

Revue Internationale de

ISSN 0980-1472

systemique

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUÉE :
MODÈLE OU MÉTAPHORE
DES PHÉNOMÈNES SOCIAUX

Vol. 8, N° 1, 1994

afcet

DUNOD

AFSCET

Revue Internationale de
systemique

Revue
Internationale
de Sytémique

volume 08, numéro 1, pages 13 - 27, 1994

La kénétique : des systèmes multi-agents
à une science de l'interaction

Jacques Ferber

Numérisation Afscet, janvier 2016.



Creative Commons

LA KÉNÉTIQUE : DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS A UNE SCIENCE DE L'INTERACTION

Jacques FERBER ¹

Résumé

Cet article propose une nouvelle approche de la systématique fondée sur la notion d'interaction entre entités autonomes. Alors que la systématique prend généralement un point de vue purement holiste sur les systèmes, et considéré qu'il est impossible d'analyser les parties indépendamment du tout, nous montrons au contraire que le tout, bien qu'étant plus que la somme des parties, émerge des interactions entre ces dernières, à condition qu'elles disposent chacune d'un comportement autonome. La kénétique considère en effet que la structuration des systèmes complexes résulte de l'interaction entre entités relativement autonomes et indépendantes, appelées *agents* qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, conflit, concurrence, pour survivre et se perpétuer. De ces interactions émergent des structures organisées qui, en retour, contraignent et modifient les comportements des ces agents.

Abstract

This paper introduces the field of *kenetics*, which proposes a new approach of general system theory based on the concept of interaction between autonomous entities. Whereas general system theories consider that parts cannot be analysed independently of the whole, we show that the whole, although being more than the sum of its parts, emerges from interactions of agents considered as autonomous entities. Conversely, emerging organizations constrain and modify agent's behavior, through processes of cooperation, competition, conflict and conflict resolution.

I. INTRODUCTION

Le courant systématique, bien qu'ayant toujours considéré l'importance des interactions pour la définition des systèmes, a plus mis l'accent sur l'analyse des flux entrants et sortants que sur l'aspect comportemental des interactions. En effet, la

1. Laforia-Ibp, URA CNRS, Université Paris VI-B169, 75252 Paris, Cedex 05, France, ferber@laforia.ibp.fr.

partie proprement opératoire de l'analyse systémique, depuis ses débuts avec V. Bertalanffy (Bertalanffy, 1968), N. Wiener (Wiener, 1948) et surtout J. W. Forrester (Forrester, 1980), s'est surtout consacrée à l'analyse des systèmes biologiques, économiques et artificiels sous l'angle de transfert de flux de matières, d'énergies, d'informations ou d'argent entre différents éléments de stockages, de commande ou de régulation. Même les premiers travaux de J.-L. Le Moigne sur la théorie du système général (Le Moigne, 1977) ou ceux de P. Delattre sur les structures organisées (Delattre, 1971) avaient repris cette idée devenue classique de considérer un système comme un ensemble de sous-systèmes interconnectés par des liens servant à transférer des flux ou à contrôler leur activité.

Bien que très utile dans de nombreux domaines, tels que l'organisation d'entreprise ou la réalisation de dispositifs électroniques, et en dépit de son universalité proclamée, cette approche s'avère en fait limitante puisque les seules notions véritablement fécondes sont celles de régulation, de stabilisation et de fonctions de transfert. Comme l'indique en effet un ouvrage récent sur l'analyse des systèmes (Lapierre, 1992), « le concept de systèmes tel que nous le concevons ici n'est pas un concept d'objet, c'est un concept d'outils. [...] Ces systèmes sont des entités abstraites, non des parties concrètes de cette totalité ». Dans cette approche, un être humain ou une entreprise est décomposé en sous-systèmes, chaque sous-système répondant à une fonction particulière de l'entreprise telle que la consommation, la production, la recherche, la conception (*design*), l'échange et la gestion (Charest, 1980). Ces sous-systèmes résument les caractéristiques du système étudié au travers d'une approche analytique, pourtant récusée, qui ne permet pas de comprendre l'évolution du système ni de comprendre les facteurs internes d'une organisation. Le systémisme devient alors un concept « fourre tout » qui se réduit parfois à du fonctionnalisme déguisé.

Il existe néanmoins un deuxième courant fort représenté actuellement, de E. Morin (Morin, 1977) à Varela (Varela, 1989), en passant par H. Atlan (Atlan, 1979), Prigogine (Prigogine et Stengers, 1979) ou E. Bernard-Weil (Bernard-Weil, 1988) qui consiste à comprendre les systèmes comme des entités auto-organisatrices, dont le fonctionnement et l'évolution est le produit du comportement d'un ensemble d'entités en interactions. Cependant, à part peut-être avec la notion d'autopoïèse de Maturana et Varela (1987) qui postule qu'un système auto-organisateur n'a pas d'autre fonction que de maintenir sa structure organisée, l'accent est toujours mis sur les flux d'interconnexion et sur la modélisation des boucles de rétroaction.

