

Introduction

Les systèmes multi-agents (SMA) constituent aujourd'hui une technologie de choix pour la conception et la mise en œuvre d'applications réparties et coopératives. La dualité entre agent comme entité autonome et adaptative et système multi-agent comme organisation décentralisée coopérative offre en effet un cadre tout à fait privilégié pour aborder les enjeux de l'informatique de plus en plus dynamique et distribuée des applications du futur. Suite à leur importance croissante depuis les années 1990 dans la communauté de recherche scientifique (en témoigne par exemple le succès de la conférence internationale unifiée du domaine AAMAS), les systèmes multi-agents sont depuis lors également sortis des laboratoires et sont de plus en plus convoités en milieu industriel. Egalement signe de cette maturité, de nombreux standards (en premier lieu, ceux de l'organisation FIPA) ont été définis pour la technologie des SMA et pour leur articulation avec les technologies plus conventionnelles (objet) ou récentes (services).

Cet ouvrage a pour objectif de sensibiliser et faire le point sur les technologies des systèmes multi-agents et leurs applications. Il est destiné aux scientifiques, ingénieurs et responsables industriels souhaitant comprendre la technologie SMA et leurs applications, ainsi que leurs enjeux de recherche. Pour ce faire, ce traité donne un aperçu significatif des connaissances et des outils technologiques relatifs aux SMA. Il met en évidence les apports des SMA à travers des domaines d'application et des cas pratiques d'utilisation de ces technologies. Ce livre est successeur et complémentaire d'un précédent traité paru en 2001 dans la même série IC2, intitulé *Principes et architecture des systèmes multi-agents*, qui se concentre sur les concepts et principes de base (architectures d'agents, protocoles d'interaction, protocoles de coordination...) des systèmes multi-agents.

Le plan de l'ouvrage est le suivant. Les premiers chapitres décrivent certaines des techniques mises en jeu pour la conception d'applications multi-agents :

- le chapitre 1 « Introduction aux systèmes multi-agents » résume les caractéristiques conceptuelles et techniques des systèmes multi-agents ;

– le chapitre 2 « Méthodes orientées agent et multi-agent » présente et compare un certain nombre de méthodologies de conception et de construction de systèmes multi-agents. Ce chapitre illustre également comment ces méthodes étendent des techniques et outils plus traditionnels (par exemple la notation UML) ;

– le chapitre 3 « Interopérabilité des systèmes multi-agents à l'aide des services web » présente l'utilisation de services web comme support à l'interopérabilité et au déploiement de systèmes multi-agents. Ce chapitre discute également des complémentarités entre services web et systèmes multi-agents ;

– le chapitre 4 « Agents situés : une nouvelle voie pour le développement d'applications industrielles », présente une catégorie des systèmes multi-agents dits réactifs et situés, inspirés de systèmes biologiques (exemple : colonies de fourmis) ou de modèles physiques ou économiques. Ces techniques sont illustrées par plusieurs exemples d'applications, tels que la gestion flexible de systèmes de production.

Les suivants discutent les relations entre systèmes multi-agents et autres technologies (objets, composants, tâches) :

– le chapitre 5 « Composants logiciels et systèmes multi-agents » compare les concepts d'agent et de systèmes multi-agents avec le concept de composant logiciel. Ce chapitre repositionne également les concepts d'agent et de système multi-agent par rapport aux concepts d'objet, d'acteur et de service, dans une perspective historique d'évolution des abstractions de la programmation ;

– le chapitre 6 « Systèmes multitâches aux systèmes multi-agents » compare l'approche plus traditionnelle multitâche avec une approche multi-agent. Une application de surveillance coopérative est utilisée comme exemple comparatif.

Enfin, les derniers chapitres décrivent des exemples de domaines d'applications des systèmes multi-agents :

– le chapitre 7 « Systèmes multi-agents pour l'identification de cibles par un système multicapteur » illustre l'apport des systèmes multi-agents à la surveillance multi-opérateur de navires. Outre la capacité d'intégration de modèles de décision et de classification, l'approche multi-agents prend en compte les aspects coopératifs et organisationnels liés à la présence de différents opérateurs ;

– le chapitre 8 « Jeux vidéo et systèmes multi-agents » illustre l'apport des systèmes multi-agents à la conception de jeux vidéo. Les systèmes multi-agents permettent par exemple une conception plus naturelle et riche des comportements individuels et collectifs des personnages non joueurs des jeux.

Un index complète l'ouvrage.

