



UFR Informatique
Université Claude Bernard-Lyon 1

Laboratoire d'InfoRmatique en Images
et Systèmes d'information

Systemes Complexes à base de Multi-Agents Situés

Mémoire

soutenu le 16 décembre 2003

pour l'obtention de

**l'Habilitation à Diriger les Recherches
de l'Université Claude Bernard – Lyon 1
(spécialité informatique)**

par

Salima Hassas

Composition du jury

Président : Mr. Alain Mille, Professeur Lyon 1

Rapporteurs : Mme. Amal El Fallah-Seghrouchni, Professeur Paris X
Mr. Jacques Ferber, Professeur Montpellier II
Mr. Jean-Paul Sansonnet, Directeur de Recherches CNRS (LIMSI, Paris XI)

Examineurs : Mr. Yves Demazeau, Chargé de Recherches CNRS, HDR (LEIBNIZ, IMAG)
Mme. Catherine Garbay, Directrice de Recherches CNRS (TIMC, IMAG)
Mr. Jean-Pierre Müller, Cadre Scientifique, HDR (CIRAD, Montpellier)

Mis en page avec la classe thloria.

*À la mémoire de Jean-Marc Fouet et de ma sœur Assia, qui m'ont, chacun à sa manière,
mise sur la voie vers l'essentiel ...*

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail :

- Amal El Fallah-Seghrouchni dont j'apprécie tout particulièrement la rigueur scientifique et les grandes qualités humaines. Je n'oublierai pas le soutien amical et chaleureux qu'elle m'a toujours témoigné ;
- Jacques Ferber, dont les travaux pionniers dans le domaine des SMA ont été pour moi une source d'enrichissement scientifique constant ;
- Jean-Paul Sansonnet, dont j'ai découvert l'originalité et la richesse scientifiques à travers les échanges instructifs que nous avons eus ;
- Yves Demazeau, pour les conseils qu'il m'a prodigués et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'évaluer ce travail ;
- Catherine Garbay, pour l'intérêt qu'elle a manifesté pour mon travail et pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de l'évaluer ;
- Jean-Pierre Müller, que j'ai connu comme animateur passionné du groupe Colline, au sein duquel j'ai beaucoup appris ;
- Alain Mille, animateur de l'axe "D2C" du LIRIS et de l'équipe "CEXAS", avec qui j'ai beaucoup de plaisir à collaborer et pour son soutien amical dans certains moments difficiles .

Je remercie aussi tous les collaborateurs, collègues et autres scientifiques des différentes communautés nationales et internationales qu'il m'a été donné de rencontrer, avec lesquels j'ai pu échanger et/ou partager des idées, ou simplement dont j'ai pu lire les écrits. Les travaux présentés dans ce mémoire sont en partie le fruit de ce que j'ai pu apprendre à leurs côtés. Je cite en particulier :

- la communauté francophone des SMA, réunie régulièrement autour des journées francophones JFMAS, dans une ambiance alliant sérieux scientifique et décontraction ;
- les membres du groupe ESOA, et plus particulièrement Giovanna et Noria pour leur amitié et leur collaboration précieuse ;
- les membres des groupes COLLINE et SyCoSMA ;
- les membres de l'équipe CEXAS, les membres du Nautibus et autres membres de l'UFR Informatique et du LIRIS ;

Je n'oublie pas :

- les doctorants et stagiaires 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. J'espère avoir apporté à chacun d'entre eux, autant qu'ils m'ont apporté. Je suis convaincue que le travail que nous avons entrepris ensemble continuera dans des directions diverses que chacun d'entre eux saura marquer de sa propre personnalité .

Enfin 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 ;
- Saliha, Ali, Samir, Anissa, Nacim, Papi Jean et Mami Margueritte, ma seconde famille ;
- Mes amis, sur qui, je sais que je peux me reposer et qui m'apportent chacune et chacun à sa manière, ces petits moments particuliers qui marquent une vie : Samira et Olivier, Feirouz, Simone, Saida, Houria, Hafida et Olivier, Rafika et Moussa, Nabila et Rémi, Salima, Martine, Nicole et le groupe des "Awalistes" (Louise, Kaméla, Lahcène, Zaia et Aziz) .

Je remercie tout particulièrement Anne, cette femme d'exception (et ma "coach" préférée :-)) pour son amitié, son affection et les moments toujours très enrichissants que j'ai plaisir à partager avec elle .

Une pensée particulière va à ma petite nièce Mey. J'espère que l'épreuve difficile qu'elle vient de surmonter du haut de ses 17 mois, sera pour elle, un gage pour une longue et heureuse vie .

Table des matières

Préambule	1
I Introduction Générale	5
1 Introduction	7
1.1 Problématique de recherche	7
1.2 Positionnement de mes recherches et contributions	8
1.2.1 Positionnement du point de vue des SMAs	8
1.2.2 Contributions non détaillées dans ce mémoire	9
1.2.3 Contributions et organisation du mémoire	10
2 Domaines de recherche connexes	11
2.1 Systèmes complexes adaptatifs	11
2.2 Les systèmes dynamiques non linéaires	13
2.3 Les systèmes multi-agents	14
2.3.1 Les systèmes multi-agents situés	15
2.3.2 La stigmergie : un mécanisme de coordination distribuée dans les SMA situés	16
II Contributions	19
3 Un cadre pour le développement de systèmes complexes adaptatifs à base du paradigme multi-agents	21
3.1 Spécification d'un système complexe adaptatif	21
3.2 Paradigme des multi-agents situés et intelligence comportementale . . .	23
3.3 La matérialisation physique de l'environnement	24
3.3.1 Topologie des réseaux complexes comme l'Internet et le Web . .	25
3.4 Stigmergie et stratégie de corrélation des comportements et des flux . .	26

3.4.1	Mise en œuvre de la sitgmergie	26
3.4.2	Stratégie de corrélation : équilibre entre exploration et exploitation	26
3.4.3	Adéquation aux réseaux "Scale-free" et "Small-world"	27
3.4.4	Illustration par le comportement de fourragement des insectes sociaux	27
3.4.5	Exploitation de la métaphore des insectes sociaux	28
3.5	Conclusion	29
4	Ecosystèmes Informatiques : le projet ECoMAS	31
4.1	Motivations pour ces recherches	31
4.2	Études dans le cadre du réseau Internet : ECoNet	32
4.2.1	l'équilibrage dynamique multi-critères sur un réseau ouvert	32
4.2.2	Détection d'intrusion et réponse distribuées	36
4.3	Études dans le cadre du réseau Web : ECoWeb	41
4.4	Autres applications	42
5	Co-construction émergentiste du sens à partir des interactions : le projet CESaR	43
5.1	Problématique	43
5.2	Concepts en relation avec notre problématique	45
5.2.1	Paradigme de raisonnement à partir de l'expérience	45
5.2.2	Partage et échange d'expériences dans les systèmes de RàPC	46
5.2.3	Problème de l'hétérogénéité sémantique dans l'interaction entre agents	46
5.2.4	Représenter l'expérience : l'approche MUNETTE	47
5.3	Contributions et travaux en cours	49
5.3.1	Une modélisation multi-agents du système	49
5.3.2	Représentation de l'expérience et interprétation des traces	50
5.3.3	Travaux en cours sur la représentation des traces	52
5.3.4	Co-construction émergentiste d'ontologies : le modèle MAZETTE	
	53	
	Conclusion Générale	57
		59
1	Constat	59

2	Vers une méthodologie de développement de systèmes informatiques auto-organisés	59
3	L'émergence du sens à partir des interactions	60
	Bibliographie	63

Préambule

Ce mémoire décrit mon activité de recherche depuis mon recrutement sur un poste de Maître de Conférences à l'Université Claude Bernard - Lyon 1 à ce jour (Novembre 2003). Mon intérêt pour la problématique de recherche dans laquelle s'inscrit mon activité actuelle, remonte à mon travail de thèse de doctorat, qui a porté sur la proposition d'une modélisation réflexive du langage d'acteurs, en vue de programmer des systèmes d'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). La proposition d'une modélisation réflexive a émergé de la volonté de doter l'interpréteur du langage d'acteurs que j'ai proposé de capacités auto-adaptatives par rapport à son environnement d'exécution. Ceci m'a amenée à m'intéresser à la question du développement de systèmes informatiques, intégrant des mécanismes propres leur permettant de s'adapter à leur environnement pris dans son sens le plus large. Cette question est au coeur du domaine des systèmes complexes adaptatifs. Mon activité de recherche a porté alors sur l'usage du paradigme multi-agents pour développer ce type de systèmes.

J'ai mené ces activités de recherche, de 1993 à 2000 au sein du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes d'Information (LISI), dans l'équipe "Modélisation et Gestion des Connaissances" animée par Jean-Marc Fouet. Depuis Mai 2000, suite d'une part au décès de Jean-Marc Fouet et d'autre part à la restructuration du paysage lyonnais de la recherche informatique, je poursuis mes activités de recherche au sein de l'équipe "CEXAS : Cognition, Expérience et Agents Situés", une des 4 équipes de l'Axe "Données Document et Connaissances" animé par Alain Mille au sein du nouveau laboratoire LIRIS (Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information). Le LIRIS est associé au CNRS depuis janvier 2003 sous le label FRE 2672. J'anime au sein de l'équipe CEXAS du LIRIS, le thème de recherche portant sur les systèmes complexes et le paradigme multi-agents.

Résumé

La complexité des environnements et des systèmes informatiques actuels nous pousse à envisager l'acte de "computation" même sous un nouvel angle. Avec l'évolution des réseaux de processeurs à grande échelle comme Internet, le développement des moyens de stockage de l'information, de son accès et de sa diffusion, la multiplicité des usages, la sophistication des applications et services offerts, etc, on assiste à l'émergence de nouvelles pratiques et de nouveaux besoins face à l'environnement informatique. Dans ce contexte en perpétuel évolution, Il s'agit de développer des systèmes capables de travailler "en intelligence" avec leur environnement considéré dans son sens le plus large, intégrant tant le niveau physique matériel et logiciel, que le niveau plus conceptuel de l'usage.

Afin d'aborder cette problématique, ma démarche s'inscrit dans la mouvance de développement de systèmes informatiques en utilisant le paradigme des agents situés et incarnés dans l'environnement du système. Un mécanisme important dans ce contexte est celui de la stigmergie (introduit par Grassé en 1959) et qui traduit le fait qu'au sein d'un collectif, les actions futures des agents sont influencées par les effets persistants dans l'environnement des actions passées. Il s'agit alors de s'intéresser à l'environnement comme espace d'inscription de ces traces d'actions et d'interactions, et aux structures et processus qui en émergent selon une vision autopoïétique (i.e. la co-évolution permanente du processus et de la structure en tant que résultat et support du processus).

J'ai exploré ces idées dans une première partie de mes travaux dans le cadre du projet ECoMAS (Emergent Computing with Multi-Agents Systems) , dans lequel je me suis intéressée à l'environnement physique *bas niveau*, comme le réseau informatique et la mise en œuvre de la stigmergie en s'appuyant sur les modèles classiques des sociétés d'insectes. Au delà de la métaphore permettant d'illustrer l'émergence de comportements complexes à partir de l'interaction entre comportements élémentaires, l'intérêt de ces modèles dans ce contexte provient en grande partie de la simplicité qu'ils offrent pour le codage d'un mécanisme de contrôle et de coordination dynamique dans un environnement spatial. Nous avons développé dans ce contexte, des applications orientées réseaux et web (équilibre multi-critères, réponse à la détection d'intrusion dans le domaine de la sécurité, organisation dynamique et permanente de contenus de sources distribuées comme le web). Dans ces travaux, l'environnement est matérialisé par un réseau complexe, dont la topologie évolutive est centrale à la problématique. Des pistes prometteuses sont en vue notamment sur le plan théorique, et en relation avec les études actuelles sur les topologies des réseaux complexes (scale free, small world, etc). Ces dernières pistes me semblent fondamentales tant elles traduisent la prise en compte des traces persistante dans l'environnement physique spatial (Internet, web, etc) des actions corrélées par l'usage du système. Le système

lui-même évolue à son tour selon certaines directions en réaction à ce même usage. Cette vision des systèmes informatiques, peut être étendue progressivement au niveau logiciel puis à un niveau d'abstraction plus élevé comme le niveau cognitif en intégrant explicitement l'utilisateur comme composant à part entière du système informatique. Au niveau cognitif, et dans le cadre de développement de systèmes informatiques centrés humains, nous nous intéressons à l'émergence du sens à partir des interactions (projet CeSAR). La vision autopoïétique et le mécanisme de la stigmergie trouvent pleinement leurs sens dans ce contexte. Dans le prolongement des travaux utilisant les métaphores d'insectes sociaux, nous nous intéressons aux traces d'actions et d'interactions, laissées par les agents logiciels ou humains, dans un environnement matérialisé physiquement par le support informatique (logiciels, documents, etc) utilisé dans le cadre de la réalisation d'une tâche. Ces mécanismes permettent la capitalisation de l'expérience au sein d'un collectif.

Première partie

Introduction Générale

Chapitre 1

Introduction

Cette introduction a pour objectif de définir ma problématique de recherche et de donner le positionnement scientifique de ma démarche pour y répondre.

1.1 Problématique de recherche

La complexité des environnements et des systèmes informatiques actuels nous pousse à envisager l'acte même de "computation" sous un nouvel angle. Avec l'évolution des réseaux de processeurs à grande échelle comme Internet, le développement des moyens de stockage de l'information, de son accès et de sa diffusion, la multiplicité des usages, la sophistication des applications et services offerts etc., on assiste à l'émergence de nouvelles pratiques et de nouveaux besoins face à l'environnement informatique. Dans ce contexte en perpétuelle évolution, il s'agit alors, de développer des systèmes informatiques capables de travailler "en intelligence" avec leur environnement considéré dans son sens le plus large, intégrant tant le niveau physique matériel et logiciel que le niveau conceptuel de l'usage.

Je pense qu'il est nécessaire d'aborder cette problématique selon une vision *holistique*, qui consiste à considérer le système informatique comme un tout, qui ne peut se construire en développant indépendamment chacune de ses parties. Dans la conception d'un langage de programmation par exemple, on peut distinguer deux niveaux : celui de l'environnement d'exécution du langage, qui relève plus du niveau physique (*bas niveau*), et celui de l'expressivité du langage (*haut niveau*), permettant de coder une solution à un problème, plus lié à l'interaction avec l'utilisateur. Ces deux niveaux bien que très éloignés sémantiquement, sont interdépendants. Ceci est d'autant plus vrai, dans un contexte d'environnement dynamique, où les interactions entre les différentes parties du système informatique sont en perpétuelle évolution, nécessitant de ce fait la remise en question permanente de sa structure, son organisation, ses interactions et sa dynamique.

Dans le contexte de l'évolution des systèmes informatiques actuels, cette vision s'impose à tous les niveaux. Les avancées technologiques des moyens de traitement et de diffusion de l'information a favorisé l'émergence de nouveaux usages mettant l'utilisateur au centre du

système informatique. Nous aboutissons alors à des systèmes de plus en plus complexes, dont l'évolution même est guidé par l'usage, qui s'en trouve à son tour modifié. Nous pouvons citer dans ce contexte, l'évolution de l'Internet et du Web par exemple.

Cela nous amène à une vision du système informatique, comme un ensemble de composants en interactions inter-relationnelles et rétroactives, évoluant dans un environnement partagé dynamique et incertain. C'est cette vision que j'ai adoptée dans les différents problèmes que j'ai abordés. Cette description correspond à celle d'un système complexe. En résumé, la problématique définie ci-dessus s'énonce par :

Comment développer des systèmes informatiques capables de travailler "en intelligence" avec leur environnement considéré dans son sens le plus large, intégrant tant le niveau physique matériel et logiciel, que le niveau conceptuel de l'usage ?

Afin d'y répondre, Je me propose d'aborder le développement de ces systèmes selon la perspective des *systèmes complexes adaptatifs*. Le système informatique est alors considéré comme un ensemble d'*agents situés et incarnés*¹, dans l'environnement du système. Ce système se définit ainsi comme un *système dynamique non linéaire*, dont la dynamique est portée par les *interactions*. Ces interactions sont médiées par l'*environnement*, qui agit comme *support et espace d'inscription des traces d'actions et d'interactions* des agents. Un mécanisme important dans ce contexte est celui de la *stigmergie*. Ce concept introduit par Grassé en 1959 dans [51], traduit le fait qu'au sein d'un collectif, les actions futures des agents sont influencées par les effets persistants dans l'environnement des actions passées. Il s'agit alors de s'intéresser à l'environnement comme espace d'inscription de ces traces d'actions et d'interactions, et aux structures et processus qui en émergent selon une vision *autopoïétique* (i.e. la co-évolution permanente du processus et de la structure en tant que résultat et support du processus).

Mes recherches sont alors liées à un ensemble de domaines de recherche que je décris brièvement dans le chapitre 2

1.2 Positionnement de mes recherches et contributions

1.2.1 Positionnement du point de vue des SMAs

Du point de vue des multi-agents (SMAs), mes travaux se distinguent des approches cognitives, dites *BDI*² [6], ou des approches visant à fournir des formalismes théoriques pour la spécification ou la validation des SMAs, en tant que systèmes coopératifs distribués [33]. Je m'intéresse aux SMAs situés et me positionne clairement dans une démarche proche des travaux développés à l'origine en robotique collective [85], et influencés par le domaine

¹Traduction de "embodied"

²Approches fondées sur la représentation des états mentaux selon les croyances, les désirs et les intentions (Beliefs, Desires, Intentions)

de la vie artificielle [65], pour lesquels le rôle de l'environnement est prépondérant³. J'utilise les SMAs, comme un outil de mise en œuvre de systèmes complexes adaptatifs, systèmes auto-organisants dans lesquels la cognition serait distribuée et située [20].

1.2.2 Contributions non détaillées dans ce mémoire

J'ai choisi de décrire dans ce mémoire, comme indiqué par le titre, les recherches qui rentrent dans la thématique des systèmes complexes à base du paradigme multi-agents. De 1994 à 1997, j'ai travaillé dans le cadre d'un projet soutenu par la Région Rhône-Alpes sur la proposition d'un modèle opératoire pour la distribution et le contrôle dans les systèmes à base de règles de production. Nos contributions dans ce domaine sont décrites dans les publications [16, 1].

Par ailleurs, je me suis intéressée dans le cadre du projet I2MAS⁴, à la composition et aux architectures dynamiques dans les SMAs conversationnels. Cette thématique concerne le travail de thèse de Denis Jouvin, et s'inscrit dans le domaine de l'ingénierie logicielle à base d'agents. Le sujet de cette thèse se situe en marge de ma thématique principale. Ceci s'explique par le contexte de sa réalisation. Denis Jouvin a commencé ce travail sous la direction de Jean-Marc Fouet (09/1998-05/2000). En mai 2000, Jean-Marc Fouet nous a quitté brutalement. La responsabilité de l'encadrement de cette thèse m'a alors été confiée (05/2002-12/2003).

