrainte sur l'architecture interne des agents ;
- Le mode de communication direct est supporté par la plate forme en utilisant le langage FIPA ACL, qui offre 22 performatifs dont les plus utilisés sont *request*, *query-if* et *inform* ;
- L'intégration et suppression d'agents en cours d'exécution est assez souple ;
- Les agents sont implémentés comme des threads d'exécution Java, chacun d'eux peut exécuter des tâches parallèles et JADE planifie ces tâches d'une manière efficace.

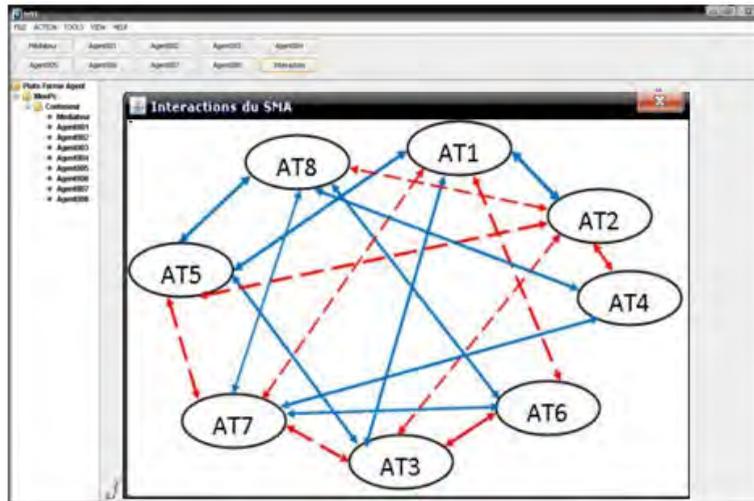
En effet, les systèmes que nous cherchons à mettre en œuvre sont :

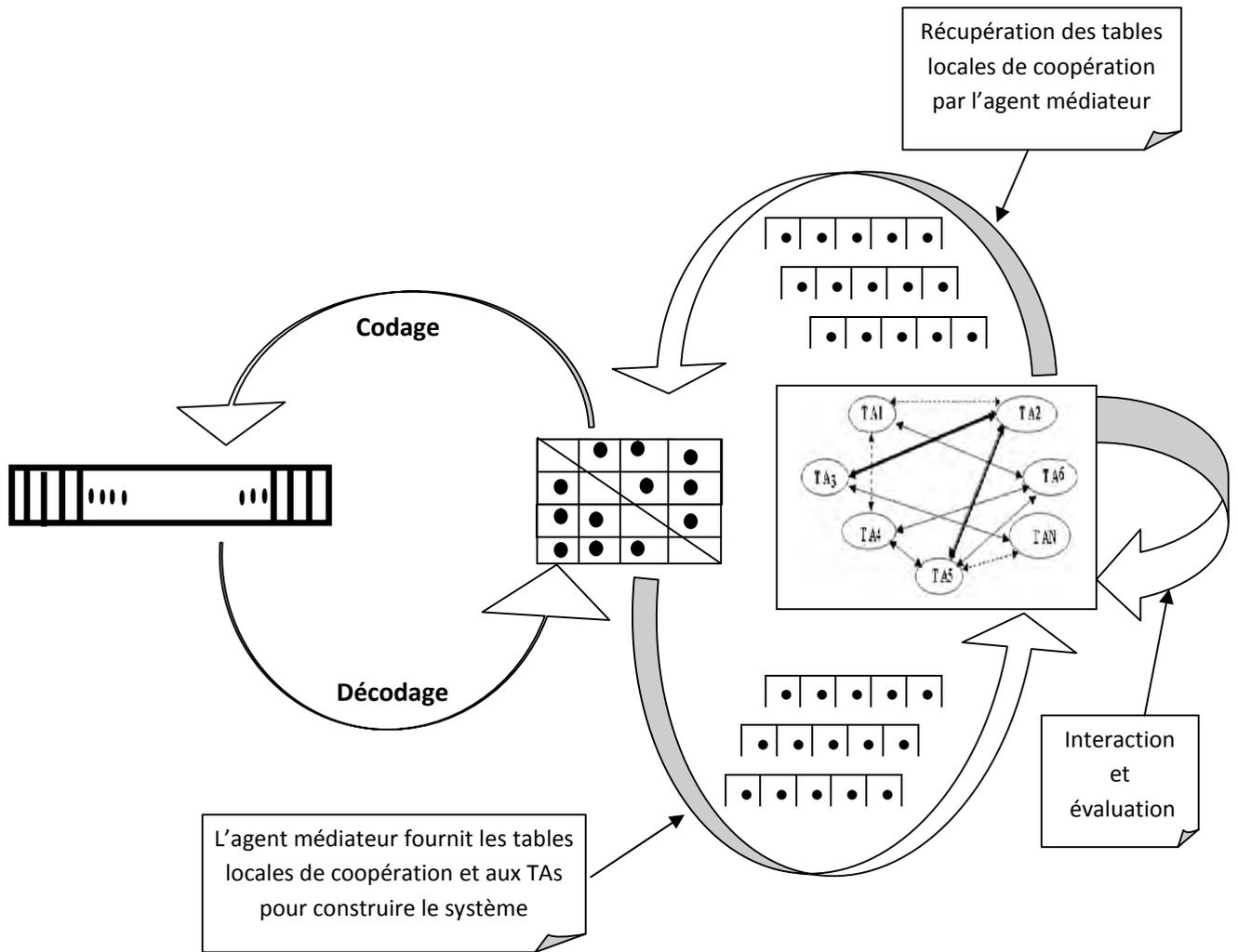
- des systèmes distribués, chaque agent peut s'exécuter sur une machine à part ;
- chaque agent peut avoir plusieurs tâches à exécuter en parallèle (communication, plusieurs compétences, etc.)
- ils sont ouverts, les agents peuvent rejoindre ou quitter le système à tout moment de son cycle de vie ;
- les agents de notre modèle communiquent de manière directe.