Quelques travaux remarquables, tels que ceux de F. Le Gallou (Le Gallou, 1992) ou d'Eric Schwartz (Schwartz, 1993), tentent d'unifier ces deux voies. Mais ces

entreprises, qui cherchent plus à expliquer de manière qualitative les phénomènes qu'à en donner un modèle opératoire, abordent les systèmes de manière holiste (un système est un tout) et ne tiennent compte que de manière marginale du comportement des entités qui les composent. Car, définir un système par ses relations globales ne permet pas d'expliquer la genèse de sa structure, mais seulement d'étudier les formes générales de son évolution à partir d'un point de vue macroscopique. Cette approche ignore ainsi l'importance des actions individuelles qui concourent à l'élaboration de la structure et donc à l'organisation du système en tant que tel.

Nous proposons au contraire de développer une approche systémique qui soit fondée sur l'analyse des comportements d'agents interagissants, l'auto-organisation des systèmes étant alors le produit des actions transformatrices de ces agents. Cependant, par manque de place, nous ne pourrions présenter en détail la diversité des mécanismes d'interaction et en particulier ceux qui ont trait à l'allocation de tâches, à la coordination d'action et à la négociation. Nous renvoyons le lecteur intéressé par ces domaines à Ferber (1994).

II. PRINCIPES DE LA KÉNÉTIQUE

La kénétiq, terme constitué à partir du terme grec *koinon* qui signifie « ce qui est commun », considère que la structuration des systèmes complexes résulte de l'interaction entre entités relativement autonomes et indépendantes, appelées *agents* qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, conflit, concurrence, pour survivre et se perpétuer. De ces interactions émergent des structures organisées qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents.

Le projet de la kénétiq est de pouvoir étudier, concevoir et réaliser des univers ou des organisations d'*agents artificiels* (électroniques ou informatiques) capables d'agir, de collaborer à des tâches communes, de communiquer, de s'adapter et de se reproduire, éventuellement de se représenter l'environnement dans lequel elles évoluent et de planifier leurs actions, pour répondre soit à des objectifs définis extrinsèquement (par un programmeur humain par exemple), soit intrinsèquement à partir d'un objectif général de survie.

La kénétiq est donc la science des *organisations artificielles*¹, que l'on appelle ces organisations population, sociétés, groupes, mondes ou univers. On dira aussi que la kénétiq procède par construction de *systèmes multi-agents*, c'est-à-dire par la réalisation de modèles réduits électroniques ou informatiques composés d'entités artificielles qui communiquent entre elles et agissent dans un environnement.

Plus précisément, la kénétique se propose de :

- Définir une forme de systémique qui prenne en compte l'interaction entre agents agissant comme l'élément premier pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des systèmes ;
- Définir les différentes formes d'interactions telles que la coopération, la compétition, l'encombrement, etc. et les relier à la problématique de la performance ou de la survie du système et à celle de l'auto-organisation ;
- Dégager les grands mécanismes donnant lieu à l'auto-organisation, tels que le regroupement, la spécialisation, la répartition des tâches et des ressources, la coordination d'action, la résolution de conflits, etc. ;
- Définir des modèles opératoires de ces interactions en décrivant le fonctionnement des agents et des systèmes multi-agents.

C'est ainsi, en mettant l'accent sur les interactions, et plus exactement en analysant les systèmes d'interactions qui existent entre les agents, que les systèmes multi-agents se distinguent des approches systémiques plus classiques en prenant le parti de l'émergence c'est-à-dire de l'action et de l'interaction comme élément moteur de la structuration de la société dans son ensemble.

III. L'AGENT ET LA SOCIÉTÉ

Toute la problématique des systèmes multi-agents se situe au carrefour des notions d'agents et de sociétés, ou si l'on préfère, de la relation entre les comportements individuels et les phénomènes observés au niveau global. C'est ainsi que dans la dialectique de l'individu et du groupe que les notions de coopération, conflits, collaboration et coordination d'actions prendront tout leur sens. Mais avant d'entrer plus avant dans cette problématique, nous devons essayer de circonscrire ce que l'on entend par les termes d'agent et de système multi-agents.

III.1. Quelques définitions

Qu'est-ce qu'un agent ? Comme dans tous les domaines porteurs, le terme *agent* est utilisé de manière assez vague. Cependant on peut dégager une définition minimale commune qui est approximativement la suivante :

DÉFINITION. - On appelle agent une entité physique ou virtuelle qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui est capable de percevoir son environnement, mais ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et parfois aucune), qui peut communiquer avec d'autres agents,

qui poursuit un objectif individuel, qui possède des compétences et peut éventuellement se reproduire et dont le comportement est la conséquence de ses objectifs, de sa perception, de ses représentations, de ses compétences et des communications qu'il peut avoir avec les autres agents.

Chacun des termes de cette définition est important. Une *entité physique* est quelque chose qui agit dans le monde réel : un robot, un avion ou une voiture sont des exemples d'entités physiques. En revanche, un composant logiciel, un module informatique sont des entités virtuelles, car elles n'existent pas physiquement. Les agents n'ont qu'une représentation partielle de leur environnement, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de vision globale de tout ce qui se passe. C'est exactement ce qui se passe dans toutes les réalisations humaines d'envergure, telles que la fabrication d'un Airbus, dans lesquelles personne ne connaît tous les détails de l'appareil, chaque spécialiste n'ayant qu'une vue partielle correspondant à son domaine de compétence.