Les contributions principales de cette thèse sont :

- la réification de la conversation et la définition explicite de la notion de rôle dans les conversations. Cette réification permet de définir la conversation comme structure interactionnelle atomique servant de brique de base pour la mise en œuvre de l'interopérabilité des systèmes multi-agents conversationnels [58] ;
- la définition de la délégation dynamique de rôle conversationnel comme mécanisme de composition dynamique de systèmes conversationnels. Ce mécanisme permet entre autres de réaliser l'adaptation de protocoles dans les SMAs conversationnels. Un prototype compatible FIPA (FIPA-Compliant) a été proposé et validé sur l'adaptation de protocoles d'enchères [58, 59].
- la proposition de la composition dynamique comme paradigme pour la reconfiguration dynamique d'architectures multi-agents. La reconfiguration est fondée sur l'abstraction de sous-systèmes par un agent composite, vers lequel seront déléguées les interactions destinées au sous-système abstrait [62, 60, 61].

Je joins à ce mémoire les publications [59, 61].

³Je n'utilise pas volontairement le terme de SMA réactif, car je le trouve réducteur.

⁴I2MAS est l'acronyme utilisé pour Interoperability and Interaction in Multi-Agent Systems

1.2.3 Contributions et organisation du mémoire

Après une présentation des domaines de recherche liés à ma problématique au chapitre 2, je présenterai les contributions de mes activités de recherche en suivant le plan suivant :

- dans le chapitre 3 : je définis un cadre générique pour le développement de systèmes complexes adaptatifs à base du paradigme multi-agents. Ce cadre constitue les bases méthodologiques que j’ai suivi dans l’ensemble de mes projets de recherches ;
- dans le chapitre 4 : je décris le projet ECoMAS⁵, permettant le développement de systèmes informatiques auto-organisants dans le cadre d’applications évoluant sur des réseaux complexes (Internet, Web, etc.).
- dans le chapitre 5 : je décris le projet CESaR⁶ qui s’inscrit dans la thématique de co-construction du sens à partir des interactions. Il s’intéresse particulièrement à l’échange, partage et co-construction d’expériences au sein d’un collectif ;
Je donnerai pour chacun des projets développés, la définition de la problématique abordée, sa situation dans l’état des travaux, nos contributions et travaux en cours et terminerai par une conclusion.
- dans le dernier chapitre : je conclus la présentation de mes travaux en rappelant la problématique générale. Je situerai les grandes lignes qui ont guidé ma démarche de recherche et donnerai les pistes que je souhaite explorer au cours des travaux en cours et futurs.

Je décrirai en annexe, mes activités liées à la recherche en matière d’encadrements, animations, publications et projets contractuels.

⁵ECoMAS est l’acronyme utilisé pour : Emergent Computing with Multi-Agents Systems

⁶CESaR est l’acronyme utilisé pour : Collective Experience Sharing and Reuse

Chapitre 2

Domaines de recherche connexes

2.1 Systèmes complexes adaptatifs

Le domaine des systèmes complexes est un domaine pluridisciplinaire qui s'intéresse à la complexité comme propriété par essence d'un système. Pour comprendre la complexité d'un système, les recherches se sont déployées autour de notions comme : l'auto-organisation, l'émergence, les réseaux hétérogènes d'acteurs interagissants, la dynamique des systèmes, etc. Ces recherches ont été abordées tant du point de vue de disciplines relevant des sciences naturelles (comme la biologie, la physique, la chimie, etc.), des sciences humaines et sociales (linguistique, économie, sociologie, psychologie, etc.) que du point de vue des outils mathématiques (théorie du chaos, théorie des catastrophes, etc.) ou informatiques (intelligence artificielle, vie artificielle, réseaux de neurones, etc.).

Bien que considéré comme un domaine émergent⁷, le domaine des systèmes complexes s'intéresse à des problématiques qui remontent aux années 40. A cette époque, les travaux sur la *Théorie du Système Général* proposée par le biologiste Ludwig Von Bertalanffy [11, 12] et la cybernétique introduite par N. Wiener et R. Ashby [87], ont révolutionné la vision réductionniste que l'on avait de la notion de système. Bertalanffy souligne le fait que les systèmes réels sont des systèmes ouverts sur leur environnement, avec lequel ils interagissent en permanence. Ceci leur permet d'acquérir de nouvelles propriétés par émergence, produisant ainsi une évolution continue. La théorie des systèmes se focalise alors sur la manière dont les parties sont interconnectées et interagissent pour former un tout (holisme), plutôt que sur la caractérisation de la nature de chacun des composants. Ceci met l'organisation d'un système au cœur de la description de sa nature.

Définition d'un système complexe Un système complexe est un système composé d'un ensemble d'éléments homogènes ou hétérogènes, interagissant entre eux de façon non linéaire (interactions rétroactives), mettant ainsi en œuvre une dynamique permettant

⁷L'origine de ce domaine est associée à la création du Santa Fe Institute aux Etats Unis dans les années

à l'ensemble du système d'exister comme un tout, différent de la simple somme de ses composants. On distingue alors deux niveaux :

- un niveau micro, représentant le niveau des composants, avec des propriétés locales à chacun d'eux ;
- un niveau macro, représentant l'ensemble du système, avec des propriétés nouvelles, que l'on ne retrouve dans aucun des composants pris individuellement. On parle alors d'émergence de nouvelles propriétés.

Le caractère complexe d'un système, tient aux émergences induites par les interactions rétroactives. Dans la dynamique du système, ces interactions permettent de mettre en œuvre les mécanismes de son adaptation et de son évolution par rapport aux évolutions de son environnement. On parlera alors de *système complexe adaptatif*.

Définition d'un système complexe adaptatif Kevin Dooley, donne dans [28] une définition d'un système complexe adaptatif, en faisant ressortir des principes que l'on peut retrouver dans les travaux de Holland [54], Prigogine et Stenger [82], Maturana et Varela [71] :

"A CAS behaves/evolves according to three key principles : order is emergent as opposed to predetermined, the system's history is irreversible, and the system's future is often unpredictable. The basic building blocks of the CAS are agents. Agents are semi-autonomous units that seek to maximize some measure of goodness, or fitness, by evolving over time. Agents scan their environment and develop schema representing interpretive and action rules. These schema are often evolved from smaller, more basic schema. These schema are rational bounded : they are potentially indeterminate because of incomplete and/or biased information ; They are observer dependent because it is often difficult to separate a phenomenon from its context, thereby identifying contingencies ; and they can be contradictory. Schema exist in multitudes and compete for survival."

Dans le cadre de mes travaux, je me suis intéressée, à partir de cette définition aux principes fondamentaux suivants :

- l'émergence de l'ordre, l'irréversibilité de l'historique du système et l'imprévisibilité de son comportement futur ;
- la semi-autonomie⁸ des agents et leur évolution guidée par la recherche de l'adaptabilité maximale ;
- la formation de schémas globaux , constituant des règles d'interprétations ou d'actions, par agrégation de schémas plus primitifs ;
- l'existence de multiples schémas pouvant être contradictoires, et qui sont en compétition pour se maintenir dans l'environnement ;

⁸La semi-autonomie est liée, de mon point de vue , à l'interaction avec l'environnement et l'utilisateur

- la sensibilité au contexte et la dépendance de l’observateur.

L’apport des travaux dans le domaine des systèmes complexes adaptatifs par rapport à ceux des disciplines plus traditionnelles, consiste à aborder ses problématiques sous l’angle de l’usage de l’outil informatique, comme support pour la simulation de systèmes naturels complexes afin de comprendre les phénomènes sous-jacents. Plus récemment, une branche nouvelle a émergé de ce vaste domaine : *l’informatique bio-inspirée* ou *naturo-inspirée*. Cette branche s’intéresse à l’usage des systèmes naturels comme source d’inspiration pour le développement de systèmes informatiques. C’est dans cette dernière branche que s’inscrit notre activité de recherche.

Dans ce contexte, le paradigme multi-agents semble fournir un outil approprié pour la simulation⁹, ou la mise en œuvre effective de systèmes complexes adaptatifs.

2.2 Les systèmes dynamiques non linéaires

Sur le plan théorique, l’étude des systèmes complexes adaptatifs s’est beaucoup appuyée sur la *Théorie du Chaos*. Cette théorie est souvent associée à la notion ”d’ordre / ou de désordre” dans les systèmes dynamiques dont le comportement est apparemment aléatoire ou ”chaotique”. Cette théorie s’intéresse aux systèmes dynamiques non linéaires déterministes (ce qui semble être le cas des systèmes complexes adaptatifs). D’un point de vue mathématique, un système dynamique peut être décrit par l’ensemble des variables permettant de caractériser son état et les fonctions exprimant leur évolution au cours du temps. Quand ces fonctions ne sont pas linéaires, le système est dit dynamique non linéaire. Dans les systèmes complexes adaptatifs, les fonctions exprimant l’évolution du système au cours du temps, ne sont effectivement pas linéaires du fait des interactions non triviales (rétroactions par exemple) caractérisant ces systèmes. Par ailleurs, quand les transitions d’un état S_t du système à un état S_{t+1} sont déterministes (i.e. non probabilistes), le système est caractérisé par une dynamique non linéaire déterministe. La dynamique des systèmes complexes adaptatifs, semble correspondre à ce type de dynamique. En effet, le caractère adaptatif du système ne peut être le fruit d’une dynamique *complètement* aléatoire. J. Holland dans [53], décrit l’évolution de ces systèmes comme étant le fruit d’une stratégie *équilibrant l’exploration* (aléatoire), pour maintenir une certaine diversité et *l’exploitation*, pour renforcer des pistes prometteuses permettant l’adaptation.

Un système dynamique non linéaire déterministe, exhibant un comportement chaotique est caractérisé par les points importants suivants [30] :

- l’influence des paramètres du système sur la nature de sa dynamique. Par exemple la simple équation logistique¹⁰ utilisée pour exprimer la croissance d’une population

⁹La simulation multi-agents est d’ailleurs un sous domaine de recherche émergent

¹⁰L’équation logistique est souvent utilisée comme exemple didactique pour la compréhension de la notion de chaos

- sous la contrainte de ressources ($X_{t+1} = \lambda X_t(1 - X_t)$), qui selon la valeur des paramètres exhibe une évolution très rapide vers un état d'équilibre (pour $0 < \lambda < 3$) ou un comportement cyclique (pour $3 < \lambda < 4$)¹¹.
- l'existence de points attracteurs : le diagramme de phase¹² d'un système chaotique, est un hyperespace avec un ou plusieurs points attracteurs (appelés les attracteurs étranges). Au cours de son évolution, le système a tendance à être attiré vers ces points (attracteurs).
 - la sensibilité aux conditions initiales : connu sous "l'effet papillon", qui exprime que de légers changements des conditions initiales de tels systèmes, leur font prendre des trajectoires complètement différentes.
 - l'émergence de l'auto-organisation à la frontière du chaos : quand ces systèmes sont poussés loin de leur point d'équilibre, ils peuvent s'auto-organiser vers de nouvelles structures émergentes. Prigogine et Stengers [82] ont montré que l'entropie peut décroître localement dans un système ouvert ou dissipatif. Quand l'énergie augmente dans ces systèmes, le système la dissipe à travers un ordre émergent.
 - les changements qualitatifs dans de tels systèmes, correspondent à ce qui est appelé la "transition de phase" dans les systèmes physiques, et se produisent lorsqu'un paramètre de contrôle passe un certain seuil - point de bifurcation -. Les bifurcations peuvent s'observer sur le diagramme de phase, par un dédoublement de période (passage de N attracteurs à 2N attracteurs). Cela correspond à un changement d'échelle d'observation des points d'émergence.

2.3 Les systèmes multi-agents

Le domaine des systèmes multi-agents (SMA) est actuellement un domaine de recherche qui suscite beaucoup d'intérêt. Ce domaine est né à la fin des années 70 et début des années 80, de l'idée de distribuer les connaissances et le contrôle dans les systèmes d'Intelligence Artificielle. Cette idée a émergé d'une part du besoin de faire face à la complexité croissante de ces systèmes et a été favorisée d'autre part par l'émergence des modèles et machines parallèles, rendant possible la mise en œuvre opérationnelle de la distribution. Une bonne description de l'évolution historique de ce domaine est donnée par J. Ferber dans [42].

Définition d'un système multi-agents *Un système multi-agents est un ensemble d'entités (physiques ou virtuelles) appelées agents, partageant un environnement commun (physique ou virtuel), qu'elles sont capables de percevoir et sur lequel elles peuvent agir. Les perceptions permettent aux agents d'acquérir des informations sur l'évolution de leur environnement, et leurs actions leur permettent entre autres de modifier l'environnement. Les agents interagissent entre eux directement ou indirectement, et exhibent des compor-*

¹¹Pour une valeur $\lambda = 3,99$ le système passe dans un état chaotique.

¹²Un diagramme de phase décrit l'évolution des états du système au cours du temps

tements corrélés créant ainsi une synergie permettant à l'ensemble des agents de former un collectif organisé¹³

L'analyse ou le développement d'un système multi-agents, nécessite donc la prise en compte d'au moins¹⁴ quatre dimensions, comme identifié dans l'*approche voyelle : AEIO* définie par Y. Demazeau [25] :

l'**A**gent, l'**E**nvironnement, les **I**nteractions, et l'**O**rganisation.

Actuellement, il existe deux tendances de recherche dans le domaine des multi-agents : la tendance cognitive, influencée par l'IA symbolique, et la tendance réactive influencée par la vie artificielle et l'intelligence "sans représentation" selon Brooks [85], appelée aussi *embodied intelligence*.

Ces deux courants se distinguent par la manière d'aborder la cognition. Le courant cognitif s'appuie sur une démarche cognitiviste. Il présuppose l'existence de structures mentales élaborées et des mécanismes d'exploitation symboliques basés principalement sur la logique. Le courant réactif quant à lui, d'influence biologique s'appuie sur une démarche constructiviste de la cognition, selon une vision autopoïétique [70, 71]. Dans cette vision, comme défini dans [96], "...La cognition est la conséquence de la circularité et de la complexité de la forme de tout système dont le comportement inclut la maintenance de l'autoproduction de cette forme ..."¹⁵. Cette vision traduit un couplage structurel fort entre le système et son environnement.

En résumé, contrairement à l'approche cognitive de l'IA classique où l'on implante dans les systèmes les représentations des processus cognitifs, dans une approche autopoïétique, on implante "le couplage structure-environnement" donnant lieu à ces représentations [47]. Les systèmes multi-agents situés s'inscrivent dans cette dernière mouvance. La mise en situation concerne ici, tant le niveau contextuel de l'environnement (abstrait), que son niveau matériel et physique (*embodiment*).

2.3.1 Les systèmes multi-agents situés

Le domaine des agents situés est né à la fin des années 80, à partir de travaux dans le domaine de la robotique mobile. Dans ces travaux, la prise en compte d'un environnement

¹³Organisé est à prendre ici dans le sens que des rôles et des interactions entre rôles peuvent être identifiés *a priori* ou *a posteriori*.

¹⁴J'ajouterai à ces dimensions l'Utilisateur (U), qui peut-être juste un observateur ou un agent à part entière dans le cas de systèmes centrés humains

¹⁵Traduction de l'auteur de "As a biological phenomenon, cognition is viewed with respect to the organism(s) whose conduct realizes that phenomenon. In autopoietic theory, cognition is a consequence of circularity and complexity in the form of any system whose behavior includes maintenance of that selfsame form"

complexe et dynamique, rend le problème de *sélection d'action*¹⁶ difficile à résoudre avec des approches délibératives classiques [2, 83]. La mise en situation de l'agent a donc été proposée, pour permettre des comportements plus réactifs, face à la dynamique de l'environnement. C'est dans ce contexte que R. Brooks et son équipe [84, 67], puis d'autres [26, 89, 68, 31, 91] ont proposé l'approche comportementale inspirée de la biologie pour la robotique mobile, comme moyen de mise en œuvre d'une intelligence "sans représentation" [85].

Cette approche s'est ensuite étendue à d'autres problématiques, comme la résolution distribuée de problèmes [32, 31, 43] ou la simulation multi-agents, qui a émergé depuis 1998 comme domaine de recherche à part entière.

L'approche comportementale tient son inspiration de la biologie. L'éthologie dans ce domaine a inspiré beaucoup de travaux, et a donné naissance au domaine de l'intelligence en essaim (swarm intelligence) [13]. Cette approche couvre des travaux de différentes natures comme le développement de métaheuristiques pour les problèmes d'optimisation [24, 66], la robotique collective [64, 69, 95, 18] ou encore des applications dans le domaine des réseaux Internet et réseaux de télécommunications [15, 55], etc.

2.3.2 La stigmergie : un mécanisme de coordination distribuée dans les SMA situés

Dans les SMA situés, l'environnement constitue un composant central au système. L'influence biologique (éthologique entre autres), confirme cette importance. Dans ce contexte, les agents situés utilisent l'environnement comme moyen d'interaction et aussi comme support d'inscription des effets de leurs actions.

La stigmergie a été définie par Grassé [51] par :

"La coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui. C'est cette stimulation d'un type particulier que nous donnons le nom de STIGMERGIE (stigma, piqûre ; ergon, travail, œuvre = œuvre stimulante"

Ceci exprime l'influence exercée par les effets persistants dans l'environnement, des comportements passés des agents, sur leurs comportements futurs. Ces effets ont été classés dans [55] en trois cas :

- un effet qualitatif : exprimant l'influence sur le choix de l'action à effectuer par un agent ;
- un effet quantitatif : exprimant l'influence sur les paramètres (comme la position, la force, la fréquence, la latence, la durée, etc.) de l'action, la nature de l'action restant elle inchangée ;

¹⁶La sélection d'action, consiste à décider à tout moment de l'action la plus appropriée à accomplir en fonction de l'état perçu de l'environnement

- un effet indirect qualitatif et / ou quantitatif : exprimant l'influence sur le résultat de l'action. Cette influence agit indirectement sur la manière dont sera menée l'action et sur son résultat, du fait des changements opérés sur son environnement.

Ces cas définissent deux types de stigmergies : *stigmergie active* (cas 1 et 2) et *stigmergie passive* (cas 3).

La stigmergie définit ainsi, un mécanisme puissant de contrôle et de coordination distribués. Par stigmergie, on peut agir directement sur la nature des actions (cas 1), sur la manière de les mettre en œuvre (cas 2), mais aussi indirectement (par effet de bord) sur les résultats des actions.

La stigmergie est un mécanisme, qui permet à un environnement de s'auto-structurer à travers les actions des agents sur l'environnement. Cette structuration de l'environnement a, à son tour, un effet sur le comportement des agents, qui agissent à leur tour sur la structure de l'environnement et ainsi de suite. On assiste alors à un phénomène de couplage entre le système et son environnement, générant l'auto-organisation (à un niveau macro) de l'ensemble (système + environnement) [15, 55].

Ce couplage permet au système de s'auto-produire comme un collectif auto-organisé. En d'autres termes, la stigmergie fournit un moyen de coordination entre les agents, émanant du système lui-même.