6.2.2. Architecture générale

Comme toute plate-forme conforme à la norme FIPA, Jade inclut obligatoirement trois rôles d'agents principaux le DF (Directory Facilitator) qui est un agent qui fait office d'annuaire, le Système de gestion d'Agent AMS qui contrôle l'accès et l'utilisation de la plateforme et maintient un répertoire des adresses et identifiants d'agents, et d'un ACC (Agent Communication Channel) qui fournit un canal pour les interactions de base entre les agents dans et en dehors de la plateforme.







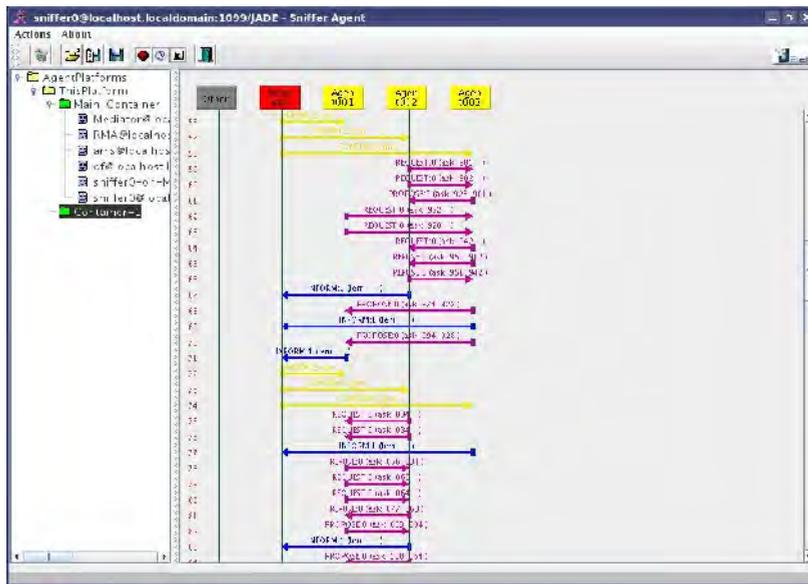
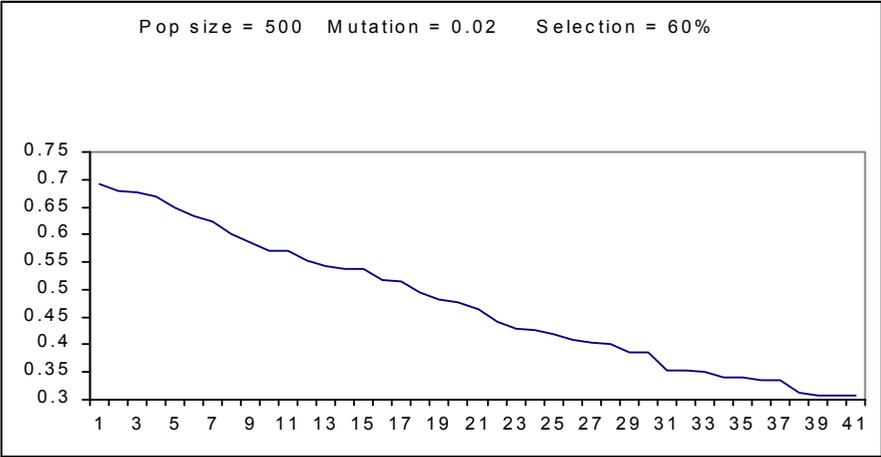
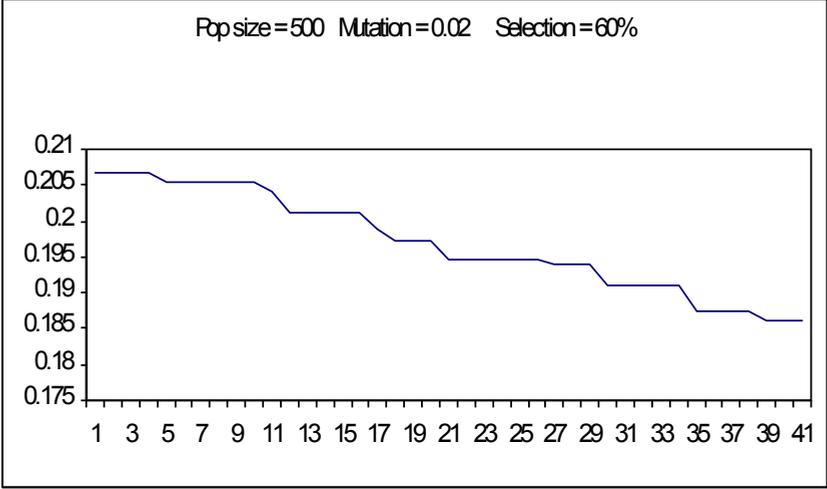


FIGURE 6.4.c. Interactions entre les TAs et l'agent médiateur durant le processus de sélection /évaluation.



