

# Introduction

Jean-Pierre Briot et Yves Demazeau

L'informatique est en train de changer de manière assez profonde. Tout d'abord, l'informatique devient ubiquitaire. Au départ confinée dans les ordinateurs, elle est en train d'investir les objets de la vie courante : téléphones portables, assistants personnels, maison, etc. Elle devient ainsi de plus en plus diffuse et distribuée dans de multiples objets et fonctionnalités qui sont amenés à coopérer. La décentralisation est donc la règle et une organisation coopérative entre modules logiciels est un besoin. De plus, la taille, la complexité et l'évolutivité croissantes de ces nouvelles applications informatiques font qu'une vision centralisée, rigide et passive (contrôlée explicitement par le programmeur) atteint ses limites. On est ainsi naturellement conduit à chercher à donner plus d'autonomie et d'initiative aux différents modules logiciels. Le concept de système multi-agent propose un cadre de réponse à ces deux enjeux complémentaires (et à première vue contradictoires) : autonomie et organisation.

## **Cet ouvrage**

Cet ouvrage a pour ambition de présenter les principes, techniques et exemples d'applications des systèmes multi-agents. Il est complémentaire de l'ouvrage de Jacques Ferber [FER 95], premier ouvrage en français présentant le domaine et paru en 1995. Notre ouvrage développe les concepts et techniques de base des systèmes multi-agents ainsi que de premiers domaines d'application (par exemple, le commerce électronique). Il ne développera pas la notion d'agent mobile ni la notion d'agent assistant d'interface (les raisons en seront précisées ci-dessous). Un deuxième ouvrage à paraître après ce premier ouvrage développera des aspects

complémentaires, par exemple méthodologiques, et d'autres applications, par exemple en robotique.

### **Cette introduction**

Cette introduction a pour objectif de motiver (pourquoi est-ce important) et également de situer rapidement le concept de système multi-agent (en particulier vis-à-vis de la programmation classique). Elle ne rentrera pas dans le détail des concepts et techniques (concepts d'architectures d'agents, de coordination, d'organisations, etc.) qui seront introduits dans les différents chapitres.

### **Qu'est-ce qu'un agent ?**

Il n'existe pas encore un consensus sur la définition d'un agent. En plus de la relative jeunesse du domaine, une des raisons est que diverses communautés revendiquent ce terme avec des problématiques parfois au départ assez différentes (par exemple en ce qui concerne les agents mobiles) même si ces différentes problématiques sont complémentaires et conduites à se rencontrer à terme.

Nous proposons une première définition suivante : “ un agent est une entité logicielle ou physique à qui est attribuée une certaine mission qu'elle est capable d'accomplir de manière autonome et en coopération avec d'autres agents ”. Quelques définitions alternatives seront données au début du chapitre 1.

### **Qu'est-ce qu'un système multi-agent ?**

La définition d'un système multi-agent (avec son acronyme SMA, et MAS pour “ multi-agent system ” en anglais) est plus immédiate : “ un système multi-agent est un ensemble organisé d'agents ”. Nous ne faisons que suivre ici la définition usuelle du terme système : “ un ensemble organisé d'éléments ”. Cela signifie que dans un système multi-agent, il existe une ou plusieurs organisations qui structurent les règles de cohabitation et de travail collectif entre agents (définition des différents rôles, partages de ressources, dépendances entre tâches, protocoles de coordination, de résolution de conflits, etc.). Dans un même système, il existe en général plusieurs organisations et un même agent peut appartenir à plusieurs simultanément. Des exemples d'organisations d'agents dans le monde réel sont une organisation économique telle qu'une entreprise, mais aussi une organisation animale telle qu'une fourmilière. Suivant les cas, les comportements des agents sont plus ou moins complexes et rationnels et l'organisation est plus ou moins adaptative. Central aux systèmes multi-agents est l'équilibre (et la complémentarité) entre autonomie et organisation.