Relation à l'auto-organisation L'auto-organisation est définie par Bonabeau et al. [15, 55], comme étant "*Un ensemble de mécanismes dynamiques, permettant à des structures d'apparaître au niveau global d'un système (niveau macro) à partir des interactions de ses composants de plus bas-niveau (niveau micro). Les règles spécifiant les interactions entre les composants du système, sont exécutées sur la base d'informations purement locales (niveau micro), et ne font en aucun cas référence à la configuration globale (du niveau macro). Cette configuration globale est une propriété émergente du système plutôt qu'une propriété imposée au système, sous l'influence d'une commande extérieure*".

Afin de caractériser l'auto-organisation [55, 4], ces mêmes auteurs définissent :

- ses *ingrédients clés* :
 - la rétroaction positive : comme étant la force motrice menant le système à un changement allant dans le sens de sa propre perturbation (en réaction à la perturbation de son environnement) ;
 - la rétroaction négative : agissant comme un facteur régulateur (stabilisateur), allant dans le sens inverse de la perturbation ;
 - l'aléatoire ou l'amplification des fluctuations : permettant d'introduire de la diversité et favorisant la mise en œuvre des rétroactions ;
 - les interactions multiples : créant la dynamique permettant la mise en œuvre des perturbations ;
- et les *signatures* la caractérisant, qui incluent ;
 - la création de structures / comportements spatio-temporels émergents au niveau

- collectif (niveau macro) ;
- la multi-stabilité du système, exprimant le fait que celui-ci peut atteindre plusieurs états stables, apparaissant à des niveaux d'observation différents. Ces changements d'états de stabilité correspondent aux bifurcations (transition de phase) dans le diagramme d'états exprimant la dynamique du système (cf. 2.2). Les points de bifurcations correspondent à des points critiques. Au niveau de ces points critiques, le système exhibe de grands changements au niveau des états du collectif, suite à des petits changements au niveau de l'environnement, sans changements au niveau des comportements individuels ; ou bien de grands changements au niveau du collectif, suite à de petits changements au niveau des comportements individuels.

Stigmergie et auto-organisation dans nos travaux Les systèmes informatiques que nous développons, sont conçus comme un collectif d'agents situés et incarnés, dans un environnement physique qu'ils sont capables de percevoir et sur lequel ils peuvent agir. La représentation spatiale de cet environnement, leur permet de mettre en œuvre la stigmergie comme mécanisme permettant l'auto-organisation. Celle-ci s'exprime non seulement, au niveau de leur répartition dans l'environnement selon les structures spatiales émergentes, mais aussi au niveau de leur organisation sociale. Les systèmes d'insectes sociaux, exhibent ces propriétés [13, 55], c'est l'une des raisons qui nous poussé à les utiliser dans un premier temps comme métaphore pour le développement de certains systèmes.

Deuxième partie

Contributions

Chapitre 3

Un cadre pour le développement de systèmes complexes adaptatifs à base du paradigme multi-agents

influencée par l'inspiration autopoïétique qui fonde la cognition sur le couplage structurel entre le système et son environnement, je considère le système informatique comme un écosystème artificiel, dans lequel des agents logiciels ou humains, partagent un environnement commun. Les agents co-évoluent en interagissant les uns avec les autres, via l'environnement partagé. Afin de développer un tel écosystème, je propose un cadre générique permettant d'adopter la perspective des systèmes complexes adaptatifs, à l'aide du paradigme multi-agents.

3.1 Spécification d'un système complexe adaptatif

Le cadre que je propose s'appuie sur la spécification définie par J. Holland, sous forme d'un ensemble d'éléments opératoires minimaux pour la mise en œuvre d'un système complexe adaptatif. Comme décrit dans [29], ces éléments sont regroupés en :

- quatre propriétés qui consistent en : l'agrégation, la non linéarité, les flux et la diversité ;
- et trois mécanismes qui sont : l'étiquetage (tagging), les modèles internes et les blocs de base (building blocks).

Suivant ces éléments, les agents agissent les uns avec les autres pour former un système complexe qui en conséquence développe des propriétés émergentes.

L'*agrégation* permet le regroupement émergent d'un ensemble d'agents. Ce regroupement peut être réifié à un niveau d'observation plus élevé, par un nouvel agent. Les agents du niveau supérieur mettent en œuvre une nouvelle dynamique pour former un nouveau système complexe à un niveau d'observation plus élevé. Ces agrégations définissent donc des hiérarchies émergentes, attribuant une certaine organisation au système. La mise en

œuvre de l'agrégation nécessite de disposer, au niveau des agents, d'indices comme les rôles fonctionnels, les caractéristiques structurelles, etc. Ces indices permettent de spécifier la nature des interactions entre agents, afin de catalyser l'agrégation. Ils sont mis en œuvre dans le système grâce au mécanisme d'*étiquetage* (*tagging*) des agents comme l'attribution d'un rôle par exemple.

Les interactions, tant intra-niveau qu'inter-niveaux, entre agents doivent être *non linéaires* afin de permettre le phénomène d'émergence. Elles s'expriment par des *flux* d'information et d'éléments physiques comme les ressources.

Afin de favoriser l'adaptation du système à son environnement changeant, la diversité est une propriété nécessaire, menant à la co-évolution des agents intra-niveau ou inter-niveaux. Ceci est mis en œuvre, par la diversité des règles et comportements initiaux et des mécanismes de leur évolution, agissant sur la diversité des flux et et réagissant, en retour, à leur diversification.

Au niveau des agents, les règles comportementales, les modèles mentaux ou les schémas structurels, sur lesquels s'appuient les comportements, définissent *les modèles internes*. Ces modèles permettent d'interpréter le monde extérieur (le système et son environnement) et définissent les actions à prendre en fonction de ces interprétations / observations.

L'ensemble du système est bâti sur des blocs de base, tant au niveau de son comportement que de sa structure. Ces blocs de base sont liés aux modèles internes. Ces derniers sont construits par réutilisation, diversification et agrégation des blocs de base. La définition des blocs de base est alors fondamentale pour la construction de l'ensemble du système. Ils constituent les ingrédients nécessaires, permettant de générer l'ensemble du système à travers les mécanismes décrits ci-dessus.

Enfin, un élément essentiel pour tout système complexe, est la fonction d'adéquation (fitness) de chaque agent et de tout le système. Cette fonction permet de mesurer l'adéquation des agents, considérés à chaque niveau d'observation. Cette fonction se définit par la combinaison linéaire ou non linéaire d'un ensemble d'attributs locaux ou globaux de l'entité considérée. Les attributs globaux sont liés d'une part, à la fonction d'adéquation (fitness) individuelle et d'autre part, à la fonction d'adéquation des agrégats ou de tout le système, dont l'entité fait partie. Les fonctions d'adéquation peuvent être uniques pour chaque entité, ou partagées à travers les agrégats. Dans ce cas les agents agissent collectivement. La fonction d'adéquation (fitness) permet à l'agent d'être téléologique (guidé par un but) qui peut être individuel ou collectif.

Partant de ces spécifications, le cadre que je propose se base sur l'ensemble de principes ou éléments méthodologiques suivants :

- l'usage du paradigme des multi-agents situés et de l'intelligence comportementale. Ceci permet la définition des blocs de base et des modèles internes ainsi que le mécanisme d'étiquetage des agents (rôle des agents) ;
- la matérialisation physique de l'environnement et l'utilisation d'une représentation

spatiale sous forme d'un réseau complexe. Ceci permet, d'une part, la matérialisation spatiale des agrégats émergents grâce à la situation et l'incarnation des agents et d'autre part, la matérialisation des flux d'informations et de ressources ;

- l'usage de la stigmergie comme mécanisme de contrôle et de coordination distribuée. Ceci permet l'exploitation des flux et la mise en œuvre de la non linéarité des interactions intra-niveaux et inter-niveaux ;
- l'usage d'une stratégie de corrélation des comportements des agents fondée sur le maintien de l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation. L'exploitation permet de mettre en œuvre l'agrégation des blocs de base au niveau des comportements et l'exploration permet la mise en œuvre de la diversité.

Ces différents éléments sont bien évidemment interdépendants.

3.2 Paradigme des multi-agents situés et intelligence comportementale

L'intelligence comportementale est caractérisée par les principes suivants :

- le monde est son propre modèle, ce qui implique l'absence d'une représentation symbolique de l'environnement. Par exemple pour une application orientée réseaux, on considère le réseau lui-même comme l'environnement dans lequel évoluent les agents (cf. Projet ECoMAS), pour un système d'assistance médiée par un outil informatique, on considère l'outil informatique comme cet environnement (cf. Projet CESaR) ;
- la mise en situation (*situatedness*) des agents, qui implique que les agents ont une approche constructiviste. ils agissent en fonction de leur appréciation de la situation qui se présentent à eux. Leurs perceptions/actions sont contextualisées ;
- l'incarnation (*embodiment*) des agents, qui signifie que les agents sont matérialisés en tant qu'entités à part entière dans leur environnement, avec lequel ils ont une relation forte. C'est ainsi que dans les systèmes centrés utilisateur, je propose de représenter l'utilisateur comme un agent à part entière du système ;
- l'activité des agents est guidée par une boucle "sensori-motrice" i.e. l'activité du système est codée en termes de comportements non délibératifs des agents, sur la base d'un bouclage "perceptions / actions".

Cette approche se matérialise dans nos travaux par la définition de populations d'agents de tailles importantes, où chaque agent met en œuvre un comportement simple selon une boucle "perception / action" non délibérative. Les agents sont situés et incarnés physiquement dans l'environnement. Ce sont des entités autonomes, qui "vivent"¹⁷ et évoluent

¹⁷La notion de vie est à comprendre dans le sens où les agents reproduisent certains comportements des vivants comme la naissance, la multiplication, la disparition, etc., en fonction des contraintes de l'environnement

dans cet environnement en participant au maintien de la viabilité du système. Les comportements mis en œuvre jusqu'à présent dans nos projets sont très fortement inspirés de certains comportements des insectes sociaux, comme le fourragement ou le tri collectif dans le cas des applications Internet et Web. Par ailleurs, les environnements considérés dans ce projet étant physiquement distribués, les agents sont aussi mobiles.

3.3 La matérialisation physique de l'environnement

La représentation spatiale de l'environnement est fondamentale à notre approche. Elle permet de "cristalliser" les informations cruciales sur lesquelles s'appuie la dynamique du système. Cette représentation prend la forme d'un réseau complexe d'interconnexions, **hautement re-configurables**, en réaction à la dynamique qui le sous-tend, et à l'évolution de l'environnement. La dynamique de ces systèmes est portée par un ensemble de processus mis en œuvre afin de permettre l'émergence de structures spatiales considérées comme stables par rapport à un état d'évolution de l'environnement. L'adaptativité du système est alors obtenue par le maintien de la co-évolution entre la structure et l'environnement, via les processus qui les génèrent selon une vision autopoïétique.

Pour le développement d'applications de gestion de réseaux comme l'Internet ou le Web par exemple. L'environnement physique, représenté par un réseau complexe, serait le réseau lui-même (Internet ou Web). Pour une application d'assistance à la réalisation d'une tâche médiée par un environnement informatique, l'environnement physique serait l'ensemble des entités intervenant dans cet environnement informatique comme les documents, les applications, les ontologies, etc. Le réseau complexe représentant cet environnement est alors l'ensemble de ces entités et les liens qui existent entre elles et qui s'établissent entre elles par l'usage.

De récentes études [35, 3] ont montré que les réseaux à large échelle, fabriqués par l'homme tels que l'Internet, le Web, les réseaux sociaux, etc., partagent la même topologie que beaucoup de réseaux métaboliques ou réseaux de protéines d'organismes vivants. Les auteurs de ces travaux stipulent que l'émergence de ces réseaux est guidée par des processus auto-organisés, régis par des lois simples mais génériques.

Nous pouvons voir l'évolution de ces réseaux et de leurs usages comme un processus autopoïétique. La structure de ces réseaux a la particularité d'être guidée dans son évolution par les usages. Ces derniers évoluent, à leur tour, en réaction à l'évolution de la structure. La topologie du réseau est alors le résultat d'une boucle de rétroaction entre l'usage du réseau et sa structure. Ceci est à l'origine ce qu'on appelle le caractère "scale free" de ces réseaux, comme nous le décrirons ci-dessous.

3.3.1 Topologie des réseaux complexes comme l'Internet et le Web

Une étude substantielle sur les modèles théoriques des réseaux complexes a été menée par Albert et Barabasi [86]. Nous citons ci-dessous quelques-unes de leurs observations. En termes mathématiques, un réseau est représenté par un graphe $G=\{N,E\}$ où N représente un ensemble de nœuds et E représente un ensemble d'arêtes. Une arête exprime un lien entre deux nœuds. Comme mentionné dans [86], les réseaux complexes ont été étudiés selon différents modèles par rapport à trois caractéristiques :

- *la distribution des degrés des nœuds* : qui exprime la fonction de distribution $P(k)$ représentant la probabilité qu'un nœud choisi aléatoirement possède exactement k arêtes.
- *le coefficient d'agrégation (clustering)* : qui exprime une mesure C_i associée à un nœud i . Cette mesure représente le ratio entre le nombre E_i d'arêtes existant réellement entre l'ensemble composé du nœud i et de ses k_i voisins immédiats et le nombre total d'arêtes possibles entre ces nœuds, si le nœud i et ses k_i voisins étaient complètement connectés les uns aux autres. Ce ratio est s'exprime par : $(C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)})$
- *la connectivité et le diamètre* : le diamètre d'un graphe est la distance maximale entre une paire quelconque de nœuds d'un graphe. La connectivité dans un graphe est mesurée par la distance moyenne entre une paire quelconque de nœuds.

Ces caractéristiques donnent des indications sur la topologie d'un graphe et sur le processus d'organisation sous-jacent, menant à cette topologie, au cours de son évolution croissante.

Traditionnellement les réseaux à grande échelle, ont été représentés par des graphes aléatoires. Des travaux récents [94] ont montré que les réseaux complexes réels ne se comportent pas comme des graphes aléatoires. En particulier, pour un grand nombre de réseaux comme Internet et le Web [35, 9], la distribution des degrés suit une loi de puissance $P(k) = k^{-\gamma}$ (où γ est un paramètre constant). Cette loi exprime la coexistence d'un petit nombre de nœuds très fortement connectés avec un grand nombre de nœuds faiblement connectés. Les réseaux exhibant cette propriété sont appelés *Réseaux Invariant d'échelle (Scale Free Networks)*. Par ailleurs, une autre observation a été faite pour la première fois par Watts et Strogatz [94] consiste dans le fait qu'un grand nombre de réseaux complexes possède la propriété "*Petit Monde*" (*Small World*). Cette propriété traduit le fait que malgré la grande taille de ces réseaux complexes, le chemin moyen entre deux nœuds quelconques est relativement court. La nature "*scale free*" des réseaux comme l'Internet et le Web, tient son origine de deux principes :

- la croissance évolutive (*evolving growth*), induite par l'ajout continu de nouveaux nœuds ;
- l'attachement préférentiel (*preferential attachment*), qui exprime le fait que les nœuds fortement connectés, ont plus tendance à être connectés aux nouveaux nœuds arrivants, que les autres nœuds (faiblement connectés). Ce qui traduit que la connectivité

de ces réseaux suit un phénomène auto-catalytique : plus un nœud est connecté, plus il aura des chances d'être connecté dans l'avenir.

La nature "*Petit Monde*" (*Small World*) de ces réseaux, les caractérise par une faible longueur moyenne de chemin (entre deux nœuds quelconques) et un haut *coefficient d'agrégation* (*clustering*).

Ces deux propriétés ont une importance capitale pour le développement de systèmes ayant comme environnement d'évolution ce type de réseaux (Internet, Web, réseau de concepts, etc.). En effet, le caractère auto-organisationnel de ces réseaux mis en œuvre par leurs usages, nécessite le développement de systèmes permettant d'intégrer cette caractéristique dans leur propre fonctionnement et dans leur déploiement. Ce qui d'une part, justifie l'approche que j'ai adoptée et d'autre part, ouvre des pistes intéressantes à exploiter dans ce cadre, comme nous le verrons dans la conclusion de ce mémoire.

3.4 Stigmergie et stratégie de corrélation des comportements et des flux

3.4.1 Mise en œuvre de la stigmergie

La mise en œuvre de la stigmergie nécessite de disposer :

- d'une structure spatiale, matérialisée dans l'environnement, pour le codage des informations utiles y compris les informations de contrôle. Cette structure sert non seulement au codage des données du problème considéré, mais aussi aux résultats intermédiaires permettant d'agir directement ou indirectement sur les comportements ;
- d'un ensemble de mécanismes de méta-contrôle permettant de gérer les informations de contrôle elles-mêmes, comme la rétroaction (positive ou négative), la persistance d'une information de contrôle, sa portée, sa diffusion, etc. ;

Les mécanismes permettent de mettre en œuvre des interactions non linéaires entre les agents du système, ou entre les agents et leur environnement. Ils permettent ainsi la "cristallisation" des informations ou des comportements utiles pour l'évolution du système. Cette cristallisation prend la forme d'agrégats émergents, qui s'inscrivent dans l'environnement grâce à sa matérialisation physique. Ils deviennent perceptible à un observateur grâce à la représentation spatiale. Ces agrégats, signe d'un premier niveau d'auto-organisation, vont à leur tour, participer à la dynamique du système, via le même type de mécanismes pour faire émerger d'autres niveaux d'auto-organisation.

3.4.2 Stratégie de corrélation : équilibre entre exploration et exploitation

La mise en œuvre des mécanismes permettant la stigmergie, et l'émergence de l'organisation du système, au cours de son évolution dans un environnement complexe, dynamique

et incertain, nécessite l'utilisation d'une stratégie globale. La stratégie équilibrant, l'exploration et l'exploitation préconisée par Holland [53] est celle que j'adopte dans ce cadre. En effet, l'exploration aléatoire permet de diversifier la recherche dans l'environnement pour découvrir de nouvelles pistes et l'exploitation permet de renforcer de façon auto-catalytique les pistes prometteuses découvertes (i.e. plus une piste est prometteuse, plus elle est exploitée).

3.4.3 Adéquation aux réseaux "Scale-free" et "Small-world"

La topologie "Scale-free" des réseaux comme l'Internet et le Web, peut être vue comme le fruit de la combinaison de la stratégie d'équilibrage entre l'exploration et l'exploitation, et de la stigmergie. Ces réseaux représentent des environnements physiques, partagés par des agents humains. Par leurs usages, ces agents laissent des traces dans cet environnement, comme par exemple les liens entre documents du Web. Certaines de ces traces sont agrégées par l'usage, donnant lieu aux nœuds fortement connectés (hubs). Ces agrégats sont renforcés de façon auto-catalytique (plus un nœud est connecté plus il aura tendance à l'être dans l'avenir). Ceci correspond au mécanisme d'exploitation. Par ailleurs, les usages définissent aussi un nombre important de nœuds, faiblement connectés, traduisant des traces non corrélées, mais qui peuvent le devenir plus tard, avec l'évolution des usages. Ceci correspond au mécanisme d'exploration.