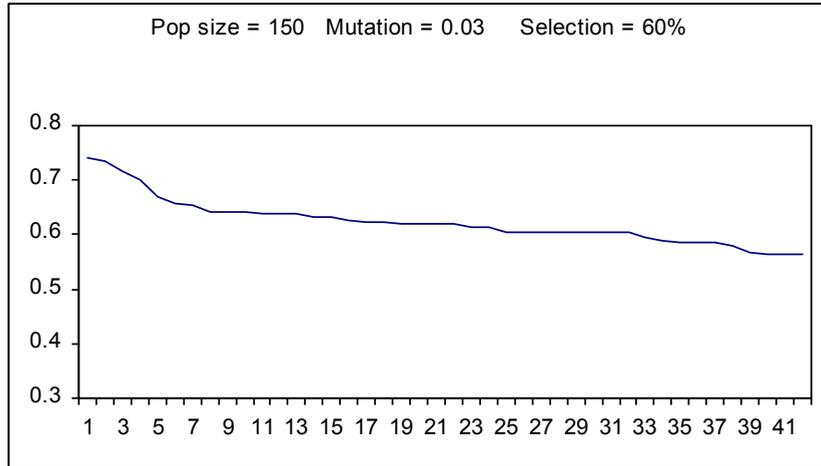




FIGURE 6.6.a. Interface d'inscription et de définition du profil.

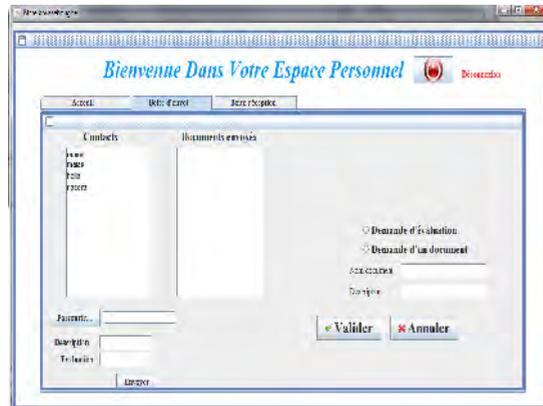
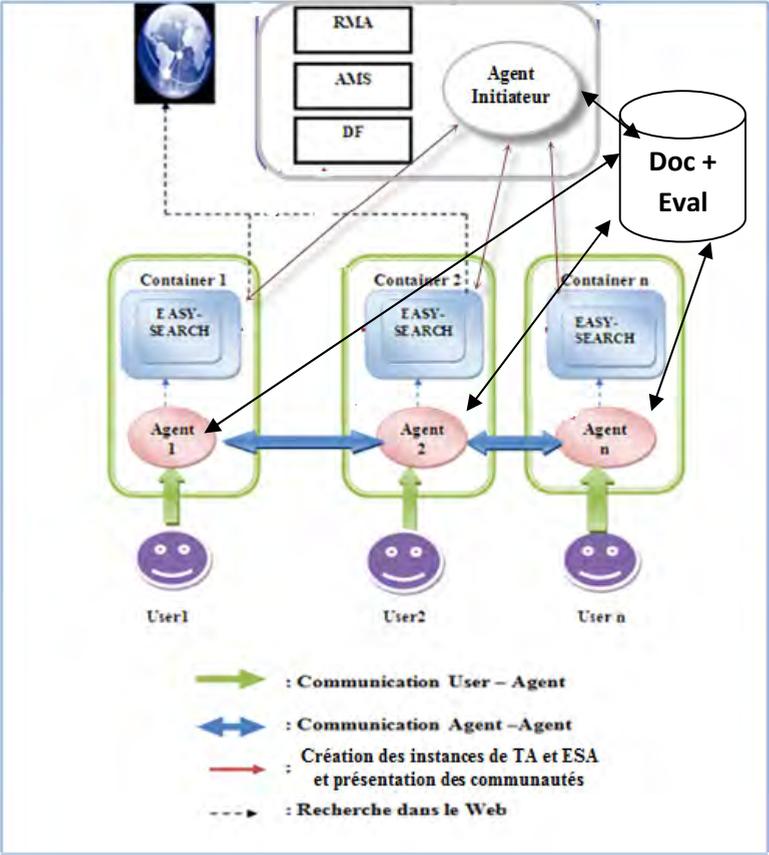
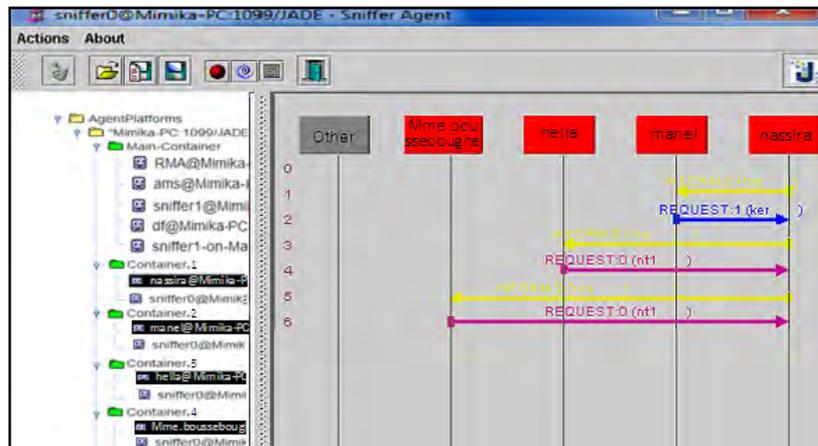


FIGURE 6.6.b. Espace personnel dans lequel un TA peut communiquer avec les autres.