Les agents sont en général situés dans un environnement (par exemple, topologique) contenant également des entités passives, manipulées par les agents (par exemple, des ressources, des données, des objets physiques...) et communément appelées objets. Chaque agent n'a qu'une connaissance partielle de son environnement et des autres agents. Un système multi-agent est donc intrinsèquement décentralisé.

### **Un premier exemple**

Comme premier exemple, considérons le projet d'envoyer un robot sur une planète lointaine pour l'explorer. Le délai de communication avec la Terre est tel qu'il est difficile d'envisager un contrôle direct à partir du sol. Il est donc indispensable de doter un tel robot d'autonomie et d'initiative, de manière à prendre des décisions en fonction de la situation locale avec une réactivité suffisante. Ceci n'empêche pas bien sûr de maintenir une communication régulière avec le sol pour recevoir des informations et si besoin réajuster la mission.

Plutôt que d'envoyer un seul robot multi-spécialisé (locomotion, vision, prélèvement d'échantillons, analyse, communication avec la Terre, etc.), il peut être intéressant d'y substituer plusieurs robots. Ils pourront être spécialisés (par exemple, un robot spécialisé dans les prélèvements, un autre dans les analyses – ce dernier étant éventuellement immobile -, etc.). Mais ils devront coopérer et coordonner leurs activités à partir de leurs connaissances et comportements locaux. Une telle spécialisation selon les expertises rend une conception et une construction plus aisées qu'un robot unique qui doit savoir tout faire. Une telle organisation offre également une meilleure efficacité potentielle (du fait des tâches pouvant être effectuées en parallèle). De plus si l'on assure une certaine redondance (par exemple plusieurs robots d'analyse), cela assure une certaine robustesse à l'ensemble du système en cas de panne d'un de ses éléments. Ceci est donc un premier exemple de système multi-agent. Dans ce cas, les agents sont robotiques (on parle de robotique collective). Un autre exemple est celui de la surveillance de réseaux où l'on délègue des tâches de surveillance, détection d'anomalies, diagnostic et réparations à différents agents logiciels coopératifs.

### **Pourquoi est-ce important ?**

Des domaines d'application privilégiés des systèmes multi-agents sont par exemple le commerce électronique (voir le chapitre 6), le contrôle de processus et la robotique collective. Ainsi, les principaux industriels des télécommunications dans le monde animent une initiative de standardisation des agents et en premier lieu de

leur interopérabilité : la “ Foundation for Intelligent Physical Agents ” [FIPA]. Ceci sera notamment détaillé dans le chapitre 3. D’autres domaines d’application se concrétisent, tels les loisirs, la simulation de phénomènes complexes (voir le chapitre 7), etc.

### **Positionnement historique**

On voit que les systèmes multi-agents se positionnent au carrefour de la programmation (ce sont des logiciels), de l’intelligence artificielle (leur autonomie de décision), et des systèmes répartis (leur décentralisation). Historiquement, on peut replacer le concept d’agent et de système multi-agent dans l’histoire de l’intelligence artificielle et de manière duale dans l’histoire de la programmation.

La notion d’agent rationnel est de fait à la base des débuts de l’intelligence artificielle (IA). Mais cette discipline s’est focalisée sur la modélisation des capacités intelligentes d’une unique entité pour résoudre des problèmes. Il en a résulté une première génération de programmes informatiques évolués, tels les systèmes experts. Mais, même restreint à un domaine spécialisé (domaine expert), un tel agent rationnel système expert était censé résoudre tout seul les problèmes de manière autarcique. L’accent a donc été mis progressivement à partir de la fin des années 70 sur une résolution distribuée de problèmes, par coordination d’un certain nombre d’agents rationnels, ce que l’on a alors commencé à appeler “ systèmes multi-agents ”. On utilise également le terme quasiment équivalent “ IA distribuée ” (avec son acronyme IAD, en anglais DAI) pour bien montrer l’opposition à l’IA classique autarcique et centralisée.