Développer donc des systèmes d'exploitation ou de contrôle de ces réseaux, sur la base de la combinaison de la stigmergie à la stratégie d'équilibre entre l'exploration et l'exploitation, semble pertinent. En effet, l'exploration aléatoire permet d'atteindre les nœuds fortement connectés (les hubs) relativement rapidement grâce à la propriété "Small World". Du fait de leur forte connectivité, ces nœuds agissent comme des lieux de concentration de l'information de contrôle et aussi comme moyen de leur large diffusion, permettant ainsi au processus d'exploitation de prendre place. Ces mécanismes permettent de plaquer sur le réseau, une structure de contrôle concentrant l'information de contrôle là où il faut. Cette structure a aussi la capacité de s'adapter à l'évolution de la structure du réseau.

3.4.4 Illustration par le comportement de fourragement des insectes sociaux

Les insectes sociaux utilisent la combinaison d'une communication stigmergique à la stratégie équilibrant l'exploration et l'exploitation. En effet, lors du comportement de fourragement (collecte de nourriture) par exemple, les fourmis communiquent par stigmergie via une substance chimique appelée *phéromone*. Quand les fourmis quittent leur nid, à la recherche de la nourriture, elles explorent aléatoirement leur environnement. À la découverte d'une source de nourriture, elles reviennent au nid avec leur récolte, en traçant le chemin entre la source de nourriture et le nid grâce à la *phéromone*. Ces traces incitent d'autres fourmis, lors de leur phase d'exploration, à les suivre, leur permettant d'une part,

d'atteindre directement les sources de nourriture trouvées et d'autre part, de renforcer ces traces pour des recherches futures. Le mécanisme d'évaporation de la *phéromone*, permet de faire disparaître les chemins non renforcés.

On voit à travers cette description, l'usage de la stigmergie et l'équilibre entre l'exploration (recherche aléatoire) et l'exploitation (renforcement des traces). Ceci se retrouve dans d'autres comportements des insectes sociaux [13] tels que le tri collectif, l'allocation de tâches, etc.

3.4.5 Exploitation de la métaphore des insectes sociaux

Au delà de la métaphore, l'inspiration des comportements des insectes sociaux fournit un outil puissant, pour la mise en œuvre de ces mécanismes dans le développement de systèmes et applications informatiques. Cette métaphore a été exploitée avec succès dans un grand nombre de travaux dans différents domaines [13] (cf. Chapitre 2, sous-section 2.3.1). Le succès de l'utilisation de cette métaphore dans le domaine des réseaux complexes comme l'Internet, les réseaux de télécommunications ou le Web, est dû, de mon point de vue, à la nature Scale free de ces réseaux et l'adéquation de la combinaison de la stigmergie et la stratégie d'équilibre entre exploration et exploitation à ce type de topologie. Nous avons adopté, cette métaphore dans le cadre du projet ECoMAS (cf. chapitre 4). Pour ce faire, nous avons défini les éléments suivants pour le codage de ces mécanismes :

- le codage de la structure spatiale de contrôle sous forme d'une *phéromone digitale*. Cette structure contient les champs suivants :
 - un *label* : qui permet d'identifier la nature de l'information ;
 - un *intensité* : qui exprime le degré de pertinence d'une information ;
 - un *taux de diffusion* : qui exprime la portée d'une information, qui se traduit concrètement sur le réseau par une longueur de chemin ;
 - un *taux d'évaporation* : qui exprime le taux de persistance d'une information. Plus une information est persistante, moins elle est amenée à disparaître facilement. Son taux d'évaporation est donc faible.
- la gestion de l'information phéromonale, en utilisant les mécanismes suivants :
 - la construction du champs de gradient : un champs de gradient est une structure qui permet de transcrire l'effet de la dynamique du système sur l'information partagée dans un contexte collectif. Un champs de gradient de forte intensité exprime la cristallisation d'une information au sein d'un collectif. Sur un réseau, ce champs se construit par un algorithme d'inondation spatialement limité (selon le taux de diffusion).
 - la rétroaction positive ou négative : ce mécanisme permet le renforcement ou au contraire l'inhibition de l'exploitation de l'information de contrôle. Il est mis en œuvre à l'aide des champs : *intensité*, via les effets des actions des agents sur l'environnement.

- l'évaporation : ce mécanisme permet de traduire "l'action" de l'environnement sur les effets des actions des agents sur l'environnement. Il permet d'atténuer la persistance de ces effets, jusqu'à leur disparition, s'ils ne sont pas renforcés par les actions des agents.

3.5 Conclusion

Le cadre ainsi défini, est utilisé comme support méthodologique, dans l'ensemble des projets de recherche que j'ai développés. Les concepts sur lesquels il se base, sont assez génériques pour être utilisables dans des applications de natures différentes.

Dans le projet ECoMAS (cf. Chapitre 4), l'environnement des applications est un réseau complexe de ressources physiques comme l'Internet, le Web ou un réseau de machines de production. Les agents sont des agents logiciels, dont le rôle est d'effectuer des tâches sur le réseau complexe de ressources considéré, en collaboration avec les autres agents. Il est alors naturel, de concevoir les systèmes informatiques à développer comme des écosystèmes artificiels, habités par des créatures artificielles (agents) en déployant les mécanismes que j'ai décrit ci-dessus. L'inspiration des systèmes naturels est aussi induite par cette représentation.

Dans le cadre du projet CESaR (cf. Chapitre 5), l'objectif est de permettre la réutilisation de l'expérience au sein d'un collectif, composé d'agents humains et logiciels, engagés dans la réalisation d'une tâche collective, médiée par un environnement informatique logiciel. Nous abordons alors, une problématique liée à la cognition située et l'émergence du sens au sein d'un collectif. Afin de développer un écosystème selon le cadre défini, et sachant que les agents de l'écosystème peuvent être des agents humains ou logiciels, l'environnement physique sera matérialisé par l'ensemble des ressources de l'environnement informatique, mobilisés par le collectif durant son activité. Je fais ce choix, afin de permettre l'inscription des traces d'actions ou d'interactions dans cet environnement. Nous constatons alors que l'environnement est aussi représenté par un réseau complexe de ressources.

Chapitre 4

Ecosystèmes Informatiques : le projet ECoMAS

Le projet ECoMAS (Emergent Computing with Multi-Agents Systems) s'intéresse à la mise en œuvre de systèmes informatiques, déployant une approche émergentiste, auto-organisationnelle, permettant au système de maintenir sa viabilité face aux perturbations de son environnement.

Nous nous intéressons dans ce projet à l'environnement physique du système (Internet, Web, réseau de ressources, etc.). Cet environnement est complexe, distribué et ouvert. Il est donc sujet à des perturbations imprévisibles *a priori*. Nous adoptons dans ce projet une approche comportementale inspirée des systèmes naturels tels que les sociétés d'insectes, les modèles proie-prédateurs, etc.

En effet, les systèmes naturels sont caractérisés par leur grande robustesse et leur grande capacité d'adaptation aux environnements fortement perturbés. Ceci explique, le grand intérêt porté par la communauté des chercheurs à ces systèmes.

4.1 Motivations pour ces recherches

Ma motivation première derrière le développement de systèmes naturo-inspirés, n'est pas d'étudier les systèmes naturels dont nous utilisons la métaphore, ni de les reproduire à l'identique dans un environnement informatique. Je pense qu'il faut éviter de tomber dans le piège de la démarche mimétique. Nous utilisons la métaphore de systèmes naturels, pour développer des artefacts permettant la mise en œuvre de mécanismes sous-jacents comme la stigmergie, l'auto-organisation, etc.

Nos travaux ont pour objectif de fournir d'une part, une preuve de concept en faveur de l'adéquation de ce type d'outils à la nature des applications que nous avons étudiées, et d'autre part, apporter une contribution à la mise en place d'une méthodologie pour l'ingénierie d'applications auto-organisantes.

Afin de répondre à ces objectifs, j'ai considéré différents domaines d'étude : les réseaux

informatiques (ECoNet), les réseaux d'informations distribuée comme le Web (ECoWeb) [52], et les réseaux logistiques de production (ECoLog)¹⁸.

4.2 Études dans le cadre du réseau Internet : ECoNet

Nous avons étudié dans ce contexte deux applications :

- l'équilibrage dynamique multi-critères sur un réseau de machines. Cette problématique concerne la recherche dynamique d'une répartition spatiale des processus sur l'espace des machines, de manière à satisfaire un certain nombre de critères évoluant temporellement. Le système doit en permanence s'adapter aux changements de son environnement et retrouver une configuration stable dans laquelle les critères spécifiés sont satisfaits au mieux ;
- la réponse distribuée et réactive à la détection d'une intrusion dans un réseau informatique de machines (Internet). La problématique consiste à la prise en compte réactive et distribuée d'une alerte lancée sur le réseau, lors d'une détection d'intrusion.

Nous décrivons ci-dessous chacune de ses applications en les situant dans l'état des travaux dans leurs domaines respectifs.

4.2.1 l'équilibrage dynamique multi-critères sur un réseau ouvert

Un réseau de machines est un système complexe par excellence. Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour permettre un fonctionnement optimal ou même acceptable. Les applications qui s'exécutent sur un réseau dépendent des contraintes environnementales auxquelles il est sujet. Ces contraintes peuvent être de plusieurs sortes :

- les contraintes de ressources telles que : le nombre de machines, leurs charges, la bande passante, etc. ;
- les contraintes liées aux exigences des applications selon leur nature *computationnelle* ou conceptuelles telles que : la consommation en temps de calcul ou en communications, l'interdépendance des applications, etc. ;
- Les contraintes liées aux priorités des applications, comme les applications de surveillance et de contrôle du réseau, etc.

Ces contraintes sont généralement interdépendantes et leur prise en compte en même temps peut vite devenir très complexe. Le problème qui se pose est alors :

Comment permettre à des applications distribuées s'exécutant sur un réseau de machines, de s'auto-organiser de telle façon à exploiter aux mieux les ressources de calcul

¹⁸Ce projet a démarré en mars 2003 lors d'un travail de DEA. Il se poursuit depuis septembre 2003, dans le cadre d'une thèse de doctorat sous contrat CIFRE

disponibles, tout en tenant compte des contraintes qui leurs sont imposées ?

4.2.1.1 Travaux existants

Beaucoup de travaux se sont intéressés dans le cadre de réseaux de machines de grande taille, au problème de l'équilibrage dynamique de charge, de la gestion de la congestion ou du routage dynamique. Les travaux existants ont abordé le problème de l'équilibrage de charge, comme un problème isolé, considéré indépendamment des autres contraintes. Parmi les approches à base d'agents, ce problème a souvent été abordé sous l'angle de l'utilisation des agents comme un moyen de mise en œuvre d'algorithmes distribués pour l'équilibrage de charge en utilisant des métaphores diverses : La métaphore de marché [7, 19], la métaphore des insectes sociaux [88, 14] et d'autres techniques de distribution offertes par la technologie des agents mobiles (cf. [49] pour une revue de ces travaux).

4.2.1.2 Contribution

Contrairement aux approches citées, qui proposent des solutions *ad hoc*, nous avons abordé le problème de façon holistique. Nous nous sommes intéressés au problème de l'équilibrage dynamique de charge comme un critère à prendre en compte avec d'autres critères liés aux applications qui sont à l'origine du déséquilibre de la charge. Il s'agit alors, de considérer le système (application + ressources) comme un système complexe adaptatif qui doit trouver une organisation à travers une répartition spatiale, afin qu'il puisse s'exécuter de façon acceptable. De récents travaux dans le domaine des grilles de calcul (*Grid Computing*) [72] abordent aussi cette problématique sous cet angle.

illustration de notre problématique Soit un ensemble d'applications s'exécutant sur un réseau de machines, en satisfaisant dynamiquement les contraintes suivantes :

- l'équilibrage de la charge moyenne des machines ;
- la minimisation de la distance entre les processus des applications communiquant beaucoup entre elles ;
- la proximité géographique (regroupement sur une seule machine ou un ensemble de machines voisines) des processus appartenant à une même application afin de leur permettre de partager des données ou des ressources de façon optimale ;
- l'exclusion mutuelle entre les processus nécessitant l'accès aux mêmes ressources.

Pour solutionner ce problème, le système doit aboutir à une répartition des processus des applications définies, en agrégats (*clusters*). Chaque agrégat représente une application et occupe un ensemble de machines connexes, afin de limiter les coûts de communications et de transfert de données. Les agrégats correspondants aux applications qui communiquent fortement les unes avec les autres, se regroupent à nouveau en agrégats à une autre échelle d'observation, afin de réduire le coût des communications. En revanche, les agrégats re-

présentant les applications mutuellement exclusives, se retrouvent à occuper, des régions éloignées les unes des autres, dans l'espace des machines.

Modèle du système proposé Nous modélisons le système comme plusieurs populations d'agents mobiles. Nous distinguons les populations liées aux applications devant satisfaire les critères de répartition, de la population d'agents permettant la gestion de l'environnement (agents systèmes).

Ce système est alors caractérisé par :

- l'utilisation d'une structure multi-phéromonale pour coder les contraintes environnementales du réseau. Chaque contrainte est codée par un type de phéromone.
- l'utilisation d'une population d'agents génériques (agents systèmes) responsables de la gestion des phéromones : diffusion, construction du gradient, évaporation, etc. ;
- l'utilisation d'un mécanisme d'étiquetage (*tagging*), associant à chaque population d'agents (en dehors des agents système) une sensibilité à une ou plusieurs phéromones. Dans ce dernier cas, une phéromone de synthèse, selon une fonction spécifiée, est générée.

La population d'agents s'auto-organise alors en agrégats émergents, satisfaisant dynamiquement les contraintes environnementales.

Illustration graphique de quelques résultats obtenus Nous donnons ci-dessous quelques illustrations graphiques extraites de [36].

Nous avons utilisé des couleurs pour représenter les différentes étiquettes associées aux applications devant satisfaire les contraintes imposées. Une même couleur (*jaune*, *bleue* ou *rouge*) identifie les processus d'une même application. Les applications étiquetées en *rouge* et *vert* communiquent beaucoup entre elles et doivent donc occuper des régions voisines sur l'environnement des machines. Les processus étiquetés en *jaune*, accèdent aux mêmes ressources que les deux autres types d'applications (*rouge* et *vert*). Elles doivent donc s'exclurent mutuellement.

La figure 4.1 montre l'équilibrage de la charge indépendamment des critères de regroupement.

La figure 4.2 montre la répartition des processus des différentes applications, de façon à satisfaire l'équilibrage de la charge moyenne sur les différentes machines. On remarque que la charge moyenne, des agrégats rouge et vert, est légèrement supérieure à celle de l'agrégat jaune.

La figure 4.3 montre la résistance aux perturbations causées par une surcharge extérieure du réseau (zone A). À l'instant t_2 , nous avons simulé la surcharge générée par la création de nouveaux processus (processus fils) au sein même de certaines applications. On remarque que la charge moyenne globale se stabilise au minimum après un certain temps.

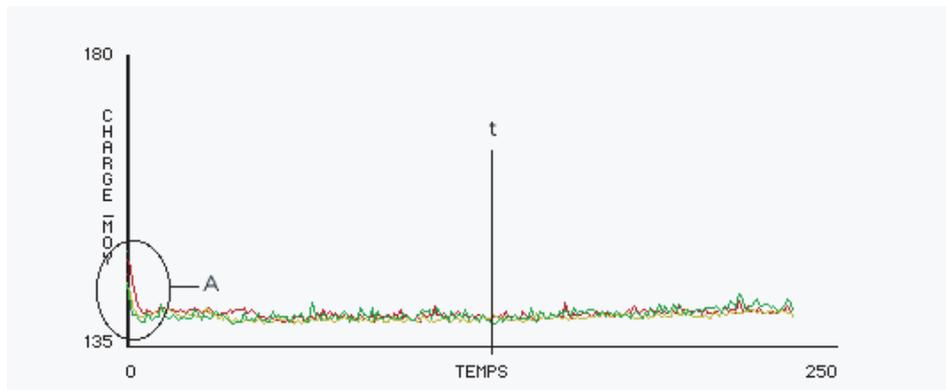


FIG. 4.1 – Charge moyenne par couleur en équilibre de charge basique.

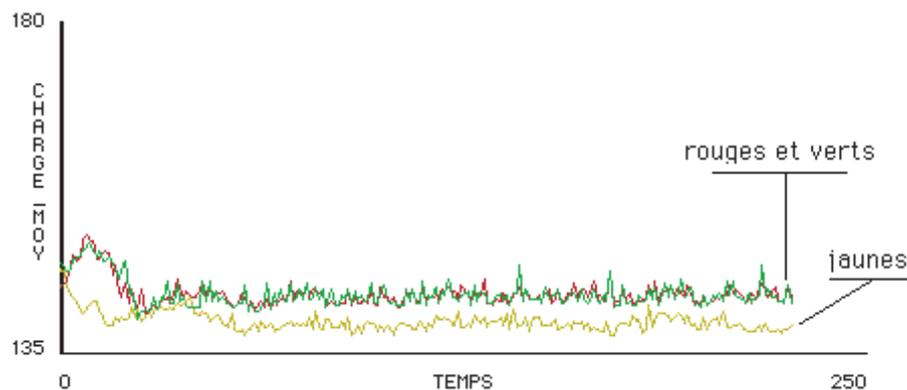


FIG. 4.2 – Effet du regroupement par couleur.

4.2.1.3 Conclusion

Nous avons pu constater dans les différents tests que les paramètres de pondération pris en compte lors de la construction du champ phéromonal de synthèse permettent d'induire chez les processus des comportements migratoires que l'on peut contrôler avec précision. Ces résultats exhibent plusieurs caractéristiques de notre modèle :

- la structure multi-phéromonale permet l'agrégation des différentes informations de contrôle, permettant la prise de décision ;
- La robustesse de cette approche réactive et la très bonne tolérance aux aléas de son environnement dynamique (surcharge, pannes, etc.) ;
- La possibilité et l'avantage de faire varier les politiques de migration en cours de fonctionnement pour répondre à des impératifs évoluant dans le temps.

L'originalité de l'approche présentée réside dans :

- l'expression naturelle du problème d'affectation dynamique multi-critères des processus en terme d'interactions localisées multiples, aboutissant à une répartition globale satisfaisante des processus ;

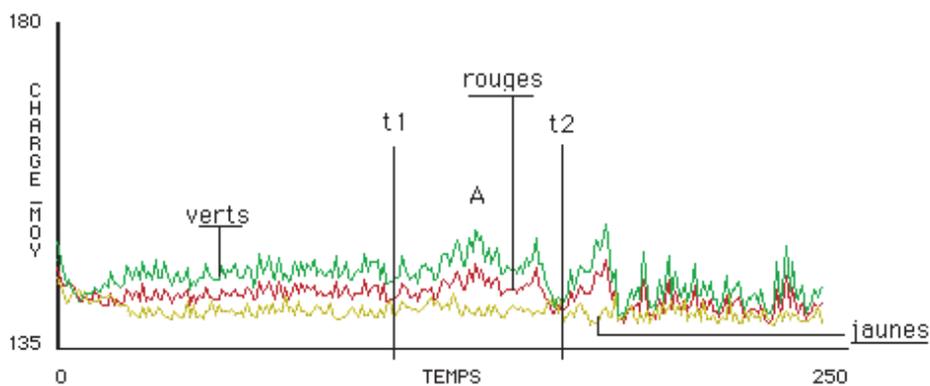


FIG. 4.3 – Résistance à la surcharge.