Chapitre VII

Conclusion et perspectives

Chapitre VII

Conclusion et perspectives

7.1. Conclusion et bilan

Nos travaux, dans cette thèse, se sont concentrés sur les systèmes multi-agents adaptatifs. Dans ce contexte nous nous fixés des propriétés fondamentales sur lesquels s'est basée notre approche proposée et qui sont :

- le système est capable d'identifier les circonstances qui nécessitent une adaptation ;
- le système est capable de surmonter les perturbations éventuelles qu'il rencontre de manière *autonome*, par les agents même du système.

Nous avons proposé une approche d'adaptation par auto-organisation des systèmes multi-agents, basée sur *l'évaluation des interactions* et *l'évolution des structures organisationnelles*. En effet, l'évaluation des interactions est le mécanisme proposé pour permettre au système de détecter les situations de perturbations, et l'évolution des structures organisationnelles par auto-organisation est le mécanisme lui permettant de surmonter ces situations et de s'adapter.

Nous nous sommes intéressés, dans le cadre de ces travaux, aux systèmes multi-agents purement coopératifs. Par systèmes multi-agents purement coopératifs nous désignons des systèmes composés d'agents coopératifs qui sont toujours sincères (ne mentent pas) et tiennent à maintenir un degré de compréhension mutuelle, de non ambiguïté dans un but commun qui est l'accomplissement de la tâche qui leur est confiée par coopération. Ce sont des systèmes où les agents les constituant doivent être regroupés par affinités, et/ou par complémentarité.

De ce fait, dans nos préoccupations principales dans de tels systèmes il y a le souci de maintien d'un *degré acceptable de coopération* entre les différents agents. A cet effet, nous considérons que le maintien du degré global de coopération dans le système

résulte de l'ajustement du degré de coopération entre les différents agents pris deux à deux, et ce en conséquence à l'évolution imposée par et/ou au système.

Le modèle que nous avons proposé se compose d'un ensemble de Task Agents auxquels est confiée la tâche globale du système, et d'un agent médiateur responsable de leur réorganisation au niveau global quand il le juge nécessaire. Les agents Task sont reliés les uns aux autres par des croyances sur la coopération permettant de représenter la capacité de coopération entre eux. Les points clés du modèle proposé sont cités ci après :

- les Task agents sont regroupés par besoin et capacité de coopération, où chaque agent possède un ensemble d'acointances qui représentent les agents capables de coopérer avec lui pour la résolution du problème ; les croyances sur la coopération permettent de représenter cette capacité ;
- le processus d'adaptation consiste à faire évoluer le système vers une *structure organisationnelle coopérative*, où les agents la constituant sont en coopération (c'est à dire s'ils sont regroupés par affinités) ;
- Le processus d'évolution adopté se base sur :
 - *Une évaluation locale des perturbations* : en plus des fonctions qui leurs sont confiées, les task agents évaluent les interactions échangées avec leurs accointances. Cette évaluation, qui exprime le gain et la satisfaction qu'apporte l'interaction à l'agent, permet à ce dernier d'évaluer à son niveau les perturbations que le système rencontre. A notre sens, les perturbations expriment le fait que l'agent ne se retrouve dans un milieu coopératif.
 - *Adaptation au niveau local* : les task agents du système s'adaptent aux changements par ajustement des croyances sur la coopération qu'ils ont de leurs accointances. L'ajustement s'effectue en concordance avec l'évaluation de l'interaction : certaines relations se renforcent et d'autres s'affaiblissent. *Une réorganisation locale est alors observée*. Les agents communiquent leur sensation de perturbation à l'agent médiateur responsable de l'adaptation globale.
 - *Adaptation au niveau global* : au-delà d'un certain seuil de perturbations subies par les task agents, un récapitulatif des évaluations locales est établi par l'agent médiateur. Ce dernier procède à un processus d'évolution du système qui s'appuie sur la création, à l'aide d'opérateurs dérivés de l'algorithmique génétique, d'une suite de populations d'organisations d'agents afin de converger vers une organisation dont le comportement sera jugé bon.

Afin de pouvoir valider le modèle proposé, nous avons d'abord étudié les systèmes de filtrage collaboratif qui sont des systèmes purement coopératifs et dont les utilisateurs participant doivent être regroupés par centres d'intérêt. En effet, le champ d'investigation des approches de filtrage collaboratives peut correspondre à *l'aide à la recherche d'informations* au sein des entreprises, des laboratoires de recherche qui sont des organisations ayant des besoins en information importants ou dans un cadre plus général à toute communauté ou groupe d'individus. La collaboration mise en

place par le système doit offrir à chaque utilisateur la possibilité de bénéficier des compétences d'autres utilisateurs qui partagent avec lui les mêmes centres d'intérêt.