Un autre problème d’autarcie des systèmes experts était l’autarcie sociale. Comme ils avaient pour objectif de remplacer les experts humains, ces derniers se retrouvaient “ hors de la boucle ” avec les conséquences sociales que l’on imagine (désintérêt, déresponsabilisation, inquiétude, etc.). Certains chercheurs ont alors fait évoluer l’objectif initial d’agents rationnels remplaçant l’homme, vers l’objectif de concevoir des assistants intelligents qui puissent aider l’homme en automatisant et en prenant l’initiative de certaines tâches. Ceci s’est concrétisé en particulier dans le domaine des interfaces homme machine. Par opposition aux interfaces homme machine à manipulation directe, l’agent assistant intelligent est ainsi introduit comme une secrétaire (virtuelle) douée d’initiative, complément d’un logiciel (par exemple, un éditeur de mail) qui apprend vos usages et besoins et peut ainsi les anticiper (par exemple, classer vos messages, automatiser certaines réponses, faire référence à des messages anciens, etc.) [MAE 94].

Si l’on replace maintenant la notion d’agent dans l’histoire de la programmation, on peut voir l’évolution à deux niveaux. Au plan individuel, l’agent se caractérise

par une notion d'action persistante [GAS 99], qui tente de manière autonome (et avec initiative) d'accomplir une certaine mission qui lui a été assignée. On sort donc du cadre procédural classique, ce qui permet à l'agent de faire face à des situations non nécessairement prévues à l'avance par le concepteur. On sort également du cadre uniquement déclaratif, puisque l'agent doit pouvoir contrôler lui-même (forme supplémentaire d'autonomie) l'utilisation de ses ressources pour accomplir sa mission. Au plan collectif, on peut aussi considérer l'idée de système multi-agent comme une évolution de la notion de composant logiciel (objet) pour lequel le couplage entre composants est abordé au niveau des connaissances et pas au niveau des types de données [JEN 99]. Ceci permet donc un couplage sémantiquement de niveau plus élevé et donc moins rigide et plus adaptable.

### **Tour d'horizon**

Le terme agent recouvre beaucoup de sens différents suivant les communautés et les domaines d'applications et donc les perspectives et techniques mises en avant. Nous introduisons ci-dessous un certain nombre de "domaines" ou "points de vue" sur les agents. Ils correspondent pour certains à différents points de vue historiques qui auront forgé une certaine vision des agents, et pour d'autres à des points de vue applicatifs qui auront amené certaines problématiques plus ou moins spécifiques (par exemple, la mobilité d'agents). Ce paragraphe ne prétend donc pas être une typologie complète, mais se veut plutôt un tour d'horizon.

Notez que ces différents domaines possèdent de ce fait plus ou moins de recouvrements entre eux. On peut voir également qu'ils cadrent plus ou moins complètement avec la définition que nous avons donnée plus haut d'un agent, car cela dépend des caractéristiques (autonomie, organisation, mais aussi : raisonnement, mobilité, apprentissage, etc.) qui sont mises en avant selon chaque domaine.

- agent cognitif - L'intelligence artificielle (IA) classique s'est concentrée très tôt sur l'expression, sur des bases logiques, du comportement délibératif d'un agent rationnel en fonction de ses croyances et buts. Ceci a donné lieu plus tard aux premières architectures modernes d'agents dits cognitifs (par exemple Agent0 et BDI, voir au chapitre 2).

- agent logiciel - Les premiers et les plus simples sont les démons Unix (processus informatiques autonomes capables de se réveiller à certaines heures ou en fonction de certaines conditions). Les virus informatiques en sont des versions déjà plus sophistiquées (notamment douées de la capacité de reproduction) et malfaisantes. Notons qu'il est difficile de donner une définition actuelle (consensuelle) du terme agent logiciel. Cela sous-entend souvent aussi une encapsulation en agent ("agentification") de programmes ou de bases de données

plus traditionnels, de manière à favoriser leur coopération. En tout cas, ce terme s'oppose au terme agent physique, tel un robot.