- L’approche des systèmes complexes adaptatifs, qui permet de construire progressivement la solution au problème, sous forme de schémas (début de solutions) qui se renforcent dans l’environnement par agrégation.

Le modèle proposé ainsi que les résultats obtenus par simulation sont décrits dans [37, 41]. Un système générique [38] mettant en œuvre l’approche a été implanté et a permis de valider cette approche sur un réseau local [39]. Ce système utilise des serveurs de phéromones et différentes populations d’agents, implantés par des agents mobiles.

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Serge Fenet [36], soutenue en 2001.

4.2.2 Détection d’intrusion et réponse distribuées

La progression et l’évolution à grande échelle des réseaux informatiques posent plus que jamais le problème de leur sécurité. L’objectif principal d’un système informatique sécurisé est de se conformer aux spécifications de la politique de sécurité établie pour le système. Celle-ci consiste en un ensemble de règles définissant les droits, autorisations et obligations d’accès aux données et ressources du système par des agents (humains ou logiciels). L’intrusion à un système informatique consiste en un ensemble d’actions permettant de violer des règles établies dans la politique de sécurité telle que [77] :

- la règle de *confidentialité* qui peut être violée si un agent intrus accède illégalement à une information (comme le mot de passe par exemple) ;
- la règle d’*intégrité* des données, qui peut être violée si l’intrus peut créer, modifier ou détruire une donnée ;
- la règle d’*accessibilité*, qui peut être violée, si une ressource ou un service du système devient inaccessible à un utilisateur (déni de service) suite à une intrusion.

4.2.2.1 Problématiques et état de l'art du domaine

Le champ des recherches dans le domaine de la détection d'intrusion est très actif. Les premiers travaux remontent au début des années 80 avec la fameuse publication de J. Anderson [5], puis les travaux pionniers de Dorothy Denning [27] qui ont été les premiers à proposer un modèle réellement utilisable. Très rapidement, les premières implémentations voient le jour [10, 90], toutes basées sur l'utilisation de systèmes experts. Ces premiers prototypes vont influencer profondément les recherches actuelles. En effet, beaucoup d'approches modernes [73] proposent encore de tels modèles centralisés, malgré une évidente fragilité et une forte inadéquation avec les exigences des systèmes distribués actuels. Malgré ces nombreux efforts, la technologie des systèmes de détection d'intrusion reste encore immature et inefficace actuellement. Ses faiblesses tiennent en partie à :

- la difficulté d'identification des attaques : de nouvelles formes d'attaques émergent continuellement, avec l'évolution des systèmes informatiques. Actuellement il existe deux approches de détection d'intrusion [73, 36] : la première se base sur la détection d'anomalies dans le comportement des usagers (*Anomaly Based Detection*). Elle se base sur le calcul d'une déviation entre un nouveau comportement et un ensemble de comportements considérés comme normaux, collectés lors d'un fonctionnement normal du système ; la seconde se base sur l'analyse de signatures d'attaques (*Misuse Based Detection*). Le principe de cette détection, consiste à analyser un fichier d'audit pour rechercher des formes d'attaques similaires à des signatures d'attaques répertoriées dans une base de données ;
- la croissance sans cesse grandissante des réseaux : qui rendent les architectures classiques monolithiques complètement impraticables [56]. La distribution est devenue une nécessité [21]. Récemment, les travaux dans ce domaine se sont intéressés à l'exploitation de la technologie des agents mobiles pour le développement de systèmes de détection et de réponse hautement distribués [8, 81]. Une revue de ces travaux est fournie dans [57].
- la croissance de la complexité des attaques : l'évolution du niveau de connaissances des attaquants et la multiplication des points d'attaques, nécessitent de mettre en œuvre des stratégies de détection plus élaborées. On a vu émerger dernièrement des travaux s'intéressant à combiner différents niveaux d'attaques [50] ou à établir des corrélations entre différents types d'attaque [22, 23, 74] . Ceci afin d'affiner le processus de détection et d'éviter les fausses alertes (*false positives*), tout en ne laissant pas passer les vraies attaques (*false negatives*).

4.2.2.2 Contributions

Afin d'appréhender les faiblesses évoquées ci-dessus, notre contribution consiste en :

La proposition d'un Système Distribué de Détection d'Intrusion et de Réponse (SD-

DIR) fondé sur une approche naturo-inspirée pour la détection d'intrusion et la réponse distribuée

Le SDDIR proposé est composé d'un système multi-agents situés et mobiles combinant la métaphore des systèmes immunitaires pour la détection et la métaphore de fourragement des insectes sociaux pour la réponse. Ce système utilise la notion d'intelligence en essaim (*swarm intelligence*), tant au niveau des phases de détection (système immunitaire) et de réponse (insecte sociaux) qu'au niveau de leur combinaison.

Les objectifs que nous avons poursuivis par une telle proposition sont :

- l'efficacité d'un système de détection. Notre but étant d'exploiter autant l'intérêt de la détection multi-points (équilibre de la charge et de la latence réseau, l'adaptation à des environnements hétérogènes, la tolérance aux fautes) que les caractéristiques offertes par la métaphore des systèmes immunitaires (apprentissage adaptatif, autodéfense, déviation des comportements standards, et.) ;
- la réactivité d'un système de réponse collectif. Les comportements de réponse sont implantés en exploitant les gradients d'information dynamiques mappés sur le réseau. Chaque agent de réponse perçoit seulement ces gradients construits pendant le processus de détection ;
- la robustesse et la furtivité d'un système basé sur la technologie des agents mobiles. Les agents de détection et de réponse dont les comportements incluent une part d'aléatoire, réduisant la probabilité d'interaction avec du code potentiellement hostile.

Notre contribution à ce système a concerné principalement la partie portant sur la mise en œuvre de l'alerte et sa prise en compte par le système de réponse. Elle se décline en :

- la combinaison de la détection d'intrusion et de la réponse dans un même système distribué et réactif ;
- un mécanisme de traçage et de la source d'une attaque, fondé sur la stigmergie et la réification de l'alerte par une structure contenant les informations nécessaires à son contrôle ;
- un mécanisme de régulation de la réaction des agents de réponse à la prise en compte d'une alerte ;

La combinaison de la détection d'intrusion et de la réponse Cette idée a été émise pour la première fois dans le domaine de la détection d'intrusion, dans le cadre de la thèse de Serge Fenet [36]. Nous avons proposé l'usage de la stigmergie via une structure phéromonale pour la diffusion d'une alerte et sa prise en compte par les agents de réponse. Les agents de détection et de réponse, communiquent donc par stigmergie via cette structure phéromonale.

Le système générique à base de serveurs de phéromones [38] utilisé pour le problème

d'équilibrage multi-critères, a été aussi utilisé dans ce cadre. La sédentarité des serveurs de phéromones constitue une faiblesse dans le cadre de la sécurité. En effet, les attaques dirigées sur ces serveurs, peut faire s'écrouler tout le système de contrôle.

Traçage de la source d'une attaque Afin de répondre à la faiblesse de la sédentarité des serveurs de phéromones, nous avons proposé [46]¹⁹ un mécanisme de traçage de la source de l'attaque. Ce mécanisme est fondé sur la réification de l'alerte par une structure phéromonale contenant les informations suivantes :

- l'identifiant *IdA* de l'agent détecteur (AD) ayant détecté l'activité suspecte et qui a construit la phéromone ;
- l'indice de suspicion de l'alerte *SI*, qui correspond à la déviation calculée par le système de détection entre une activité normale et l'activité considérée comme suspecte.
- le nombre de saut *Hop*, qui correspond à la distance de diffusion de l'alerte, à partir du nœud source ;
- gradient phéromonal *Gd* qui correspond à la valeur du gradient de la phéromone. Cette information est utile pour les agents de réponse ;
- la date t_0 , qui correspond à la date de détection de l'attaque sur le nœud initial (date de construction de la phéromone) ;
- la date t_i , qui correspond à la date de dépôt de la phéromone sur le nœud intermédiaire i durant la propagation de la phéromone.

Pour la suite de cette description, nous considérons i comme le numéro du i^{eme} nœud atteint par la phéromone au cours de sa propagation, i variant de 0 (premier nœud) à n (dernier nœud).

Une population d'agents de propagation de la phéromone diffusent la phéromone construite par les agents de détection (AD). Ils se déplacent aléatoirement à partir du nœud où la détection a eu lieu, le long d'un chemin de longueur *Hop* spécifié dans la phéromone digitale. La phéromone déposée à un nœud i , contient la date t_i , de son dépôt qui sert au calcul du temps au bout duquel elle s'évapore.

Le processus d'évaporation commence au dernier nœud où a été déposée la phéromone. Ceci afin de maintenir le lien entre la source et un nœud intermédiaire i , au cours du processus d'évaporation. Pour ce faire, on définit un indice Δ , correspondant à la durée de vie de la phéromone sur le dernier nœud n . Après l'écoulement de la durée Δ , la phéromone disparaît du dernier nœud, puis successivement des nœuds intermédiaires, après une durée calculée comme la somme de trois paramètres :

- la durée de la diffusion de la phéromone entre le nœud i et le dernier nœud n , notée *Diff* ;
- l'indice d'évaporation Δ ;
- la durée de l'évaporation entre le dernier nœud n et le nœud i , notée *Disp*. Comme nous considérons que la phéromone s'évapore le long du chemin inverse à la même

¹⁹Ce travail a été réalisé lors d'une collaboration avec Noria Foukia de l'université de Genève

vitesse à laquelle elle a été diffusée, $Disp$ est égale à $Dif f$.

Le temps $Tevap(i)$ d'évaporation de la phéromone à un nœud i est alors donné par :

$$Tevap(i) = t_i + 2 \times \frac{n-i}{i} \times (t_i - t_0) + \Delta$$

Les détails de calcul menant à cette formule sont donnés dans [46].

Régulation de la réaction des agents de réponse Lorsqu'un agent de réponse AR, prend en compte une alerte provenant d'une source donnée, il faut éviter que tous les agents qui perçoivent l'alerte, remontent vers la source, pour y répondre. Par ailleurs, pour des raisons de robustesse et de tolérance aux fautes, il faut éviter que la réponse à une alerte, ne soit prise en compte que par un agent de réponse unique. Pour ce faire, nous introduisons un mécanisme d'atténuation de la persistance d'une alerte. Cette atténuation intervient comme une rétroaction négative en accélérant le processus d'évaporation. Pour ce faire, nous avons introduit un mécanisme d'inhibition de la phéromone à chaque nœud visité par un agent de réponse AR.

Limitation du nombre d'agents de réponse Un premier agent de réponse AR_1 , arrivant sur un nœud i doit agir entre le temps t_i et le temps $Tevap(i)$. On appelle $t_{A1}(i)$ la date d'intervention de cet agent. La durée d'intervention de cet agent est égale à :

$$Tevap(i) - t_i = 2 \times \frac{n-i}{i} \times (t_i - t_0) + \Delta$$

Donc, après la date $t_{A1}(i)$, le temps restant avant que la phéromone ne s'évapore complètement au nœud i , est :

$$2 \times \frac{n-i}{i} \times (t_i - t_0) + \Delta - t_{A1}(i)$$

Supposons qu'un deuxième agent AR_2 , atteint le nœud i durant cette période. Comme le premier agent AR_1 a déjà commencé à tracer le chemin vers la source de l'attaque, l'inhibition agit en diminuant le temps restant pour l'AR suivant AR_2 , d'un certain taux (pourcentage) noté τ ($0 < \tau < 1$), que nous appellerons *indice d'inhibition*.

Le temps restant pour l'intervention du deuxième agent AR_2 est alors égal à :

$$\tau \times (2 \times \frac{n-i}{i} \times (t_i - t_0) + \Delta - t_{A1}(i))$$

l'agent AR_2 doit alors atteindre le nœud i à la date $t_{A2}(i)$ tel que :

$$t_{A1}(i) \leq t_{A2}(i) \leq t_{A1}(i) + \tau \times (2 \times \frac{n-i}{i} \times (t_i - t_0) + \Delta - t_{A1}(i))$$

Ce processus d'inhibition est répété pour tout agent de réponse AR détectant la même phéromone au même nœud i , jusqu'à la disparition complète de la phéromone. Le mécanisme d'évaporation classique reste actif en dehors du mécanisme d'inhibition.

Ce travail a été réalisé en partie au cours de la thèse de Serge Fenet [40], puis depuis 2001 dans le cadre d'une collaboration avec Noria Foukia, de l'université de Genève.

4.2.2.3 Conclusion

Le système proposé a été testé d'abord, par des simulations puis, par l'implantation d'une plate-forme. Les tests menés sur la plate-forme implantée par N. Foukia à l'université de Genève confirme les résultats prometteurs obtenus par simulation. Le détail de ces tests est résultats sont fournis dans les publications [46, 45].

L'efficacité d'un tel système est conditionnée par l'ajustement des nombreux paramètres mis en jeu. Certains de ces paramètres (comme les paramètres Δ , *Diff* utilisés lors du processus d'évaporation ou l'indice d'inhibition τ , etc.) ont été ajustés par simulation [46]. D'autres paramètres, liés à la taille du réseau, comme la distance de diffusion minimale (*Hop*) peuvent être ajustés en profitant des études en cours sur la nature "Scale Free" et la propriété "Small World" de la topologie d'Internet. Ces études seront aussi profitables pour mettre en œuvre des stratégies plus efficaces pour le déplacement des agents lors de la diffusion de la phéromone. Par ailleurs, l'utilisation de différentes populations d'agents en détection et en réponse, ainsi que l'usage d'une structure multi-phéromonale, permettent de mettre en œuvre des approches collectives de détection d'intrusion. La structure multi-phéromonale servirait alors comme répertoire où chaque phéromone représenterait une alerte potentielle. Les différentes alertes représentées dans une même structure phéromonale, sont ensuite corrélées entre elles pour fournir une alerte pertinente. Nous pouvons aussi utiliser le mécanisme d'agrégation entre agents, pour utiliser plusieurs niveaux d'abstraction dans la détection d'une intrusion. Ces mêmes mécanismes peuvent être utilisés pour la réponse. L'activité de surveillance d'un réseau contre les intrusions, nécessitent des outils très fortement réactifs et hautement distribués. Les approches auto-organisationnelles selon la perspective des systèmes complexes semblent fournir les mécanismes adéquats pour cela [44]. Ces pistes sont en cours d'étude.

4.3 Études dans le cadre du réseau Web : ECoWeb

Comme l'Internet, le Web est un réseau complexe dont l'exploitation efficace pose un réel problème. Plusieurs domaines de recherches ont émergé de cette difficulté : le Web-mining, la recherche et l'extraction d'information sur le Web, le Web sémantique, etc. Je pense qu'une approche abordant le Web comme un système complexe adaptatif permettrait d'appréhender la difficulté de son exploitation efficace.

Ma motivation pour cette problématique, vient du fait que je pense que le Web, comme l'Internet, sont des systèmes qui, à travers leurs évolutions et leurs usages, présentent un comportement que l'on pourrait qualifier d'"autopoïétique". Ceci peut se comprendre de façon intuitive par le fait que les usages façonnent la structure du web et qu'en retour cette topologie, a à son tour, un effet sur ses usages futurs, qui modifient alors la structure de celui-ci, et ainsi de suite. Par ailleurs, le contenu est aussi lié aux usages, autant qu'à

la structure et inversement. De ce fait, un système permettant d'exploiter efficacement le web, doit tenir compte de ces trois caractéristiques (usage, contenu, structure) et de leur dépendances inter-relationnelles.

Nous avons étudié lors un premier travail la faisabilité d'une approche mettant en œuvre la stigmergie selon la métaphore des insectes sociaux, pour l'organisation dynamique des contenus. Nous avons défini un système à base d'agents, combinant le comportement de fourragement et de tri collectif pour organiser dynamiquement le contenu du web, tout en s'auto-organisant par spécialisation des agents, selon la dynamique du web. La simulation de ce système est décrite dans [52]. L'objectif de ce travail était d'étudier d'une part l'exploitation de la notion de multi-phéromones (que nous avons défini dans le cas des applications réseaux), et d'autre part la spécialisation de comportements et la régulation de la population d'agents selon la dynamique de leur environnement (le web simplifié simulé).

Dans les travaux en cours, nous étudions la proposition d'un système pour l'exploitation efficace du Web prenant en compte dynamiquement ses trois caractéristiques (contenu, structure, usage) et en s'appuyant sur une modélisation comme un système complexe adaptatif, selon le cadre que nous avons défini.

Ce travail est mené dans le cadre de la thèse d'Amjad Rattrout, qui a commencé en octobre 2002.

4.4 Autres applications

D'autres sujets d'études ont été abordés dans ce contexte comme :

- Le développement d'approches coopératives pour l'analyse d'images [79][17]. Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'un projet de collaboration avec l'Université de Palerme (PAI Galilée 2003-2005). Dans ce projet nous nous intéressons à la recherche d'images par le contenu sur le web. Pour cela, nous étudions la mise en œuvre de mécanismes d'agrégations dynamiques, via l'usage et le feedback utilisateur, de descripteurs bas niveaux, pour définir des descripteurs de plus haut niveau, intégrant une certaine sémantique.
- L'étude de la reconfiguration dynamique de chaînes logistiques de production dans le cadre de la thèse de doctorat de Frédéric Armetta (Thèse sous contrat CIFRE avec la société OSLO-Lyon) qui a débuté en septembre 2003.

Chapitre 5

Co-construction émergentiste du sens à partir des interactions : le projet CESaR

5.1 Problématique

Nous abordons la problématique de l'émergence du sens dans un collectif d'agents, à partir des interactions selon le point de vue de l'échange et du partage de l'expérience entre agents, en vue de la co-construction d'une expérience collective.

Le collectif que nous définissons est un ensemble d'agents humains et d'agents logiciels, interagissant dans le cadre de la réalisation d'une tâche collective via un environnement informatique logiciel. Dans ce cas, les agents sont souvent hétérogènes sémantiquement. Ils ont, non seulement, des compétences et des expériences différentes, mais aussi des points de vue différents, sur l'objet de la tâche collective. Par exemple, dans le domaine de la conception collaborative d'un produit [48], les agents participants à la tâche de conception, ont des domaines de compétences différents. Une collaboration multi-métiers est alors mise en œuvre. Nous proposons d'organiser le collectif selon les différents rôles assumés par les agents humains lors de la réalisation de la tâche. Un rôle est associé à un domaine sémantique spécifique (un type de métier par exemple) et peut-être assumé lors de la collaboration par un ou plusieurs agents. Les agents ayant le même domaine sémantique (même rôle) sont dits *homogènes*. Les agents ayant des domaines sémantiques différents (rôle différents) sont dits *hétérogènes*.