A cet effet, nous avons proposé un système multi-agents auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents basé sur notre approche d'auto-organisation. Nous avons mis l'accent dans la modélisation du système sur les concepts clés de notre modèle à savoir : la définition du langage d'interactions et l'évaluation de ces interactions, l'adaptation par correction de croyances, la distribution de la fonction du système sur l'ensemble des agents (production des recommandations) et enfin l'ouverture du système où des agents peuvent le rejoindre ou le quitter à tout moment.

En fin de nos travaux de thèse, nous avons expérimenté le modèle proposé sur deux applications : une première qui est une simulation d'un SMA auto-adaptatif où nous avons essayé d'analyser le niveau global d'adaptation et en particulier la convergence de l'algorithme génétique, et un système auto-adaptatif pour le filtrage collaboratif de documents où nous avons mis en évidence les concepts d'interaction, d'adaptation locale et d'ajustement de croyances. Le système que nous avons réalisé est distribué, ouvert et auto-adaptatif.

Les résultats que nous avons obtenus sont encourageants et prometteurs, particulièrement les résultats de l'adaptation au niveau global. Le système auto-adaptatif de filtrage d'information est en cours de finalisation, les résultats que nous construisons doivent nous permettre d'analyser de près l'efficacité de l'approche principalement sur le plan de l'adaptation locale et l'ouverture du système.

7.2. Perspectives et travaux futurs

En perspectives à ce travail, nous pouvons dire qu'il reste beaucoup de choses à faire. Naturellement nous devons nous limiter, nous nous fixons à cet effet les perspectives suivantes :

- Dans un premier temps nous souhaitons mettre en place une plate-forme basée sur l'approche proposée permettant la mise en œuvre des SMA adaptatifs. La plate-forme doit offrir une bibliothèque de mécanismes basés sur les algorithmes génétiques afin de permettre au concepteur d'adapter le mécanisme qui lui convient.
- La structure des croyances sur la coopération proposée ne prend en compte que la croyance elle-même, nous souhaitons l'enrichir pour considérer d'une part les groupes ou communautés au sein d'une même organisation et d'autre part considérer d'autres facteurs qui peuvent influencer ces croyances tels que les compétences où l'on s'intéresse pas à l'agent en tant qu'entité mais nous pouvons considérer ses compétences et lui associer des croyances sur ses

compétences. Dans ce cas, la structure devient complexe il faudra alors adapter le processus d'évolution proposé.

- Nous envisageons de plus, d'étudier l'intégration du processus génétique d'évolution de l'organisation dans l'agent task lui-même, la question qui se pose alors : peut-on faire évoluer l'organisation de manière purement locale ? a cet effet, il nous semble important d'intégrer des mécanismes supplémentaires permettant d'étendre l'effet de cette adaptation d'une communauté à une autre au sein d'une même organisation ;
- Et en fin, nous souhaitons nous intéresser davantage à l'aspect social dans les SMA, les travaux sur les réseaux sociaux sont en effet en plein expansion, ce type de systèmes sont typiquement des systèmes adaptatifs et leur compréhension permet tout aussi d'enrichir les modèles de systèmes artificiels adaptatifs.

Bibliographie

Bibliographie

Akola.J. and al. (2006). *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information*. Edition Vuibert.

Bedi.P., Sharma.R., Kaur.H. (2009). *Recommender system based on collaborative behavior of ants*. Journal of Artificial Intelligence (2). ISSN 1994-5450, pp 40-50.

Bernon.C., Gleizes. M.P., Peyruqueou.S., Picard.S. (2002). *ADELFE a methodology for adaptive multi-agent systems engineering*. In 3rd International Workshop Engineering Societies in the Agents World, 16-17 Madrid.

Berrut.C, Denos.N., (2003), *Filtrage collaboratif. Assistance intelligente à la recherche d'information*. Chapitre 8, p 255-283, Hermes-Lavoisier.

Boughanem.M., Savoy.J. (2008). *Introduction à la recherche d'information*. Recherche d'information: état des lieux et perspectives. Chap. 1., pp 19-44. Edition Hermes Science Lavoisier.

Boussebough.I, Maamri.R, Sahnoun.Z. (2010). *Adaptive Multi-agent System: cooperation and structures emergence*. Journal of SoftWare October 2010. Academy Publisher.

Boussebough.I., Sahnoun.Z. (2006). *An adaptive multi-agent system: genetic approach*. In IEEE 2nd International Conference on Information & Communication Technologies From Theory to Applications ICTTA'06.

Boussebough.I., Sahnoun.Z. (2008). *Les systèmes multi agents dynamiquement adaptables: coopération et émergence de structures*. In 2^e Journée Scientifique sur le Génie Logiciel et les Architectures des Systèmes. LIRE Laboratory University of Constantine.

Boussebough.I., Sahnoun.Z. (2008). *SamCom un système multi-agents pour l'analyse et le filtrage de documents*. MCSEAI'08 Maghrebian Conference on Information Technologies.

Boussebough.I., Sahnoun.Z. (2009). *GAMUS auto-adaptive multi-agent system*. In ACM Fourth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS' 09), Cairo-Egypt.