Chapitre 1

Introduction aux systèmes multi-agents

Le paradigme des systèmes multi-agents (SMA) est apparu dans le courant des années 1980. Il offre aujourd'hui une alternative intéressante pour la conception, la mise en œuvre ou la simulation et la compréhension de systèmes coopératifs ou compétitifs, distribués et ouverts. Les SMA constituent un domaine de recherche en pleine effervescence et une technologie de plus en plus convoitée par les industriels. Pendant la dernière décennie plusieurs consortiums comme la FIPA (Foundation for Physical Intelligent Agents, www.fipa.org), ou l'OMG (Object Management Group, www.omg.org) ont cherché à proposer des standards pour couvrir les principaux aspects de la programmation de SMA.

La clé de voûte des SMA est le double mécanisme d'inférences dont disposent les agents à savoir le niveau résolution de tâches et le métaniveau qui leur permet de s'observer, d'interagir durant la résolution de problèmes et d'en changer le cours.

Les SMA sont particulièrement utiles, pour résoudre des problèmes et concevoir des systèmes nécessitant la distribution (des traitements, du contrôle et des données) et l'autonomie des entités (par exemple agents négociateurs, drones, etc.). De ce fait, le domaine des SMA est en forte synergie avec d'autres domaines de recherche, en particulier l'intelligence artificielle distribuée, les systèmes distribués et le génie logiciel.

1.1. Agents et systèmes multi-agents

Le domaine des systèmes multi-agents (SMA) est en pleine expansion. De nombreux travaux éclosent quotidiennement et brassent des domaines plus ou moins connexes tels que l'intelligence artificielle distribuée, la vie artificielle, la modélisation cognitive, les systèmes distribués, la robotique, etc.

Les SMA visent l'élaboration, la conception, la simulation et/ou la compréhension de systèmes coopératifs ou compétitifs, distribués, et ouverts pouvant intégrer des agents humains et/ou artificiels. Essayons de préciser chacun des termes.

D'abord, qu'est-ce qu'un *système* ?

D'après John Gall [GAL 75] : « Everything is a system. Everything is part of a larger system. The universe is infinitely systematizable, both upward (larger system) and downward (smaller system). All systems are infinitely complex (the illusion of simplicity comes from focusing attention on one or few variables). »

Définir un système revient donc à se situer à un niveau d'abstraction donné et à essayer de spécifier :

- la fonction globale du système ;
- les entités qui le composent en termes de rôles, de comportements et de dynamique, aussi bien dans un souci de conception que d'analyse ;
- les interactions entre ces entités d'une part, et entre ces entités et leur environnement d'autre part.

Un des aspects importants de la dynamique d'un système est la nature des interactions entre ses entités. Dans le contexte des SMA, l'interaction est un support de la *coopération* entre entités. En effet, ces dernières coopèrent soit pour atteindre des objectifs globaux difficilement réalisables de manière individuelle, soit pour éviter des conflits potentiels et/ou favoriser la synergie entre leurs activités dans le cadre d'objectifs individuels.

L'intérêt généralement escompté de la coopération est de concevoir des systèmes plus efficaces, performants et robustes, ou encore plus « intelligents » (voir thèses sur l'émergence).

La distribution signifie que les entités du système ne partagent pas de connaissances globales, c'est-à-dire l'échange d'information se fait par interaction uniquement (par exemple envoi de messages), et que la prise de décision est également distribuée. En d'autres termes, il n'y a pas de connaissance partagée, ni de contrôle global.

REMARQUE.— La distribution géographique des entités sur des sites distincts est une implémentation possible de systèmes distribués.

Contrairement aux systèmes clos, *un système ouvert* est capable d'interagir avec des composants non spécifiés initialement ou de faire partie d'un système plus global. Généralement, l'ouverture permet un fonctionnement flexible dans un contexte dynamique et non complètement prévisible.

Qu'est-ce qu'un *agent* ? C'est une entité de base du système. D'un point de vue SMA, on cherchera à concevoir et à réaliser des systèmes où les agents artificiels sont dotés d'autonomie, de capacités d'adaptation et d'apprentissage. L'autonomie fait référence à l'aspect réflexif d'un agent, c'est-à-dire que chaque agent dispose de son propre contexte d'exécution, de ses propres buts, son propre mécanisme de prise de décision, et est capable d'agir et de raisonner sur ses actions. L'adaptativité implique qu'un agent est capable de réagir à des situations non prévues, de changer le cours de son exécution en conséquence et de mettre à jour ses connaissances par apprentissage en fonction des situations rencontrées.