- agent mobile - La première plate-forme d'agents mobiles est Telescript, née dans la première moitié des années 90. Elle a depuis donné lieu à de nombreux descendants, extensions du langage Java (Aglets, Voyager, etc.). L'idée est de donner la capacité à un agent logiciel de se déplacer d'une machine à une autre en fonction des données et informations à traiter ainsi localement. La première motivation est généralement la minimisation des communications distantes (il est en général moins coûteux de migrer le code de traitement que les données à traiter, qui peuvent être beaucoup plus volumineuses). Une autre motivation est le cas de l'informatique nomade (l'agent mobile peut continuer ses traitements sur des serveurs pendant la déconnexion de la machine cliente). L'exemple classiquement mis en avant est la recherche de produits (par exemple un CD) au meilleur prix sur des serveurs commerçants. Les problèmes principaux actuels sont liés à la sécurité et à l'interopérabilité des agents mobiles sur les différentes plates-formes d'accueil.

- agent assistant - Pour dépasser les limitations des interfaces homme machine à manipulation directe (rigidité, complexité, etc.), les agents assistants (aussi appelés agents intelligents), apportent une adaptation au profil de l'utilisateur et une capacité à anticiper leurs besoins (automatiser certaines tâches, rappeler certaines informations utiles, etc.). Ceci peut se transposer dans le domaine du collectif. Prenons l'exemple d'un rendez-vous entre plusieurs personnes, mis en place par la coopération de leurs agents assistants respectifs (pouvant résider sur des agendas électroniques (PDAs) ou ordinateurs).

- agent robotique - On peut considérer l'architecture logicielle de contrôle d'un robot comme un agent. Cette architecture peut d'ailleurs être testée et entraînée en simulation avant d'être mise en œuvre dans un vrai robot. Cependant la réalité physique d'un robot apporte des problèmes spécifiques (imprécision de la perception et de l'action, aspects temps réel, évolution du monde) qui rendent particulièrement difficile, mais aussi particulièrement riche, la conception de tels agents robotiques. On peut aussi envisager des coopérations entre robots, par exemple dans le cadre de la compétition de robots footballeurs (RoboCup), présentée par ses organisateurs comme un nouveau problème étalon de l'intelligence artificielle.

- résolution distribuée de problèmes - Historiquement, le point de départ des systèmes multi-agents est la résolution distribuée (décentralisée) de problèmes (acronyme DPS en anglais). L'accent a été mis sur les techniques de coordination (et donc les modèles d'organisations) entre divers agents autonomes amenés à résoudre un problème ensemble (par décomposition du problème, allocation des tâches, échange de plans, détection et résolution d'incohérences, et recombinaison des résultats partiels, etc.). De tels modèles de résolution distribuée sont appliqués à des domaines variés, comme le contrôle de processus et le commerce électronique.

- agent réactif - En complément de l'approche "résolution distribuée" décrite ci-dessus, qui est principalement cognitive et d'approche descendante, s'est développée (en particulier en France, comme le fait remarquer Les Gasser dans sa préface) une approche ascendante de la conception de systèmes multi-agents. Cette approche alternative est souvent basée sur l'émergence de comportements collectifs à partir de comportements individuels relativement simples (réagissant à des stimuli, d'où leur nom d'agents réactifs) et n'ayant pas ou très peu de capacités de représentation et de raisonnement. Les métaphores issues de sociétés animales (le plus souvent des fourmis) fournissent en particulier des bases de comportements possédant des propriétés collectives recherchées (par exemple, la collecte et le tri pour des robots, le routage adaptatif pour des réseaux).

- vie artificielle - Le domaine de la vie artificielle est né comme alternative à l'intelligence artificielle classique. L'idée est de chercher à modéliser et simuler les propriétés fondamentales de la vie (adaptation, reproduction, etc.) plutôt que des systèmes intelligents (par exemple, un joueur d'échecs ou un démonstrateur de théorèmes) mais très fragiles et inaptes à la vie réelle. On procède par importation (et donc détournement) de métaphores issues de la vie réelle et à leur application informatique (par exemple comme techniques d'optimisation ou d'adaptation). Des exemples maintenant classiques sont : les réseaux de neurones artificiels issus de la neurophysiologie, les algorithmes génétiques issus de la théorie de l'évolution et de la génétique, et les algorithmes inspirés de fourmis déjà mentionnés ci-dessus. Certaines approches d'adaptation ou d'évolution des agents proviennent de la vie artificielle.