- Bouzeghoub.M., Kostadinov.D. (2005). *Personnalisation de l'information : Aperçu de l'état de l'art et définition d'un modèle flexible de définition de profils*. In Actes de la 2nde Conférence en Recherche d'Information et Applications CORIA, pp 201–218.
- Cardon.A. (2000). *Conscience artificielle & systèmes adaptatifs*. Chapters 14, 15, 16, Edition Eyrolles.
- Cardon.A., Guessoum.Z. (2000). *Systèmes multi-agents adaptatifs*. In Actes des Huitièmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents. Edition Hermès.
- Castagnos.S., Boyer.A. (2007). *Modeling Preferences in a Distributed Recommender System*. In 11th International Conference on User Modeling (UM'07), Corfu, Greece.
- Charrier.R. (2009). *L'intelligence en essaim sous l'angle des systèmes complexes : étude d'un système multi-agent réactif à base d'itérations logistiques couplées*. Thèse de doctorat de l'université de Nancy 2.
- Chevalier.M. (2002). *Interface adaptative pour l'aide a la recherche d'information sur le web*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III.
- Das.S.K., Reyes.A.A. (2001), *An approach to integrating HLA federation and genetic algorithms to support automatic design evaluation for multi-agent systems*. Article in press in Simulation Practice and theory, Elsevier. pp 1-26.
- Davis.L. (1992). *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Deguet.J., Demazeau.Y., Magnin.L. (2005). *Elements about the Emergence Issue. A survey of emergence definitions*. In ECCS 2005. Emergence Survey.
- Deissenberg.C. (2006). *Apprentissage dans les modèles multi-agents*. Dans Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société. Edition Lavoisier.
- Deloach.S.A. (2009), *Organizational model for adaptive complex systems*. In Virginia Dignum (ed.) Multi-Agent Systems: Semantics and Dynamics of Organizational Models. IGI Global: Hershey, PA. ISBN: 1-60566-256-9.
- Dewolf.T., Holvoet.T. (2004). *Emergence and self-organisation: a statement of similarities and differences*. In Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications, pp 96–110.
- Doran.J. E., Franklin.S., Jennings.N.R., Norman.T.J. (1997). *On cooperation in multi-agent systems*. The Knowledge Engineering Review 12 (3), pp 309-314.

Dug nie.P. (2007). *Espaces collaboratifs ubiquitaires sur une infrastructure à ressources distribuées*. Thèse de doctorat de L'université Montpellier II.

Dutta.P.S., Jennings.N.R., Moreau.L. (2005). *Cooperative information sharing to improve distributed learning in multi-agent systems*. Journal of Artificial Intelligence Research 24. pp 407-463.

El Fellah Seghrouchni.A. (2006). *Systèmes multi-agents*. Dans Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information. Edition Vuibert Informatique.

Fatima.S., Wooldridge.M., Jennings.N.R. (2005). *A comparative study of game theoretic and evolutionary models for software agents*. In Artificial Intelligence Review 23 (2). pp 187-205.

Fayek.M., Talkhan.I.A., El-Masry.K.S. (2009). *GAMA Genetic Algorithm driven Multi-Agents for E-Commerce Integrative Negotiation*. In GECCO'09, Montréal Québec, Canada. ACM 978-1-60558-325-9/09/07.

Ferber.F., Gutknecht.O., Miche.F., (2004). *From Agents to Organizations: an Organizational View of Multi-Agent Systems*. Agent-Oriented Software Engineering (AOSE) IV, LNCS 2935, pp. 214-230.

Ferber.J. (1995). *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. Edition Intereditions.

Ferber.J. (2006). *Concepts et m thodologies multi-agents*. Dans Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société. Edition Lavoisier.

Ferber.J., Stratulat.T., Tranier.J. (2009). *Towards an integral approach of organizations in multi-agent systems, the MASQ approach*. In Multi-agent Systems: Semantics and Dynamics of Organizational Models in Virginia Dignum (Ed), IGI.

Florea.M.A., Kaliz.E., Carabelea.C. (2000). *Genetic prediction of a multi-agent environment evolution*. In Proc. CASYS' 2000, Liege, Belgium, pp 7-12.

Ganascia.J.G. (2006). *Connaissance*. Dans Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information. Edition Vuibert Informatique.

Gandon.F. (2002), *Distributed Artificial Intelligence and Knowledge Management. Ontologies and multi-agent systems for a corporate semantic web*. Thèse de doctorat de l'université de Nice.

Gao.W., Wang.S., Cerrone.N. (2002). *A dynamic recommendation system based on log mining*. In International journal of foundations of computer science. Vol. 13, N  4. pp 521-530.

Gaston.M.E. (2005). *Organizational Learning and Network Adaptation in Multi-Agent Systems*. Thèse de doctorat de l'université de Maryland Baltimore County.