1.2. Origines et motivations des SMA

Les concepts « agent » et « système multi-agent » sont apparus vers la fin des années 1980 et ont été très utilisés dès le début des années 1990, comme le concept de la « programmation orientée objet » l'a été dans les années 1980 et celui de « l'intelligence artificielle » dans les années 1970. La motivation du domaine SMA, relativement récent, a été d'essayer de réaliser des entités artificielles (des programmes, des robots) qui simulent le comportement humain et la façon dont les hommes interagissent entre eux et avec l'environnement. Une attention particulière a donc été portée sur l'aspect « multi » des agents [CAS 98, FER 95]. Le passage du mono-agent (l'individuel) vers le multi-agent (le collectif) a nécessité l'extension et la généralisation de divers concepts jadis bien connus dans le domaine de l'IA tels que l'apprentissage d'un groupe d'agents, la représentation et le raisonnement sur les connaissances de groupe (connaissances communes et distribuées [FAG 95]).

Outre l'affiliation des SMA à l'IA qui a donné naissance par la suite un domaine nouveau appelé l'IAD (IA distribuée), la distribution a conduit très naturellement les chercheurs vers le domaine des systèmes distribués pour y puiser les techniques de la répartition aussi bien au niveau algorithmique qu'au niveau ingénierie (exemple : plates-formes et langages).

Ainsi, les recherches dans le domaine des SMA se sont retrouvées au carrefour de deux domaines complémentaires : l'intelligence artificielle distribuée (IAD) et les évolutions récentes des systèmes distribués. Notons cependant que d'autres domaines

tels que la vie artificielle, la biologie, la sociologie, etc., ont apporté (au moins sur le plan des métaphores) beaucoup aux SMA. Dans ce traité, nous nous intéressons aux SMA comme paradigme de conception et de développement de systèmes répartis et coopératifs.

1.2.1. *L'intelligence artificielle distribuée*

Après l'essor connu par les systèmes experts au début des années soixante-dix, les chercheurs du domaine se sont vite retrouvés confrontés au problème suivant : les systèmes experts sont monolithiques et présentent des limitations certaines dues essentiellement à la quantité croissante des connaissances (par exemple problèmes d'inférence, problème d'acquisition et d'évolutivité des connaissances, etc.) ainsi qu'à l'inadéquation d'un contrôle centralisé pour des applications de plus en plus distribuées.

Ainsi sont apparus les premiers travaux en IAD dont la préoccupation centrale était la distribution de systèmes à base de connaissances. Motivée essentiellement par un souci d'efficacité, la distribution a porté sur les connaissances (factuelles et/ou opératoires), ainsi que sur le contrôle.

En effet, contrairement à l'intelligence artificielle classique (IA) qui cherche à modéliser/simuler le comportement « intelligent » d'un seul agent, l'intelligence artificielle distribuée (IAD) s'intéresse à des comportements intelligents qui sont le « produit » de l'activité coopérative de plusieurs agents. A ce titre, on peut citer les travaux qui se sont développés dans les années 1980 autour des systèmes multi-experts, des systèmes à base de tableaux noirs (*blackboard systems*), etc. Pour résumer, l'intelligence artificielle distribuée visait :

- une meilleure structuration et organisation des connaissances factuelles et opératoires ;
- la traduction d'un ensemble d'expertises sous une forme unifiée, c'est-à-dire la gestion du pluralisme et l'intégration de plusieurs points de vue.

La distribution de l'expertise sur un ensemble d'entités qui communiquent pour atteindre un objectif global peut être de deux types.

1) Une distribution descendante qui consiste à diviser le problème en sous-problèmes et à les affecter aux différentes entités. Cette hypothèse n'est pas toujours aisée car beaucoup de problèmes ne peuvent être partitionnés.

2) Une distribution ascendante : l'atteinte d'un objectif global nécessite la synergie (connaissances, compétences, expertises, etc.) de plusieurs entités et dans

ce cas il faut être en mesure de gérer les incompatibilités, incohérences, contradictions, etc. Par conséquent, l'intégration multi-expertise a soulevé un autre problème qui est celui de la coopération entre plusieurs entités et leur coordination.

Ainsi une extension des systèmes d'IAD est proposée : les entités doivent être capables de raisonner sur les connaissances et les capacités des autres dans le but d'une coopération effective. Pour ce faire, ils doivent être dotés de capacités de perception et d'action sur l'environnement et doivent posséder une certaine autonomie de comportement, on parle alors d'agents et par conséquent de système multi-agent [DUR 87].