- simulation multi-agent - Pour certains phénomènes complexes dont on ne connaît pas de modèle global (par exemple des équations différentielles pour la dynamique des fluides), une alternative est de modéliser directement les comportements des entités concernées ainsi que leurs interactions. Ceci peut s'appliquer à des phénomènes physiques (par exemple des milieux granulaires), sociaux, écosystèmes, etc. Ce domaine est en pleine expansion et est introduit au chapitre 7.

- agent de loisir - Notre société de loisir est à la recherche de compagnons de loisir autonomes et en interaction avec nous. Les jeux vidéo les plus récents intègrent des personnages dont les comportements recherchés sont de plus en plus sophistiqués et donc intéressants pour les joueurs. Le robot chien Aibo de Sony représente une des versions les plus avancées technologiquement d'un tel agent de loisir (physique).

### **Les systèmes multi-agents comme combinaison de perspectives**

Les différents domaines d'agents vus ci-dessus ne sont généralement pas mutuellement exclusifs et peuvent être combinés, car complémentaires. Notons à ce propos, que tous ces différents domaines d'agents partagent la notion d'autonomie, premier enjeu que nous avons mis en avant. Par contre, ils respectent plus ou moins le deuxième enjeu, l'organisation (collective). Par exemple, les agents mobiles restent actuellement encore fondamentalement des solitaires. Mais ils auraient beaucoup à gagner à communiquer, ou encore mieux à coopérer entre eux (par échange d'informations, division et coopération des tâches, etc.). Il existe d'ailleurs un continuum entre des agents autonomes mais complètement solitaires et des systèmes d'agents complètement organisés, les agents communicants se situant quelque part entre les deux.

De manière plus générale, comme nous l'avons déjà signalé au début de cette introduction, la décentralisation des logiciels devient maintenant inéluctable du fait de la complexité des applications informatiques. La double problématique d'autonomie et d'organisation, à la base des systèmes multi-agents, va donc à notre avis concerner progressivement tous les domaines actuels des agents (et de l'informatique).

### **Domaines abordés et non abordés dans cet ouvrage**

Dans cet ouvrage, nous nous concentrerons donc sur les " systèmes multi-agents ", dans lesquels la double problématique d'autonomie et d'organisation est fondamentale. Nous avons préféré laisser de côté (au moins dans ce premier ouvrage) la description en tant que telle de deux sous-domaines pourtant importants des agents : les agents mobiles et les agents assistants. Ceci, car ils sont restés, pour le moment encore, suffisamment distincts des systèmes multi-agents. Les travaux principaux en matière d'agents mobiles portent sur la mobilité et la sécurité. Les travaux principaux sur les agents assistants, dont la caractéristique principale est la capacité d'initiative et de conseil, portent sur les techniques d'apprentissage du profil d'utilisation.

Notez cependant que la problématique générale de l'apprentissage des agents (et pas juste du profil d'utilisation) est un sujet important et actuel, en particulier l'apprentissage collectif pour les systèmes multi-agents. Ce sujet devrait d'ailleurs être abordé sous forme d'un chapitre dans le prochain ouvrage.

Notez également que la notion d'organisation, pourtant parmi les notions centrales des systèmes multi-agents, ne fait pas encore l'objet d'un chapitre distinct dans ce premier ouvrage. Sa nature plutôt conceptuelle qu'informatique fait qu'elle " diffuse " en fait à de multiples niveaux, en particulier : pour l'aspect statique, les

représentations mutuelles des compétences et activités entre plusieurs agents, qui sont décrites au chapitre 2 sur les architectures d'agents ; pour l'aspect contrôle dynamique, les protocoles de coordination des activités, qui sont décrits au chapitre 4 sur la coordination d'agents cognitifs ; pour l'aspect méthodologie de conception, la définition des différents rôles pour une organisation et spécialisation du travail, qui devrait être abordée sous forme d'un chapitre sur les méthodologies dans le prochain ouvrage.