La question que nous nous posons dans ce contexte est :

Comment assister les agents humains, impliqués dans la collaboration, à réaliser leurs tâches en leur permettant de réutiliser leurs expériences passées ?

Ces expériences sont construites sur la base des interactions de l'agent humain avec le système et avec les autres agents humains du collectif.

L'expérience à laquelle nous nous intéressons est l'expérience concrète, en situation (en contexte de réalisation de la tâche). L'expérience est capturée par les traces d'actions et d'interactions. Nous nous intéressons aux actions et interactions médiées par un système informatique, dont les traces sont matérialisées par une succession d'observations portées sur des entités et des événements. Le contexte de l'expérience est celui de la réalisation de la tâche. Nous considérons différents niveaux d'interactions :

- l'interaction d'un agent humain avec l'environnement de réalisation de la tâche (l'environnement informatique) ;
- l'interaction indirecte entre agents humains médiée par l'environnement informatique. Cette interaction peut avoir lieu entre agents homogènes ou entre agents hétérogènes ;
- l'interaction interne aux composants (agents logiciels) du système informatique, permettant de maintenir son activité.

Afin de répondre à la problématique posée, nous définissons différents types d'expériences :

- l'expérience individuelle d'un agent, acquise à partir de son interaction avec le système lors de la réalisation d'une tâche individuelle, que l'on note E_iI ;
- l'expérience individuelle d'un agent, acquise à partir de son interaction avec les autres agents du collectif, lors de la réalisation d'une tâche collective. Cette expérience est acquise par échange et partage d'expériences entre agents. On la note E_iC ;
- l'expérience collective acquise par le collectif d'agents, qui émerge des interactions du collectif, comme une agrégation des E_iC , que l'on note E_cC . Le collectif est ici réifié à un niveau d'observation plus élevé, comme un nouvel agent pouvant réutiliser cette expérience, ou la mettre à disposition d'un autre collectif.

Au vu du contexte, nous définissons différents collectifs :

- le collectif formé par un agent humain et les agents logiciels du système informatique ;
- le collectif formé par les agents humains et logiciels regroupés au sein d'un rôle (collectif homogène) ;
- le collectif formé par les agents humains et logiciels homogènes et hétérogènes regroupés autour de la tâche collective (collectif hétérogène) ;

À ce niveau de l'analyse, la question posée ci-dessus se décline alors en :

- *Comment modéliser le système informatique intégrant les notions que nous avons définies ?*
- *Comment représenter les différents types d'expériences et quels mécanismes mettre en œuvre pour permettre l'échange, le partage et l'émergence d'expériences ?*
- *Comment gérer l'hétérogénéité sémantique afin de permettre l'interaction au sein des collectifs hétérogènes, en vue de co-construire les expériences collectives ?*

Je présenterai dans la section 5.3 nos contributions ainsi que les pistes de recherche que nous poursuivons pour tenter de répondre à ces questions.

5.2 Concepts en relation avec notre problématique

5.2.1 Paradigme de raisonnement à partir de l'expérience

Le raisonnement à partir de l'expérience est un paradigme qui se situe dans le prolongement du raisonnement à partir de cas (RàPC). Ce dernier est une des méthodes de raisonnement par analogie, inspirée de la psychologie cognitive. Il consiste à réutiliser des expériences passées développées lors de la résolution de problèmes, pour résoudre de nouveaux problèmes identifiés comme similaires [63]. Dans le raisonnement à partir de cas, l'expérience est définie comme un cas structuré, représentant un problème et sa solution. A chaque cas, sont associés des indices permettant de caractériser le problème et sa solution de façon à identifier la situation dans laquelle le cas serait applicable efficacement. Le cycle général du raisonnement à partir de cas, consiste en :

1. l'élaboration d'un cas cible composé du problème posé et d'une solution inconnue, qui sera construite ultérieurement, grâce au cycle de raisonnement à partir de cas ;
2. la remémoration d'un cas source, correspondant à une expérience passée, stockée dans la base de cas. La remémoration se fait sur la base d'un calcul de similarité entre cas ;
3. l'adaptation du cas source pour résoudre le problème cible ;
4. la révision par adaptation du cas cible jusqu'à aboutir à une solution ;
5. la mémorisation dans la base de cas, du nouveau cas (problème, solution) pour une réutilisation future ;

Le paradigme de raisonnement à partir de l'expérience, généralise le RàPC en s'intéressant à la représentation de l'expérience, comme une trace découpée en épisodes. Un épisode est un cas de réutilisation non structuré.

Un modèle générique MUSETTE²⁰ a été proposé par [78]. Ce modèle permet de décrire des traces d'utilisation afin d'en permettre l'exploitation à des fins de réutilisation et de partage de l'expérience. Ce modèle permet de :

- modéliser l'utilisation d'un système informatique et l'expérience d'utilisation comme une trace ;
- découper cette trace en épisodes (ou cas) significatifs à l'aide de modèles de tâches ;
- réutiliser ces épisodes (pour l'assistance utilisateur par exemple).

Nous décrirons ce modèle plus en détail en 5.2.4.

²⁰MUSETTE est un acronyme pour "Modéliser les USages Et les Tâches pour Tracer l'Expérience"

5.2.2 Partage et échange d'expériences dans les systèmes de RàPC

Cette problématique a été abordée dans le domaine du RàPC, sous l'angle de l'apprentissage fédéré à base de RàPC [80]. Dans ce cadre des agents homogènes utilisant le RàPC comme mode de raisonnement, développent des capacités d'apprentissage fédéré, par coopération. La coopération dans ce contexte consiste en l'échange et le partage entre agents de leurs bases de cas respectives. L'échange de cas est basé sur un protocole de négociation à base d'enchères [34]. La décision de retenir les cas échangés selon différents cas de figures est alors décidé suivant un ensemble de stratégies collaboratives [76]. Pour ce faire, les agents s'appuient sur la modélisation de leurs compétences individuelles et des compétences des autres agents, afin d'apprendre quand coopérer et avec qui coopérer lors de la résolution de leurs problèmes [75]. Les auteurs de ces travaux montrent que les agents améliorent leur performance individuelle grâce au mécanisme d'apprentissage mis en œuvre, par l'échange et le partage de leurs expériences individuelles.

Dans ces travaux, l'apprentissage des agents est basé sur l'enrichissement de leurs bases de cas respectives par l'ajout de nouveaux cas, récupérés des autres agents et adaptés à leur contexte d'usage individuel. Les agents se basent aussi sur la modélisation des compétences des autres agents pour améliorer leurs interactions [75]. Ce mécanisme présente deux faiblesses, de mon point de vue :

1. Il ne peut fonctionner sous la forme proposée qu'entre agents homogènes sémantiquement, hypothèse faite par les auteurs ;
2. Il n'y a aucune émergence de sens dans le collectif. Le processus d'apprentissage des agents est basé dans ce cas sur la distribution de l'union des bases de cas, sur l'ensemble des agents. Chaque agent récupère de ces bases, les cas les plus adaptés à sa situation, comme ceux correspondants aux problèmes qu'il ne sait pas résoudre par exemple. C'est un mécanisme distribué d'enrichissement des bases de cas individuelles à partir de l'ensemble des bases disponibles.

5.2.3 Problème de l'hétérogénéité sémantique dans l'interaction entre agents

L'hétérogénéité sémantique (HS) entre agents a été abordée par [93] dans le cas d'agents dialogiques. Les auteurs définissent l'HS comme "... l'hétérogénéité due au phénomène de potentiel de sens .." dans une interaction dialogique. De façon générale, ce problème se produit lors de l'interaction entre des agents qui partagent un même univers, et qui en ont des représentations conceptuelles différentes. La gestion de l'hétérogénéité sémantique, consiste alors à définir une sorte de sens commun à partager par les agents afin de leur permettre d'interagir. Comme le font remarquer les auteurs, cette approche est différente de la gestion de l'hétérogénéité, en créant une homogénéité entre agents, sur la base de la construction d'un schéma fédérateur permettant d'intégrer les schémas hétérogènes.

Afin d'aborder l'HS dans les interactions entre agents, les auteurs définissent l'interaction

comme une succession de requêtes/réponses, représentée comme une séquence finie de pas d'interaction. Ils classent alors les problèmes d'hétérogénéité en deux catégories :

- le Not-Understanding Problem (*NUP*) qui consiste en l'incapacité, à un pas d'interaction i , du receveur de la requête de trouver une interprétation valide. Soit il ne trouve aucune interprétation ou plusieurs interprétations parmi lesquelles il ne peut pas décider. Ce cas est détecté par le receveur de la requête.
- le Misunderstanding Problem (*MUP*) correspond au cas où à un pas d'itération i , un participant (receveur ou émetteur) à l'interaction trouve une interprétation à une requête émise au pas i , valide par rapport à sa représentation locale, et que cette interprétation provoque une anomalie lors d'un pas d'itération j ultérieur ($j > i$). Dans ce cas un *MUP* à un pas i a engendré un *NUP* à un pas j

En utilisant des ontologies locales pour spécifier les représentations conceptuelles des agents, le problème de l'hétérogénéité sémantique se ramène à l'identification des différences et ressemblances de domaines entre les différentes ontologies. Les auteurs identifient différents types d'HS, en se basant sur les sortes de différences entre ontologies. Ils définissent alors :

- l'HS Référentielle : provenant du problème général de la référence (différence de nommage). Ce problème se traduit par l'usage d'un même nom pour désigner des objets différents ou des noms différents pour désigner le même objet ;
- l'HS Syntaxique : provenant de la différence de structure dans les ontologies. C'est un problème de syntaxe qui ne se pose que dans le cas où les ontologies utilisent des formalismes de représentations ayant des syntaxes différentes ;
- l'HS Taxonomique : provenant de la différence de la structuration en hiérarchie des ontologies ;
- l'HS d'Expressivité : provenant de la différence d'expressivité des langages de représentation des ontologies ;

5.2.4 Représenter l'expérience : l'approche MUNETTE

Lors de l'interaction d'un utilisateur avec un système informatique, des changements se produisent dans l'environnement du système (événements, fichiers, etc.). Dans l'approche MUNETTE [78] (cf. figure 5.1), un agent *observateur*, observe ces changements selon un *modèle d'observation* et génère une *trace primitive*, conforme à un *modèle d'utilisation* général. Un *analyseur générique de traces* extrait des *épisodes* de la trace primitive, en accord avec des *signatures expliquées de tâches*. Ces épisodes peuvent être (ré-)utilisés par des *agents assistants* l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche.

Le modèle MUNETTE s'appuie sur les éléments suivants :

- un *modèle d'utilisation* : qui est un ensemble d'objets d'intérêt *OI* observables (les observations). Ces objets d'intérêt significatifs peuvent être à la fois des entités, des événements ou des relations. Les entités caractérisent les objets présents dans

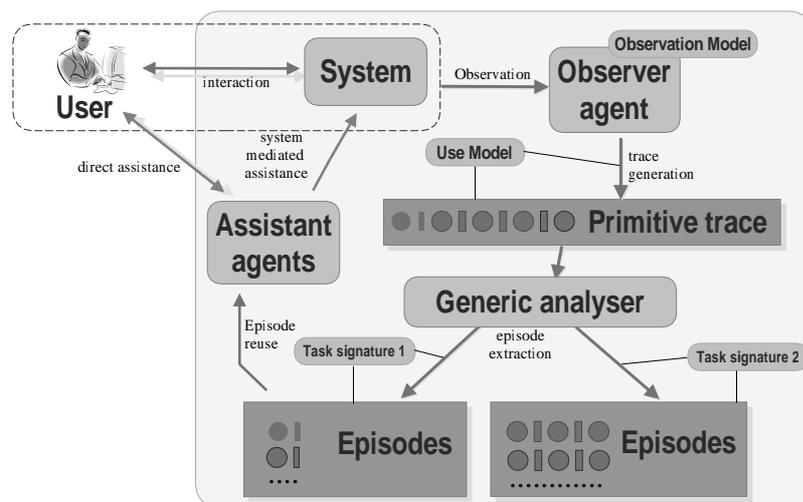


FIG. 5.1 – L’approche MUSETTE

l’environnement d’interaction entre l’utilisateur et le système. Les événements caractérisent les objets qui se produisent lors de l’interaction. Les relations sont binaires et peuvent impliquer autant les entités que les événements ;

- une *trace d’utilisation* : dont la structure ne se limite pas à un flux continu d’entités et d’événements, en relations possibles les uns avec les autres. En effet, les entités sont utilisées pour représenter l’état du système à un instant donné. D’autre part, les événements se produisent dans une période de transition entre deux états. La trace d’utilisation est donc une séquence alternative d’états et de transitions. Notons que les transitions dans MUSETTE, ont principalement un rôle temporel et non causal comme pourrait le laisser entendre la notion de transition entre états ;
- une *signature de tâche expliquée* : qui représente un motif de trace d’utilisation (construit sur la base du modèle d’utilisation) et qui dispose de relations supplémentaires. Ce motif a été identifié comme étant utile pour l’assistance, il peut également faire l’objet d’annotations.
- un *cas d’utilisation ou épisode* : qui représente une partie d’une trace d’utilisation correspondant à une expérience spécifique dans la réalisation d’une tâche spécifique, et qui peut être réutilisée dans une situation similaire. Les épisodes relatifs à une tâche particulière partagent des caractéristiques communes : implication du même type d’entités et d’événements qui se produisent dans un certain ordre, etc. Ces caractéristiques peuvent s’exprimer par 1) un motif dans le graphe représenté par objets d’intérêt *OI* et leurs relations, 2) des contraintes sur les positions relatives des *OIs* dans la trace, 3) des contraintes sur la structure interne des *OIs*. Ceci définit une signature expliquée d’une tâche (EXTASI)²¹. Un épisode n’est pas limité à une instance d’une signature de tâche. Des informations explicatives supplémentaires

²¹EXTASI est un acronyme pour EXplained TAsk Signature

sont ajoutées sous forme d'annotations. L'extraction d'épisodes à partir de la trace primitive, se fait alors sur la base de la vérification d'une certaine signature de tâche expliquée EXTASI.

5.3 Contributions et travaux en cours

Notre contribution à ce domaine se situe dans la modélisation du problème par l'instanciation du cadre défini au chapitre 3. Nous proposons une approche à base de multi-agents situés, qui s'appuie sur l'inscription des traces d'actions et d'interactions des agents (humains et logiciels) dans un environnement. Cet environnement est matérialisé physiquement et représenté spatialement par un réseau d'interconnexions entre les ressources. Ces ressources peuvent être physiques comme les documents ou des abstraites comme les concepts d'une ontologie ou le contenu d'un document par exemple. Nous nous intéressons alors dans cet espace à l'émergence de structures stables comme les signatures de tâches par rapport à la dynamique du système, l'émergence de nouveaux concepts, etc. Ce que nous associerons à une forme d'émergence du sens.

5.3.1 Une modélisation multi-agents du système

5.3.1.1 Les agents

Le système multi-agents que nous proposons (cf. 5.2 pour un schéma fonctionnel du système) est composé d'un ensemble d'agents humains (acteur), et d'agents logiciels. Les agents humains, se répartissent selon les rôles qu'ils doivent assumer lors de la réalisation de la tâche collaborative. À chaque agent humain, nous associons un agent *alter ego* qui d'une part, le représente dans le système, et d'autre part l'assiste dans la réalisation de sa tâche, en lui permettant de réutiliser son expérience. Les agents *alter ego* interagissent par ailleurs entre eux, pour échanger et partager des expériences individuelles, et participer à l'émergence d'expériences collectives.

Le système présente plusieurs articulations :

- une articulation centrée humain, permettant la mise en œuvre du collectif (Humain, système) ;
- une articulation centré rôle, permettant de mettre en œuvre un collectif homogène sémantiquement ;
- une articulation centrée tâche collective, permettant de mettre en œuvre un collectif hétérogène organisé autour de la tâche collective à réaliser ;

Nous considérons chaque niveau d'articulation, comme un système complexe adaptatif, dont la dynamique est alimentée par un usage auto-catalytique. Plus un tel système est utilisé, à quelque niveau que ce soit, plus il s'enrichit d'expériences et plus il sera amené à être utilisé, renforçant ainsi son usage futur. Selon la spécification des systèmes complexes

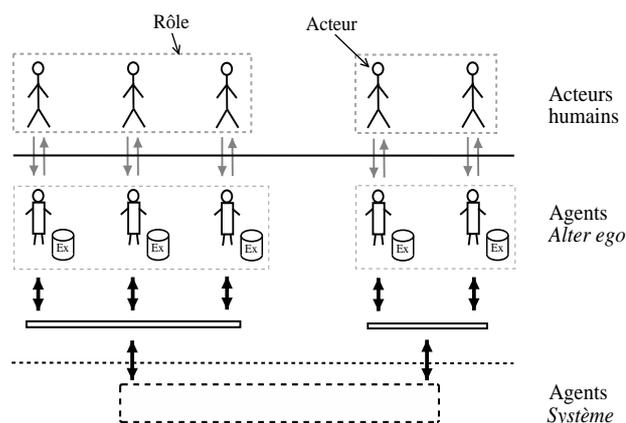


FIG. 5.2 – Proposition d'architecture fonctionnelle.

donnée au chapitre 3, les usages définissent les étiquettes (tag) permettant de faire émerger des agrégats, qui fournissent des étiquettes (tags) pour le niveau supérieur.

5.3.1.2 Environnement et Interactions entre agents

Dans ce système, les interactions entre agents sont médiées par l'environnement. Celui-ci est représenté par l'ensemble des ressources physiques (documents, outils, applications, etc.) et abstraites (concepts, annotations, ontologies, modèles, expériences, etc.) mobilisées par les agents lors de la réalisation de la tâche. Les actions des agents se traduisent par des opérations effectuées à l'aide de certaines de ces ressources comme par exemple l'annotation d'un document, la création d'un nouveau concept à l'aide de concepts existants, la modification d'un document à partir d'une copie d'un autre, etc. Les opérations laissent des traces dans l'environnement sous forme de liens entre des ressources de l'environnement. Une opération peut être vue comme une interaction entre l'agent qui la réalise et son environnement. Les interactions s'expriment par des traces laissées directement sur un ensemble de ressources partagés. Dans un processus de collaboration, des traces laissées par certains agents, prennent sens chez d'autres et déclenchent des actions spécifiques. Il est alors question de communication stigmergique entre agents. Cet environnement est représenté par un réseau complexe de ressources, dont les interconnexions (relations) sont re-configurées par l'usage.