- Georgé.J. (2004). *Résolution de Problèmes par Émergence. Étude d'un Environnement de Programmation Émergente*. Thèse de doctorat de l'université Toulouse III.
- Gleizes.M.P., (2004). *Vers la résolution de problèmes par émergence*. Thèse d'habilitation de l'Université de Toulouse.
- Gleizes.M.P., Camps.V., Glize.P. (1999). *A theory of emergent computation based on cooperative self-organization for adaptive artificial systems*. In 4th European Congress of Systems Science, Valencia.
- Goldberg.D.E. (1994), *Algorithmes génétiques exploration, optimisation et apprentissage automatique*. In Addison Wesley.
- Guessoum.Z, Briot.J.P, Marin.O, Hamel.A, Sens.P, (2003), *Dynamic and adaptive replication for large-scale reliable multi-agent systems*. In LNCS 2603, pp. 182–198. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Guessoum.Z. (2003). *Modèles et architectures d'agents et de systèmes multi-agents adaptatifs*. Thèse d'habilitation de l'Université de Paris 6.
- Hassas.S. (2003). *Systèmes complexes à base de multi-agents situés*. Thèse d'habilitation de l'Université Lyon 1.
- Haynes.T.D., Sen.S, (1997). *Co-adaptation in a team*. In International Journal of Computational Intelligence and Organization, Vol 14, pp 1-20, New Jersey, USA.
- Hoet.S., Sabouret.N. (2009). *Apprentissage par renforcement d'actes de communication dans un contexte multi-agents*. In Proc. 9th Rencontre nationale des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA 2009), pp. 107-123.
- Hogg.L.M.J., Jennings.N.R. (2001). *Socially intelligent reasoning for autonomous agents*. In IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics - Part A 31 (5). pp 381-399.
- Hoogendoorn, M. (2007). *Adaptation of Organizational Models for Multi-Agent Systems based on Max Flow Networks*. In Proc. IJCAI'07, pp 1321-1326.
- Jade (2006). *Jade tutorial*. Available at <http://jade.tilab.com>.
- Jarras.I., Chaib-Draa.B. (2002). *Aperçu sur les systèmes multi-agents*. Rapport technique, CIRANO.
- Jennings.N.R., Sycara,K., Wooldridge.M. (1998). *A roadmap of agent research and development*. International Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (1), pp 7-38.
- Jennings.N.R. (2000). *On Agent-Based Software Engineering*. Artificial Intelligence Journal 117 (2), pp 277-296.

Jiquan.S., Zhiqiang.W. (2008). *Service-Oriented Organization Management and Coordination Control of MAS*. In IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, pp 479-483.

Julien.D. (2004). *Goliat : Un environnement à base de modèles et d'agents pour la conception d'interfaces utilisateurs*. Thèse de doctorat de l'université PARIS 6.

Kota.R., Gibbins.N., Jennings.N.R. (2009), *A generic agent organization framework for autonomic systems*. In Proc. 1st Int. Workshop on Agent-Based Social Simulation and Autonomic Systems, Limassol, Cyprus.

Landau.S., Doncieux.S., Drogoul.A., Meyer.J.A., (2002), *SFERES : Un framework pour la conception de systèmes multi-agents adaptatifs*. RSTI – TSI issue 21. Systèmes multi-agents, pp 427-446.

Laviers.K. (2010). *Multi-agent plan adaptation using coordination patterns in team adversarial game*. In Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), van der Hoek, Kaminka, Lespérance, Luck and Sen (eds.), Toronto, Canada, pp.1673-1674.

Lei.P., LiangXian.G., Yuan.G. (2008). *A study of compulsive genetic algorithm and its performance*. In IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, pp 12-16.

Lerman.K., Galstyan.A. (2003). *Agent memory and adaptation in multi-agent systems*. In *Int. Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'03)*, Melbourne, Australia.

Leriche.S. (2006). *Architectures à composants et agents pour la conception d'applications réparties adaptables*. Thèse de doctorat de l'université Toulouse III.

Lopez.M.L.G. (2005). *Accès à l'information par un système de filtrage collaboratif contrôlé*. Thèse de doctorat à l'Université Grenoble I.

Mano.J.P., Bourjot.C., Lopardo.G., Glize.P. (2006). *Bio-inspired mechanisms for artificial self-organised systems*. In *Informatica 30*, pp 55–62.

Martinez.V.F., Sklar.E. (2004). *A team-based co-evolutionary approach to multi-agent learning*. In *Workshop Proceeding of 3rd International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*.

Melaye.D., Demazeau.Y. (2005). *Modèles et Réseaux de confiance. Analyse bibliographique*. Les cahiers Leibniz. N° 142. ISSN : 1298-020X.

Michalewicz.Z. (1996). *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin.

- Mkadmi.A, Saleh.I. (2008). *Bibliothèque numérique et recherche d'informations*. Edition Lavoisier.
- Mostefaoui.S., Rana.O., Foukia.N., Hassas.S.,Marzo-Serugend.G. D.,Van-Aart.C., Karageorgos.A. (2003). *Self-organising applications: A survey*. In International Workshop on Engineering Self-Organising Applications.
- Moujahed.S. (2007). *Approche multi-agents auto-organisée pour la résolution de contraintes spatiales dans les problèmes de positionnement mono et multi-niveaux*. Thèse de doctorat de l'université de Belfort-Montbéliard.
- Nedellec.C. (2006). *Apprentissage automatique*. Dans Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information. Edition Vuibert Informatique.
- Ng.V., Ho.M.K. (2002). *An intelligent agent for web advertisements*. International journal of foundations of computer science. Vol. 13, N° 4. pp 531-554.
- Nguyen.A.T. (2006). *Un nouveau système de filtrage collaboratif basé sur le modèle des espaces de communautés*. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble I.
- Nguyen.T.D., Thompson.S. (2007). *Intelligent Agent Framework for Order Entry and Management*. The Sixth Intl. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'07) pp1393-1398.
- Ochs.M., Sabouret.N., Corruble.V. (2009). *Simulation de la dynamique des émotions et des relations sociales de personnages virtuels*. In Revue d'Intelligence Artificielle (RIA), vol 23:2-3, pp. 327-358.
- Oh.Jae.C. (2004). *Emergence of cooperative internet server sharing among internet search agents caught in the n-Person prisoner's dilemma game*. In Knowledge and Information Systems.
- Panait.L., Luke.S. (2005). *Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art*. In Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 00, pp 1–48, Springer.
- Papagelis.M., Plexousakis.D. (2005). *Qualitative analysis of user-based and item-based prediction algorithms for recommendation agents*. In Engineering Applications of Artificial Intelligence vol.18, Elsevier, pp 781–789.
- Picard.G, Bernon.C., Gleizes.M.P. (2004). *Cooperative agent model within ADELFE framework: an application to a timetabling problem,*” In AAMAS'04, New York, USA.
- Picarougne.F. (2004). *Recherche d'information sur Internet par algorithmes évolutionnaires*. Thèse de doctorat de l'université de TOURS.
- Rahwan.T., Jennings.N. R. (2007). *An algorithm for distributing coalitional value calculations among cooperating agents*. In Artificial Intelligence Journal 171 (8-9). pp 535-567.