### **Plan de l'ouvrage**

Le chapitre 1 "Principes généraux et applications" introduit les principes et de premiers exemples d'application des systèmes multi-agents. Le chapitre 2 "Modèles et architectures d'agents" détaille les principes de conception et construction d'un agent à travers ce qu'on appelle une architecture d'agent. Le chapitre 3 "Modèles de communication" présente les moyens d'interaction entre les agents par ce que l'on appelle des langages de communication. Le chapitre 4 "Modèles de coordination d'agents cognitifs" traite des techniques de coordination entre agents pour accomplir des tâches en commun, selon une organisation collective. Le chapitre 5 "Environnements de développement" présente les environnements de développement effectif d'agents, en particulier ce que l'on appelle des plates-formes de construction et d'exécution d'agents. Le chapitre 6 "Application des systèmes multi-agents dans les télécommunications" introduit les diverses applications des systèmes multi-agents au domaine des télécommunications (réseau, recherche d'information et commerce électronique). Le chapitre 7 "Systèmes multi-agents et écosystèmes" introduit un domaine en pleine expansion des systèmes multi-agents, celui de la simulation, en particulier des écosystèmes.

Une bibliographie par chapitre puis un index thématique commun à tous les chapitres complètent cet ouvrage.

### **Remerciements**

Nous remercions en premier lieu les auteurs des différents chapitres pour leurs contributions et leur coopération tout au long de la conception de cet ouvrage. Nous remercions Jean-Charles Pomerol, directeur de collection, pour avoir initié ce projet et pour ses commentaires constructifs. Nous remercions Les Gasser pour nous avoir fait l'honneur de la préface. Nous remercions enfin l'équipe d'Hermès pour leur support technique.

## Bibliographie

- [BRA 97] BRADSHAW J.M., (éditeur), Software Agents, AAAI Press - MIT Press, 1997.
- [FER 95] FERBER J., Les Systèmes Multi-Agent - Vers une Intelligence Collective, InterEditions, 1995.
- [FIPA] [www.fipa.org](http://www.fipa.org).
- [GAS 99] GASSER L., Agents and Concurrent Objects – Interview of Les Gasser by Jean-Pierre Briot, Special Series on Actors and Agents, éditée par Dennis Kafura et Jean-Pierre Briot, IEEE Concurrency, vol. 6, n° 4, pages 74-81, octobre-décembre 1998.
- [MAE 94] MAES P., Agents that Reduce Work and Information Overload, Special Issue on Intelligent Agents, éditée par Doug Riecken, Communications of the ACM, vol. 37, n° 7, pages 30-40, juillet 1994.
- [JEN 99] JENNINGS N.R., On Agent-Based Software Engineering, Artificial Intelligence, n° 117, pages 277-296, 2000.

## Index

agent,2  
agent assistant,4,6,8  
agent cognitif,5

agent de loisir,7  
agent intelligent *Voir* agent assistant  
agent logiciel,5

agent mobile,6,8  
agent rationnel,4  
agent réactif,7  
agent robotique,6  
agentification,5  
apprentissage,8  
apprentissage collectif,8  
architecture,9  
autonomie,1,5,8  
commerce électronique,9  
communication,9  
coordination,9  
DAI *Voir* intelligence artificielle  
distribuée  
définition,2  
développement,9  
DPS *Voir* résolution distribuée de  
problèmes  
écosystème,9  
environnement,3  
IA *Voir* intelligence artificielle

IAD *Voir* intelligence artificielle  
distribuée  
intelligence artificielle,4  
interaction,9  
MAS *Voir* système multi-agent  
objet,3  
organisation,1,2,8  
plate-forme,9  
principes,9  
résolution distribuée de problèmes,6  
robot,3,6  
simulation,9  
simulation multi-agent,7  
SMA *Voir* système multi-agent  
système,2  
système expert,4  
système multi-agent,2,3,8  
télécommunication,9  
vie artificielle,7  
virus,5