5.3.2 Représentation de l'expérience et interprétation des traces

La représentation de l'expérience se base sur le modèle MUsETTE, décrit en 5.2.4. Afin d'interpréter une trace primitive selon le modèle d'utilisation d'une application, nous avons défini une approche basée sur la théorie des langages. Cette approche permet d'associer à la trace primitive une syntaxe, permettant d'extraire des phrases significatives par rap-

port à une application spécifique. Ces phrases permettent ensuite d'aider à la construction d'épisodes de réutilisation. En effet, une trace primitive représentée comme une séquence d'états, transitions selon MUSETTE, peut être vue comme des séquences de phrases bruiées contenant des niveaux de détails différents. Pour ce faire, nous découpons un épisode potentiel en trois parties composées : d'une séquence initiale S_0 , une suite potentielle de séquences intermédiaires S_i et une séquence finale S_f . L'identification de ces parties permet d'étiqueter (mécanisme de tagging) par l'application, au cours de la construction de la trace primitive, les différentes parties de la trace afin d'identifier les séquences définies et faciliter leur interprétation.

Un formalisme à base de langage formel pour interpréter les traces : nous décrivons notre formalisme à l'aide de la notation BNF étendue :

- **Phrase :** une trace est une phrase, et est constituée de plusieurs épisodes consécutifs :

$$Trace ::= Episode^+$$

où un *épisode* est défini par l'utilisation initiale d'une action générique.

- **Symboles terminaux :** nous considérons les transitions (T) et les états (E) comme des symboles terminaux, et T_0 , T_I , et T_F comme des transitions significatives au regard du *modèle fonctionnel* de l'application. T_0 , T_I et T_F désignent respectivement l'étape *initiale*, *intermédiaire* et *finale* d'une action.

Opérateurs : nous introduisons les opérateurs \cdot et $+$ pour exprimer les propriétés qui existent entre les composants d'une trace. L'opérateur \cdot est employé lorsqu'une relation de précedence existe entre des états et des transitions consécutifs ; en d'autre termes, leur permutation n'a aucun sens, on parlera alors d'une *séquence*. L'opérateur $+$ est utilisé lorsque des séquences peuvent être permutées ; ceci correspond à des alternatives équivalentes lors de l'utilisation d'une fonctionnalité. De plus, nous considérons que \cdot est prioritaire par rapport à $+$; ainsi, les séquences ne peuvent pas être divisées.

- **Symboles non-terminaux :** nous définissons intuitivement les symboles employés dans les règles de production détaillées ci-dessous : un *épisode* fait référence à l'utilisation initiale d'une *action*, une *action* peut soit initier un épisode, soit être imbriquée dans une autre action, une *séquence* est une succession indivisible d'*états* et de *transitions*, une *alternative* est une séquence qui peut être permutée avec une autre séquence ou bien avec une action imbriquée.

- **Règles de production :**

$$Trace ::= Episode^+$$

$$\begin{aligned}
 \textit{Episode} & ::= \textit{Action} \\
 \textit{Action} & ::= \textit{Sequence}_0 + \textit{SSequence}^+ + \textit{Sequence}_F \\
 \textit{SSequence} & ::= \textit{Alternative} \mid \textit{Alternative} + \textit{Sequence}_I + \textit{Alternative} \\
 \textit{Sequence}_0 & ::= T_0 \cdot E \cdot \textit{Sequence} \\
 \textit{Sequence}_F & ::= \textit{Sequence} \cdot T_F \cdot E \\
 \textit{Sequence}_I & ::= \textit{Sequence} \cdot T_I \cdot E \mid T_I \cdot E \mid T_I \cdot E \cdot \textit{Sequence} \\
 & \quad \mid \textit{Sequence} \cdot T_I \cdot E \cdot \textit{Sequence} \\
 \textit{Sequence} & ::= T \cdot E \mid T \cdot E \cdot \textit{Sequence} \\
 \textit{Alternative} & ::= \textit{Sequence} \mid \textit{Sequence} + \textit{Alternative} \mid \textit{Action}
 \end{aligned}$$

Une description plus détaillée de cette approche est donnée dans [92].

5.3.3 Travaux en cours sur la représentation des traces

L'approche à base de la théorie des langages pour la représentation des traces est en cours d'étude pour permettre d'une part, la détection des intentions de l'utilisateur afin de mieux l'assister et d'autre part permettre l'émergence de traces collectives à partir de l'agrégation de traces individuelles reconnues.

Reconnaissance de l'intention de l'utilisateur Le découpage d'une la trace primitive (individuelle) en trois types de séquences (initiale, intermédiaires, finale) permet de mettre en œuvre un mécanisme de reconnaissance de l'intention de l'utilisateur, afin de mieux cibler la sélection de l'épisode de réutilisation à proposer à l'utilisateur. En effet, on peut associer une action entreprise par un utilisateur, à une intention que l'on ne connaît pas a priori. L'action de l'utilisateur se traduit par une suite d'opérations élémentaires exécutées sur les ressources. Ces opérations peuvent suivre une stratégie établie ou suivre une intuition (tâtonnement) si une telle stratégie n'est pas définie. Cette démarche est utile pour le système, afin de lui permettre d'être plus réactif. On peut alors définir une hiérarchie de trois niveaux : intention, action, opération, où chaque niveau de la hiérarchie est associé à une grammaire et où les terminaux de la grammaire du niveau i , correspondent à des non-terminaux de la grammaire du niveau $i - 1$.

Une approche similaire a été proposé par [50] dans le domaine de la sécurité pour la reconnaissance des attaques et l'implémentation d'une réponse. Dans cette approche, les auteurs proposent un découpage de la réaction à une attaque en deux étapes : une étape de reconnaissance, pendant laquelle le système tente de découvrir la nature de l'attaque en cours en analysant les actions de l'attaquant correspondant aux prémisses d'une attaque et une étape de réaction où le système a réussi à identifier l'attaque et implante la réponse. Comme dans le cas de la grammaire que nous avons définie ci-dessus, cette approche sert de mécanisme pour l'enrichissement de la trace primitive afin de permettre une meilleure

interprétation. Elle n'a pas pour objectif de figer les épisodes selon une certaine syntaxe, ce qui serait en contradiction avec l'objectif du raisonnement à partir de l'expérience.

Emergence de traces collectives Dans le cas de traces collective, l'approche à base de langage, permet de la même façon que pour une trace individuelle, d'enrichir la trace primitive, à l'aide d'une structure syntaxique permettant de reconnaître les séquences correspondant aux interactions. Ceci afin de permettre la mise en évidence des situations d'interaction au niveau des traces et favoriser l'émergence de traces collectives intéressantes, pouvant représenter des signatures de tâches collectives.

Ce travail est en cours. Il est mené dans le cadre de la thèse de doctorat d'Arnaud Stuber, que je co-encadre avec Alain Mille. Cette thèse a commencé en octobre 2001, et est financée par la Région Rhône-Alpes dans le cadre du projet OSCAR.

5.3.4 Co-construction émergentiste d'ontologies : le modèle *MAZETTE*

Dans cette section nous abordons le problème de la co-construction émergentiste d'ontologies, afin d'appréhender le problème de l'hétérogénéité sémantique dans un collectif (hétérogène).

5.3.4.1 Le problème de l'hétérogénéité sémantique dans ce cadre

Lors de la réalisation d'une tâche collective par un collectif d'agents hétérogènes, chaque agent a sa propre représentation de son expérience selon le modèle *MUSETTE* décrit ci-dessus. Les interactions entre agents sont médiées par l'environnement. Elles se traduisent par des traces laissées dans l'environnement sous forme, de liens entre ressources, annotations, nouveau document, etc. Dans le cas d'une interaction entre agents, les traces laissées mettent en jeu des ressources partagées.

Afin que les agents puissent interagir et exploiter les traces laissées, il est nécessaire qu'ils arrivent à lever l'hétérogénéité sémantique (HS) à laquelle ils seront forcément confrontés dans le cadre de notre problématique.

Les agents humains considérés ont des points de vues différents sur l'objet de la tâche à réaliser. Ces points de vues s'expriment selon des domaines différents, qui dénotent l'usage de terminologies, de méthodes de travail, des modes de représentations, etc. différents, bien qu'ils partagent des objets de collaboration communs. Les ontologies utilisés par les uns et les autres seront alors décrites dans des langages spécifiques et structurées selon des taxonomies spécifiques. Nous rencontrons alors, dans ce cas, les différents types d'HS décrits en 5.2.3. Les agents partagent néanmoins quelques ontologies, certaines applications, système de gestion de fichier, etc. Le choix d'une communication médiée par l'environnement, permet de simplifier le problème de l'HS. En effet, dans certaines situations les agents peuvent comparer des structures portant sur des ressources communes, afin d'inférer de nouvelles

informations leur permettant de construire un sens commun. L'intérêt de travailler sur les structures est qu'elles contiennent des informations de contexte qui peuvent être utile lors de ce processus de compréhension mutuelle.

5.3.4.2 Le modèle MAZETTE : Multi-agents MUNETTE

Les traces construites au cours de l'interaction d'un agent avec le système, ou au cours de l'interaction entre agents selon le modèle MUNETTE, présentent deux aspects : un aspect syntaxique que j'ai présenté ci-dessus (cf. 5.3.2) et un aspect sémantique que nous étudions dans le cadre de ce projet. L'aspect sémantique est porté par :

- des ontologies spécifiant sur les objets d'intérêts (*OIs*) représentés dans la trace,
- les annotations ainsi que les ontologies spécifiant les concepts qu'elles utilisent ;
- certaines relations entre les *OIs*

Le modèle MAZETTE consiste à généraliser le modèle MUNETTE en prenant en compte les aspects collectifs. On considère que chaque agent humain, manipule un espace de ressources, qu'il peut mobiliser lors de la réalisation de sa tâche. Cet espace contient des ressources individuelles et des ressources qu'il peut partager avec d'autres agents. Il est accessible à l'agent *alter ego* associé. L'expérience de l'agent humain, ainsi que la trace construite au cours de la réalisation de la tâche sont aussi accessibles. Le modèle MAZETTE est illustré par la figure 5.3.

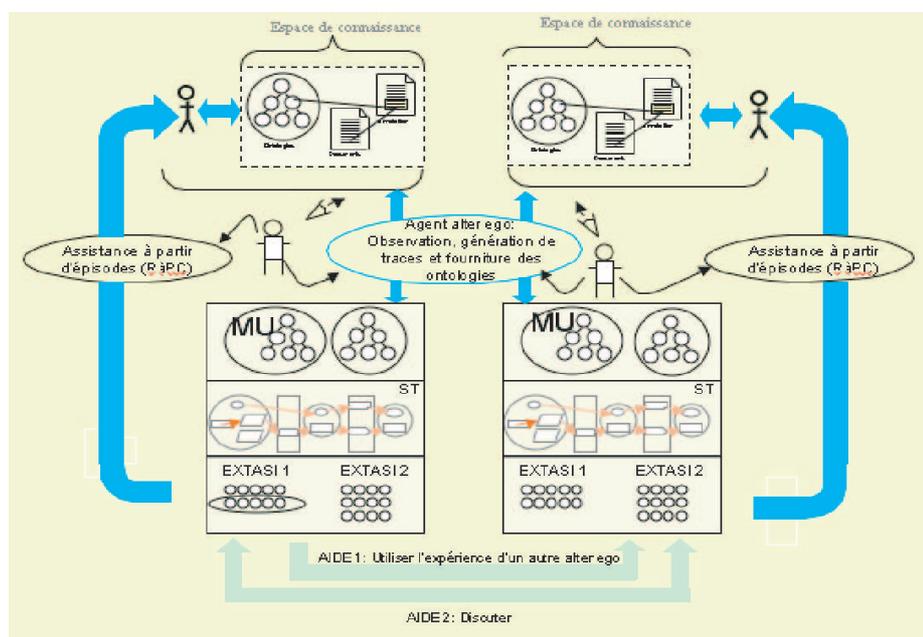


FIG. 5.3 – Modèle MAZETTE

Au cours de la réalisation d'une tâche collective, chaque agent dispose dans son espace de ressources d'une partie de la trace collective. En utilisant le processus de construction

de traces collectives à partir de traces individuelles (mécanisme d'étiquetage, cf. 5.3.2), il est possible de restituer la trace collective de la tâche. La trace collective ainsi obtenue aura la forme d'un réseau complexe de ressources interconnectés, représenté par un graphe. On s'intéresse alors à caractériser à l'aide de l'étude de la structure du graphe, les situations d'interactions, correspondant à la signature d'une tâche par exemple, ou une anomalie, etc. Il s'agit en particulier d'identifier, les situations de NUP ou MUP, pour pousser les agents à lever l'hétérogénéité sémantique, en créant de nouveaux concepts, de nouvelles annotations, etc., permettant de créer un sens commun partagé dans le cadre de la tâche collective. La contribution à la création du sens, peut aussi émerger de la confrontation de structures similaires mettant en relation des objets appartenant à des domaines sémantiques différents.

Dans ce projet, comme dans le projet ECoWeb (cf. 4.3) la structure, le contenu et l'usage sont liés. Par ailleurs, la topologie du réseau complexe défini par la trace collective, mérite d'être étudiée pour voir si elle présente les caractères *scale-free* et *small world*. Intuitivement, j'aurai tendance à répondre oui, puisque comme pour les autres réseaux étudiés (Internet, Web), sa structure est modifiée par l'usage, qui s'en trouve lui-même modifié, en retour.

Ce travail est à ces débuts, il est mené dans le cadre de la thèse Jesus Arana Octavio, que je co-encadre avec Yannick Prié et Alain Mille.

L'action spécifique CoMETE²² du RTP 38 du CNRS STIC, que j'anime conjointement avec Alain Mille rentre aussi dans ce cadre de recherche.

²²CoMETE est l'acronyme de Co-construction éMergente d'Expérience par inTEraction

Conclusion Générale

1 Constat

Au cours de mes recherches, j'ai abordé différentes problématiques, suggérées par la question initiale posée dans l' introduction de ce mémoire, à savoir :

*Comment développer des systèmes informatiques capables de travailler "en intelligence" avec leur environnement considéré dans son sens le plus large, intégrant tant le niveau physique matériel et logiciel, que le niveau conceptuel de l'usage ?*²³

La tentative de réponse à cette question m'a amenée au constat suivant sur ma démarche :

- en considérant le niveau physique (*bas niveau*) de l'environnement (projet ECoMAS), j'ai été amenée à m'intéresser au **couplage existant entre l'organisation sociale et l'organisation spatiale d'un collectif**. Ceci est déterminant, de mon point de vue, dans une perspective de l'élaboration d'une méthodologie de développement de systèmes informatiques auto-organisants ;
- en considérant le niveau conceptuel (*haut niveau*) de l'usage (projet CESaR), j'ai été amenée à aborder la question de l'émergence du sens à partir des interactions, selon ce même couplage.

2 Vers une méthodologie de développement de systèmes informatiques auto-organisants

La question posée ci-dessus, met l'environnement d'un système au coeur de la problématique de sa propre définition. Ainsi le système est défini à travers le couplage qu'il a avec son environnement. En m'intéressant à un environnement complexe et dynamique, j' aboutis à une vision du système selon la Théorie du Système Général, et son prolongement vers la problématique des Systèmes Complexes Adaptatifs. Comme mon objectif est la mise en œuvre de systèmes informatiques, j'adopte le paradigme multi-agents comme modèle de représentation. La place centrale occupée par l'environnement dans ce contexte, agit à son tour sur la nature du paradigme multi-agents utilisé. Celui-ci en tant qu'incarnation du système informatique cible, subit la définition de ce dernier quant à son couplage

²³Paradoxalement, bien que sous-jacente à ma problématique de recherche, la formulation de cette question a émergé du cheminement que j'ai suivi tout le long de mes recherches

avec l'environnement. Le SMA se définit alors, lui-même, à travers ce même couplage. Par conséquent, le SMA considéré met en œuvre des agents situés et incarnés dans un environnement matérialisé physiquement. La structure du système informatique cible, est alors matérialisée par l'organisation spatiale des agents dans son environnement physique. Le couplage SMA-environnement, se traduit alors au niveau du système cible par un couplage structure-environnement, selon une vision autopoïétique. Cela a pour conséquence de définir le SMA comme un système dont la finalité est le maintien de son organisation spatiale dans l'environnement. Ceci nous amène à la définition d'un système informatique auto-organisant, face à la dynamique de son environnement.

Afin de mettre en œuvre un tel SMA auto-organisant, il faut définir d'une part, son déploiement dans l'environnement, qui permettra d'atteindre son organisation spatiale et d'autre part son organisation sociale qui permettra de mettre en œuvre les interactions lui permettant de maintenir son organisation. Ceci nous amène alors à étudier :

- la relation entre l'organisation spatiale du SMA et la topologie de l'environnement, et l'effet de l'une sur l'autre. Ce qui définit le couplage réflexif "structure-processus" au sens autopoïétique (la structure qui génère les processus qui la génèrent).;
- la relation entre l'organisation sociale du SMA et son organisation spatiale et l'effet de l'une sur l'autre. Ce qui définit le couplage structure-environnement permettant la mise en œuvre de l'auto-organisation ;
- les effets réciproques de ces deux couplages, qui permettent la co-évolution des organisations et la topologie de l'environnement.

Le cadre, que nous avons défini en chapitre 3, trouve alors complètement sa justification, comme une première base à un support méthodologique pour le développement de systèmes informatiques auto-organisant.

Afin de définir une méthodologie pour ces systèmes, ces notions nécessitent une étude plus approfondie. Nous avons entrepris cette étude dans le cadre du projet ECoWeb (cf. 4.3). Une autre étude plus spécifique est en cours sur l'adéquation de la combinaison de la stigmergie et de la stratégie d'équilibre entre exploration et exploitation, pour les environnement ayant une topologie "Scale Free". Cette étude est motivée par l'intuition de cette adéquation, présentée au chapitre 3.

3 L'émergence du sens à partir des interactions

Comme je l'ai présenté dans le projet CESaR, nous abordons l'émergence du sens selon l'angle de l'émergence de structures stables, dans le réseau complexe de ressources exploitées lors de la réalisation de la tâche collective. Ces structures vont correspondre à des motifs, représentant des informations importantes réutilisables. Le réseau complexe de ressources peut être vu comme un ensemble de sources d'informations distribués interconnectés par leurs usages et/ ou leurs contenus. Ce réseau est dynamique. L'évolution de sa structure est très liée à son usage. Celui-ci est à son tour modifié suite à l'évolution de la

structure du réseau. Cette description est proche de celle que nous avons donnée du Web dans le projet ECoWeb, à savoir : les sources information distribuées et interconnectées entre elles selon un réseau dynamique, intégrant l'usage, nécessitent une étude intégrant le contenu, la structure et l'usage et leurs dépendances interrelationnelles.

L'étude des propriétés permettant de caractériser le réseau complexe des interconnexions, est certainement utile pour appréhender le problème de l'émergence de structures stables. Si un tel réseau évolue comme le web par exemple, et que nous arrivons à caractériser sa topologie comme "Scale Free", nous pourrions utiliser les mêmes approches que celles que l'on développe dans le cadre du projet ECoWeb, pour faire émerger ces structures. Ceci passe par l'établissement d'une corrélation entre la topologie du réseau représentant l'environnement et celle du réseau représentant les interactions sociales déployées dans l'environnement.