- Rejeb.L. (2005). *Simulation multi-agents de modèles économiques Vers des systèmes multi-agents adaptatifs*. Thèse de doctorat de l'Université de Reims.
- Russell.S., Norvig.P. (2006). *Intelligence artificielle*. Pearson Education 2^e édition.
- Sabouret.N. (2009). *Interactions sur le fonctionnement dans les systèmes multi-agents ouverts et hétérogènes*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre & Marie Curie.
- Scerri.P., Sycara.K. (2008). *Social Networks for Effective Teams*. In Cooperative Networks: Control and Optimization, Edward Elgar Publishing, pp 295-313.
- Schlegel.T., Kowalczyk.R. (2007). *Towards Self-organising Agent-based Resource Allocation in a Multi-Server Environment*. In The Sixth Intl. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'07) pp 74-81. USA.
- Spector.L, Robinson.A. (2002). *Multi-type, self-adaptive genetic programming as an agent creation tool*. In Workshop on Evolutionary Computation for Multi-Agent Systems, ECOMAS'02, International Society for Genetic and Evolutionary Computation.
- Spector.L., Klein.J., Perry.C. (2004). *Tags and the Evolution of Cooperation in Complex Environments*. In Proceedings of the AAAI'04 Symposium on Artificial Multiagent Learning. Menlo Park, CA: AAAI Press.
- Steels.L. (2003). *The Evolution of Communication Systems by Adaptive Agents*. Adaptive Agents and MAS, LNAI 2636 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 125–140.
- Sun.R. (2001). *Individual action and collective function: From sociology to multi-agent learning*. In Journal of cognitive Systems Research 2. Elsevier.
- Sycara.K. (1998). *Multiagent systems*. In AI magazine Volume 19, No.2 Intelligent Agents.
- Tamine.L., Boughanem.M. (2005). *Accès personnalisé à l'information: approches et techniques*. Rapport interne du laboratoire IRIT. Toulouse.
- Tamine.L.L., Calabretto.S. (2008). *Recherche d'information contextuelle et web*. In Recherche d'information: état des lieux et perspectives. Chap. 7., pp 201-230. Edition Hermes Science Lavoisier.
- Tan.Y., Zheng.Z. (2009). *A Multi-agent Based Resource Discovery Scheme for P2P Systems*. In IEEE 978-1-4244-3894-5/09.
- Thomas.V. (2005). *Proposition d'un formalisme pour la construction automatique d'interactions dans les systèmes multi-agents réactifs*. Thèse de doctorat de l'université Nancy 1.

Vacher.J.P. (2000). *Un système adaptatif par agents avec utilisation des algorithmes génétiques multi-objectifs : Application à l'ordonnancement d'atelier de type job-shop N x M*. Thèse de doctorat de l'université du HAVRE.

Velagapudi.P., Prokopyev.O, Sycara.K., Scerri.P. (2007). *Maintaining Shared Belief in a Large Multiagent Team*. In Proceedings of FUSION.

Vidal.J.M. (2006). *Fundamentals of multiagent systems with NetLogo examples*. Copyright © 2006.

Villanova-Oliver. M. (2002). *Adaptabilité dans les systèmes d'information sur le Web. Modélisation et mise en œuvre de l'accès progressif*. Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble.

Vincent.T. (2005). *Proposition d'un formalisme pour la construction automatique d'interactions dans les systèmes multi-agents réactifs*. Thèse de doctorat de l'université Nancy 1.

Wei.Y. Z., Jennings.N. R., Moreau.L., Hall.W. (2008). *User evaluation of a market-based recommender system*. In Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 17 (2). pp 251-269.

Wright.W.A., Smith.R.E., Danek.M., Greenway.P. (2000), *A Measure of Emergence in an Adapting, Multi-Agent Context*. In Proc. SAB'2000.

Zaier.Z., (2010), *Modèle multi-agent pour le filtrage collaboratif de l'information*. Thèse de doctorat de l'université du Québec à Montréal.

Zambonelli.F., Jennings.N. R., Wooldridge.M. (2001). *Organisational rules as an abstraction for the analysis and design of multi-agent systems*. Int J. of Software Engineering and Knowledge Engineering 11 (3), pp 303-328.