1.2.2. Développement des réseaux et des systèmes distribués

La généralisation des réseaux, la coopération entre plusieurs composants logiciels au sein d'environnements hétérogènes et distribués et le développement d'Internet ont ouvert la voie à de nouvelles applications SMA. Dans le cas des réseaux, on retrouve les travaux autour de la gestion de réseaux, les réseaux intelligents, etc. Dans le domaine d'Internet, les agents intelligents sont de plus en plus utilisés pour offrir de meilleurs services aux utilisateurs (par exemple recherche intelligente, assistance, commerce électronique, etc.). On peut citer également toutes les applications liées à la coopération des logiciels, des composants distribués, etc.

Le problème à résoudre ici est de faire collaborer des programmes/des agents logiciels, de les rendre adaptatifs, etc. Plusieurs travaux dans le domaine des systèmes distribués introduisent des concepts d'IAD tels que la répartition du contrôle, le concept de connaissance distribuée (telle que définie dans Fagin *et al.* [FAG 95]), etc. Pour la conception d'applications réparties et coopératives, les SMA sont apparus comme une alternative crédible aux modèles traditionnels. Cet intérêt pour les SMA est dû essentiellement au fait qu'une telle approche permet :

- la décomposition et la répartition des connaissances et des mécanismes de traitement dont l'unité de base est l'agent ;
- la dynamicité du contrôle de résolution d'un problème distribué caractérisée par l'organisation dynamique et l'affectation des tâches modifiables en cours de résolution ;
- l'aptitude à traiter des problèmes simultanés et potentiellement corrélés avec des optimisations éventuelles ;
- l'adaptativité et la possibilité d'apprentissage des agents qui leur confèrent la capacité de résister à des environnements évolutifs et/ou instables.

1.2.3. D'autres besoins en robotique ou en modélisation des écosystèmes

Le développement de la miniaturisation en électronique et la conception des robots autonomes avec des capacités élémentaires ont soulevé le problème de coopération des robots autonomes et ont contribué au développement de la problématique SMA en termes de coopération et de coordination multi-agent. Plusieurs travaux ont été développés autour de la coopération multi-robot au LAAS (voir par exemple [GAB 96]) ou dans le cadre du concours de la RoboCup (<http://www.robocup.org/>), etc. D'autres travaux proviennent du domaine des sciences du vivant (par exemple évolution des écosystèmes habités) qui ont eu recours aux SMA pour pallier le manque de techniques de modélisation et de simulation.

1.3. Définitions et typologie des agents

Les agents constituent les entités de base d'un SMA. Ils sont plus ou moins autonomes et potentiellement hétérogènes ; ils évoluent dans un environnement partagé et dynamique. Les agents peuvent être cognitifs (disposant d'aptitudes cognitives telles que la capacité de raisonner), intentionnels [BRA 87] (entités dotées d'attitudes intentionnelles telles que les croyances, les désirs et les intentions) ou encore rationnels (entités agissant selon une rationalité donnée telle que la rationalité économique).

Dans certains cas, les agents coopèrent pour résoudre des problèmes complexes nécessitant des compétences complémentaires ; on parlera d'agents coopératifs. Dans d'autres cas, ils seront en compétition pour cohabiter dans des situations de conflit ; on parlera d'agents compétitifs (*self-interested agents*). Signalons que les chercheurs du domaine ont essayé de balayer le spectre des attitudes humaines et de s'en inspirer allant des agents purement altruistes jusqu'aux agents égoïstes. Ces différents modèles sont particulièrement intéressants pour modéliser et/ou simuler des systèmes réels. Par exemple, la simulation d'un système économique ne peut pas faire l'hypothèse d'agents coopératifs.

1.3.1. Qu'est-ce qu'un agent ?

Il n'existe pas, aujourd'hui, de définition universelle des agents. Cependant, plusieurs chercheurs du domaine ont proposé des définitions plus ou moins convergentes. Une synthèse de ces propositions permet de dégager les principales caractéristiques d'un agent : c'est une entité située, capable d'agir dans un environnement, qui possède une représentation (plus ou moins complexe) de son environnement et interagit avec celui-ci ainsi qu'avec d'autres entités situées dans cet environnement. De plus, un agent possède un ensemble de buts qu'il cherche à accomplir et dispose d'un ensemble de ressources.