Bibliographie

- [1] M-A. Abtoun and S. Hassas. The serializability problem in a parallel rule based system : a solution by distributed coordination. In *Advanced Topics in Artificial Intelligence (LNAI 1342)*, Perth, Australia, December 1997. Springer Verlag.
- [2] P. Agre and D. Chapman. Pengi : An implementation of a theory of activity. In *Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87)*, pages 268–272, 1987.
- [3] R. Albert, H. Jeong, and A. Barabasi. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406 :378–382, 2000.
- [4] A. Anderson. Self-organization in relation to several similar concepts : Are the boundaries to self-organizatio indistinct. *Diology Bulletin*, 202, June 2002.
- [5] James P Anderson. Computer security threat monitoring and surveillance. Technical report, James P Anderson Co., Box 42, Fort Washington, PA 19034,USA, 1980.
- [6] Rao A.S. and Georgeff P. Bdi agents : From theory to practice. In *Proceedings of the First Intl. Conference on Multiagent Systems (ICMAS'95)*, San Francisco, California, 1995. AAAI Press.
- [7] M Backschat, A. Pfaffinger, and C. Zenger. Economic based dynamic load balancing distribution in large workstation networks. In Fraigniaud et al., editor, *Proceeding of 2nd International Euro-Par Conference*, pages 631–634, Lyon, France, August 1996. Lecture Notes in Computer Sciences-Springer Verlag.
- [8] Jai Sundar Balasubramaniyan, Jose Omar Farcia-Fernandez, David Isacoff, Eugene Spafford, and Diego Zamboni. An architecture for intrusion detection using autonomous agents. Technical report, COAST Laboratory, Purdue University, 11, 1998 1998.
- [9] A. Barabasi and R. Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286 :509–512, 1999.
- [10] David S. Bauer and Michael E. Koblenz. NIDX – an expert system for real-time network intrusion detection. In *Proceedings of the Computer Networking Symposium*, pages 98–106, Washington, DC, 1988. IEEE, IEEE Computer Society Press.
- [11] L.V. Bertalanffy. *General System Theory*. New York, 1968.

- [12] L.V. Bertalanffy. *General System Theory : Foundations, Development, Applications*. Geroges Brazillier, Inc., New York, paperback (revised edition) edition, 1968.
- [13] E. Bonabeau, M. Dorigo, and Theraulaz. *From Natural to Artificial Swarm Intelligence*. Oxford University Press, 1998.
- [14] E. Bonabeau, F. Henaux, S. Guerin, D. Snyers, P. Kuntz, and G. Theraul. Routing in telecommunication networks with "smart" ant-like agents. In *Proceedings of IATA '98, Second Int. Workshop on Intelligent Agents for Telecommunication Applications*. Lectures Notes in AI vol. 1437, Springer Verlag, 1998.
- [15] E. Bonabeau, G. Theraulaz, J.-L. Deneubourg, and S. Camazine. Self-organisation in social insects. *Trends in Ecology and Evolution*, 12(5) :188–193, 1997.
- [16] J. Bonneville and S. Hassas. Towards a self-organizational approach for a parallel computation in a distributed production rule-based system. In AAAI-Press, editor, *proceedings of AAAI Spring Symposium on "Adaptation, Co-evolution and Learning in Multi-Agent Systems"*, Stanford University, CA, 1996.
- [17] S. Bouakaz, S. Hassas, Y. Perret, and W.C. Sen. An adaptive process using a multi-agents approach for edge detection in scattered data. In LiWei Zhou, Chung-Sheng Li, and Yoshiji Suzuki (Eds.), editors, *Proceeding of proc. SPIE, International Conference on Electronic Imaging and Multimedia Technology III*, pages 33–40, Shangai, Cina, October 2002. SPIE.
- [18] J. Chapelle, O. Simonin, and J. Ferber. How situated agents can learn to cooperate by monitoring their neighbors' satisfaction. In *Proceedings of 15th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'02)*, Lyon, France, August 2002.
- [19] A. Chavez, M Moukas, and M. Maes. Challenger : A multi-agent system for distributed allocation. In *Pocceedings of the first International Conference on Autonomous Agents*, Marina Del Rey, CA, USA, Fedruary 1997. ACM Press.
- [20] W.J. Clancy. *Situated Cognition*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [21] M. Crosbie and E. H. Spafford. Defending a computer system using autonomous agents. In *Proc. 18th NIST-NCSC National Information Systems Security Conference*, pages 549–558, 1995.
- [22] F. Cuppens. Managing alerts in a multi-intrusion detection environment. In *proceedings of 17th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC)*, New-Orleans, December 2001.
- [23] F. Cuppens and A. Miège. Alert correlation in a cooperative intrusion detection framework. In *proceedings of 2002 IEEE Symposium on Security and Privacy.*, 2002.
- [24] Corne D., M. Dorigo, and F. Glover. *New Ideas in Optimisation*. McGraw Hill, 1999.
- [25] Y. Demazeau. From interactions to collective behaviors in agent-based systems. In *Proceeding of First European Conference on Cognitive Science*, Saint-Malo, France, April 1995.

-
- [26] J. L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks, A. Sendova-Franks, C. Detrain, and L Chretien. The dynamics of collective sorting. In *From Animals to Animats : International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 356–363. MIT Press, 1990.
- [27] D. E. Denning. An intrusion-detection model. In *Proc. IEEE Symposium on Security and Privacy*, pages 118–131, 1986.
- [28] K. Dooley. Complex adaptive systems : A nominal definition.
- [29] K. Dooley and S. Corman. Agent-based, genetic, and emergent computational models of complex systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*, 1999.
- [30] K.J. Dooley, Timothy L. J, and David H. B. "tqm, chaos and complexity". *Human Systems Management*, 14 :287–302, 1995.
- [31] A Drogoul and J. Ferber. "from tom-thumb to the dockers : Some experiments with foraging robots". In *From Animals to Animats II*, pages 451–459, Cambridge, 1993. MIT Press.
- [32] A Drogoul, J. Ferber, and E Jacopin. Pengi : applyong eco-problem solving for behavior modeling in an abstract-ecosystem. In E. Mosekilde, editor, *Proceedings of European Simulation Multiconference (ESM'91)*, 1991.
- [33] A. El Fallah-Seghrouchni. *Coordination d'agents : Modèles, Algorithmes et Protocoles*. Dossier d'HDR de Université de Paris Nord, 2000.
- [34] E. Plaza F. J. Martín. Auction-based retrieval. In *ceedings of the "2n Congrés Català d'Intel.ligència Artificial"*, pages 136–145, Girona, Catalonia (Spain), October 25-27, 1999.
- [35] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos. On power-law relationships of the internet topology. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM'99, Cambridge, MA, USA*, pages 251–262, 1999.
- [36] S. Fenet. *Vers un paradigme de programmation pour les applications distribuées basé sur le comportement des insectes sociaux : application à la sécurité des réseaux*. Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard - Lyon 1, Décembre 2001.
- [37] S. Fenet and S. Hassas. Une approche multi-agents de résolution de problèmes par interaction : cas de l'équilibrage dynamique multi-critères. In V. Chevrier J-P. Barthès and C. Brassac, editors, *Systèmes multi-agents : de l'interaction à la sociabilité (JFIADSMA '98)*, pages 115–130, Pont-à-Mousson, Novembre 1998. Edition Hermès.
- [38] S. Fenet and S Hassas. Ant : a distributed problem-solving framework based on mobile agents". In G.E. Lasker, J. Dospisil, and E. Kendall, editors, *Pocceedings of International Conference on Mobile Agents and Applications*. Institute for Advanced Studies in Systems Research And Cybernetics, May 2000.
- [39] S. Fenet and S Hassas. A.n.t : a distributed network control framework based on mobile agents. In Australia Wollongong, editor, *Proceedings of International Conference*

- on *Computational Intelligence*. International ICSC Congress On Intelligent Systems and Applications, December 2000 (CI'2000).
- [40] S. Fenet and S. Hassas. A distributed intrusion detection and response system based on mobile autonomous agents using social insects communication. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 63 :21–31, 2002.
- [41] S. Fenet and S. Hassas. An ant based system for dynamic multiple criteria balancing. In *Proceedings of the First Workshop on ANT Systems*, Brussels, Belgium, September 1998.
- [42] J. Ferber. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [43] J. Ferber and J.P. Muller. Influences and reaction : A model of situated multiagent systems. In *Poceedings of International Conference on MultiAgents Systems (ICMAS'95)*, 1995.
- [44] N. Foukia and S Hassas. Managing computers network security through self-organization : a complex system perspective. In *Self-Organizing Applications : Issues, Challenges and Trends*, to appear 2004.
- [45] N. Foukia, S. Hassas, S. Fenet, and P. Albuquerque. Combining immune systems and social insect metaphors : a paradigm for distributed intrusion detection and response systems. In Eric Horlait, editor, *Proceeding of 5th International Workshop on Mobile Agents for Telecommunication Applications, MATA '03*, Marrakech, Morocco, October 2003. Lecture Notes in Computer Science -Springer Verlag.
- [46] N. Foukia, S. Hassas, S. Fenet, and J. Hulaas. An intrusion response scheme : Tracking the alert source using stigmergy paradigm. In K. Fisher and D. Hutter, editors, *Poceedings of AAMAS'02 Workshop on SEcurityof Mobile Multi-Agents Systems*, Bologna, Italy, July July 2002.
- [47] Dorffner G., Prem E., and Trost H. Words, symbols, and symbol grounding. Technical Report TR- 93-30, Oesterreichisches Forschungsinstitut fuer Artificial Intelligence, 1993.
- [48] P. Ghodous, S. Hassas, M. Martinez, and S. Pimont. Distributed architecture for design activities. *International Journal of IT Architecture, Engineering and Construction : Special Issue on Agents and Multiagents Systems in Construction*, pages 55–65, 2003.
- [49] J. Gomoluch and M. Schroeder. Information agents on the move : A survey on loadbalancing with mobile agents. *Software Focus*, 2(2), 2001.
- [50] V. Gorodetski and I. Kotenko. Attacks against computer network : Formal grammar-based framework and simulation tool. In *proceedings of the Worskshop of Recent Advances in Intrusion Detection (RAID'2002)*, 2002.

-
- [51] P.P. Grassé. La reconstruction du nid et les interactions inter-individuelles chez les bellicoitermes natalenis et cubitermes, la théorie de la stigmergie - essai d'interprétation des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6 :41–81, 1959.
- [52] S. Hassas. Using swarm intelligence for dynamic web content organization. In *Proceedings of IEEE Symposium on Swarm Intelligence*, pages 19–25, Indianapolis, IN, USA, April 24-26 2003. IEEE Press.
- [53] J.H. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. *MIT Press, Cambridge, MA*, 1992.
- [54] J.H Holland. *Hidden Order*. Addison-Wesley, MA, 1995.
- [55] O.E. Holland and C. Melhuish. Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics. *Artificial Life*, 5 :173–202, 1999.
- [56] W. Hunteman. Automated information system – (AIS) alarm system. In *Proc. 20th NIST-NCSC National Information Systems Security Conference*, pages 394–405, 1997.
- [57] W. Jansen, P. Mell, T. Karygiannis, and D. Marks. Applying mobile agents to intrusion detection and response. Technical report, National Intitut of Sandard and Technology, Interim Report 6416, September 1999.
- [58] D. Jouvin. Utilisation de la délégation pour l'adaptation de protocoles de conversations entre agents. In C. Pesty, S. et Sayettat-Frau, editor, *Systèmes multi-agents : Méthodologie, Technologie et Expériences (JFIADSMA'00)*, Saint-Jean-La-Vêtre, Loire, France, 2-4 octobre 2000. Hermès.
- [59] D. Jouvin and S. Hassas. Role delegation as multi-agent oriented dynamic composition. In *Proceedings of International Workshop on Agent Technology and Software Engineering (AGeS'2002)*, Erfurt, Germany, October 8-9 2002.
- [60] D. Jouvin and S. Hassas. Architectures flexibles dynamiques de systèmes multiagents conversationnels. In Briot J-P. and K. Ghedira, editors, *Actes des 11èmes Journées Francophones sur les Systèmes MultiAgents, JFMAS'03*, Hammamet, Tunisie, 27-29 Novembre 2003. Edition Hermès.
- [61] D. Jouvin and S. Hassas. Dynamic reconfiguration of multi-agent architecture using conversational role delegation. In P. Giorgini, J. Müller, and J. Odell, editors, *Agent-Oriented Software Engineering IV, (Proceedings of the Fourth International Workshop AOSE 2003)*, Melbourne, Australia, July 2003. LNCS-Springer Verlag.
- [62] D. Jouvin and S. Hassas. Flexible multi-agent system architecture using dynamic delegation. In *Proceeding of 6th International Symposium on Programming and Systems (ISPS'03)*, Algiers, Algeria, May 5-7 2003.
- [63] J. Kolodner. *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1993.
- [64] C. R. Kube and H. Zhang. Collective robotics : From social insects to robots. *Adaptive Behavior*, 2(2) :189–219, 1993.

- [65] C. G. Langton. Studying artificial life with cellular automata. *Physica D*, 1986.
- [66] Dorigo M., G. Di Caro, and L. M. Gambardella. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5(2) :137 :172, 1999.
- [67] P. Maes and R.A. Brooks. Learning to coordinate behaviors. In *Proceeding of the 8th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 796–802, Menlo Park, CA, 1990. AAAI.
- [68] M. Mataric. Designing emergent behaviors : From local interactions to collective intelligence. In J-A. Meyer, H. Roitblat, and S. Wilson, editors, *roceedings, From Animals to Animats 2, Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB-92)*. MIT Press, 1992.
- [69] M.J. Mataric. Issues and approaches in the design of collective autonomous agents. *Robotics and Autonomous Systems*, 16(2-4) :321–331, December 1995.
- [70] H. Maturana and F. Varela. Autopoiesis and cognition : The realization of the living. In Robert S. Cohen and Marx W. Wartofsky, editors, *Boston Studies in the Philosophy of Science*, volume 42. Reidel Publishing Co, 1980.
- [71] H. Maturana and F. Varela. *The Tree of Knowledge*. Shambhala., Boston, MA., 1992.
- [72] A. Montessor. Biology-inspired techniques for self-organization in dynamic networks (<http://www.cs.unibo.it/bison/>), 2001.
- [73] Biswanath Mukherjee, L. Todd Heberlein, and Karl N. Levitt. Network intrusion detection. *IEEE NET*, 8(3) :26–41, / 1994.
- [74] P. Ning, Y. Cui, and D.S. Reeves. Analyzing intensive intrusion alerts via correlation. In *proceedings of*, 2002.
- [75] S. Ontañón and E. Plaza. Learning when to collaborate among learning agents. In P. Flach L. De Raedt, editor, *Machine Learning : EMCL 2001(LNAI 2167)*, pages 394–405. Springer-Verlag, 2001.
- [76] S. Ontañón and E. Plaza. Collaborative case retention strategies for cbr agents. In D. Bridge and K. Ashley, editors, *Advances in Case-Based Reasoning. Proc. ICCBR 2003, Lecture Notes on Artificial Intelligence 2689*, pages 392–406. Springer-Verlag, 2003.
- [77] Office for Official Publications of the European Communities, Information Technology Security Evaluation Criteria, June 1991. Version 1.2., 1991.
- [78] Yannick Prié Pierre-Antoine Champin and Alain Mille. Musette : Modelling uses and tasks for tracing experience. In *Proceeding of WS5 : From Structured Cases to Unstructured Problem Solving Episodes For Experience-Based Assistance at ICCBR'03*, pages 279–294, NTNU, Trondheim, Norway,, June 2003.
- [79] L. Pithon, S. Bouakaz, and S. Hassas. A framework for cooperative segmentation based on the multi-agents paradigm. In Bernd Girod, Charles A. Bouman, and Ecke-

-
- hard G. Steinbach (Eds), editors, *proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing*, pages 135–143, 2001.
- [80] E. Plaza, J.L. Arcos, and F. Martín. Cooperative case-based reasoning. In G. Weiss, editor, *Distributed Artificial Intelligence meet Machine Learning (LNAI 1221)*, pages 180–201. Springer-Verlag, 1997.
- [81] P. A. Porras and P. G. Neumann. EMERALD : Event monitoring enabling responses to anomalous live disturbances. In *Proc. 20th NIST-NCSC National Information Systems Security Conference*, pages 353–365, 1997.
- [82] I. Prigogine and I. Stengers. *Order out of Chaos*. Bantam, New York, 1984.
- [83] Brooks R.A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 286(1) :14–23, 1986.
- [84] Brooks R.A. A robot that walks : Emergent behaviors from carefully evolved networks. *Neural Computation*, 1(2) :253–262, 1989.
- [85] Brooks R.A. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence Journal*, 47 :139–159, 1991.
- [86] R.Albert and A.-L.Barabasi. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics* 74., 2001.
- [87] W. Ross Ashby. *An Introduction to Cybernetics*,. (Chapman & Hall, London), 1956.
- [88] R.Schoonderwoerd, O. Holland, and J.Bruten. Ant-like agents for load balancing in telecommunications networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Autonomous Agents*, pages 209–216, February 5-8 1997.
- [89] Goss S. and Deneubourg J.L. Harvesting by a group of robots. In F. Varela and P. Bourguine, editors, *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life Conference (ECAL91)*, pages 195–204, Paris, France, 1991. MIT-Press.
- [90] M. M. Sebring, E. Shellhouse, M. E. Hanna, and R. A. Whithurst. Expert systems in intrusion detection : A case study. In *Proc. 11th NIST-NCSC National Computer Security Conference*, pages 74–81, 1988.
- [91] L. Steels. Building agents with autonomous behavior systems. In L. Steels and R. Brooks, editors, *The ‘artificial life’ route to ‘artificial intelligence’. Building situated embodied agents*. Lawrence Erlbaum Associates, 1994.
- [92] A. Stuber, S. Hassas, and A. Mille. Combiner le paradigme multiagents et la réutilisation de l’expérience pour assister la réalisation collective de tâches. In *Actes de l’Atelier Raisonnement à partir de Cas, RaPC’2003, plateforme AFIA 2003*, Laval, France, Juillet 2003.
- [93] E. Valencia and J-P Sansonnet. Modélisation de l’hétérogénéité sémantique entre agents dialogiques en logique de descriptions. In C. Pesty, S. et Sayettat-Frau, editor, *Systèmes multi-agents : Méthodologie, Technologie et Expériences (JFIADSMA ’00)*, Saint-Jean-La-Vêtre, Loire, France, 2-4 octobre 2000. Hermès.

- [94] D. J. Watts and S. H. Strogatz. Collective dynamics of small-world networks. *Nature*, 393 :440–442, 1998.
- [95] B.B. Werger and M.J. Mataric. Robotic "food" chains : Externalization of state and program for minimal-agent foraging. In P. Maes, M. Mataric, J-A Meyer, J. Pollack, and S. W. Wilson, editors, *Proceedings, From Animals to Animats 4, Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB-96)*, pages 625–634. MIT Press, 1996.
- [96] R. Whitaker. Overview of autopoietic theory : Background for maturana and varela's work ([http ://www.acm.org/sigois/auto/atreview.html](http://www.acm.org/sigois/auto/atreview.html)).