Les agents sont capables d'agir, et non pas seulement de raisonner comme dans les systèmes d'intelligence artificielle classique. L'action est un concept fondamental qui repose sur le fait que les agents accomplissent des actions qui vont elles-mêmes modifier l'environnement des agents et donc leurs prises de décision futures.

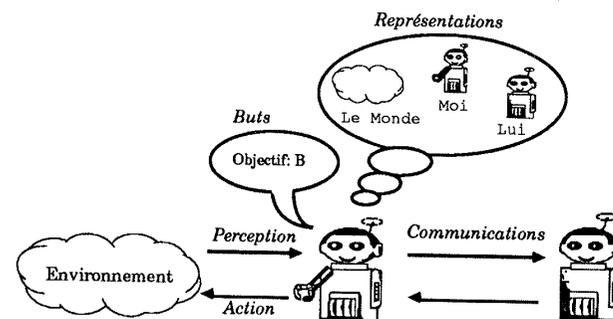


Figure 1.

Les agents sont doués d'autonomie, ou tout du moins d'une autonomie de comportements. Cela signifie qu'ils ne sont pas dirigés par des commandes venant de l'utilisateur, mais par un ensemble de buts propres à chaque agent. Enfin, *communication* et *comportement* sont deux notions très importantes en intelligence artificielle distribuée. Elles expriment le fait d'une part que les agents ne sont pas

de purs « raisonneurs » mais que le fait qu'ils agissent est essentiel, et d'autre part qu'il est nécessaire à ces agents de communiquer pour coopérer et coordonner leurs actions. La figure 1 donne une illustration de la notion d'agent.

Il est maintenant possible de définir ce qu'est un système multi-agents.

DÉFINITION. – On appelle système multi-agents, un système composé des éléments suivants :

- Un espace environnemental E, c'est-à-dire un espace muni au moins d'une topologie et plus généralement d'une notion de distance,
- Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E.
- Un sous-ensemble A de O qui représente les entités actives du système, les agents.
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux (par exemple : le fait qu'un agent soit une des *accointances* d'un autre agent).
- Un ensemble d'opérations F permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.

Il existe un cas particulier de systèmes dans lequel $A = O$, et E se résume à la topologie induite par R, c'est-à-dire à la définition d'un réseau : chaque agent est lié directement à un ensemble d'autres agents, que l'on appelle ses « accointances ». Ces systèmes, que l'on peut appeler systèmes *multi-agents réticulés*, sont très courants en intelligence artificielle distribuée. Leur domaine de prédilection est la coopération de modules logiciels dont la fonction est de résoudre un problème ou d'élaborer une expertise (interprétation de signaux ou conception d'un produit par exemple) à partir de modules spécialisés, comme dans le cas d'un système de contrôle distribué, où E est défini par la structure du réseau sous-jacent.

A l'inverse, les systèmes *multi-agents situés* sont positionnés dans un espace métrique, et prennent en compte le problème de la perception des objets dans cet espace (reconnaissance des objets situés dans l'univers, limitation de la perception du monde) et celui de l'action dans le monde, c'est-à-dire des transformations de l'état de l'univers physique dans lequel sont plongés les agents. Les interactions entre agents peuvent alors s'effectuer aussi bien par des mécanismes de communication direct que par l'intermédiaire d'actions dans l'environnement physique. Nous verrons en particulier que la plupart des systèmes multi-agents réactifs considèrent que la notion d'espace environnemental est fondamentale pour la coordination d'action entre plusieurs agents. Par exemple, dans un univers de robots, les agents A sont les robots, E est l'espace géométrique euclidien dans

lequel se meuvent les robots et O se compose évidemment des agents, mais aussi de l'ensemble des objets physiques placés ici et là, et que les robots doivent éviter, prendre ou manipuler. Les opérations F sont les actions que les robots peuvent faire en se déplaçant, en bougeant les autres objets ou en communiquant, et R est l'ensemble des relations qui unissent certains agents à d'autres, telles que des relations d'accointances (certains agents en connaissent d'autres) et les relations de communicabilités (les agents peuvent communiquer avec certains agents mais pas nécessairement à tous).

De ce fait, la dualité agent/environnement est située au cœur de la kénétique. En agissant à partir de ses perceptions de l'espace physique et des communications directes qu'il reçoit, l'agent se définit comme l'image duale de son environnement, c'est-à-dire par ce qui le distingue de ce qui l'entoure. Inversement, l'environnement d'un agent est caractérisé par tout ce qui n'est pas lui. Il est donc impossible de définir la notion d'agent indépendamment de celle d'environnement, les deux étant intrinsèquement liées et constituant deux aspects complémentaires d'un univers multi-agents. La réalisation d'un système multi-agents passe ainsi par la définition simultanée de la structure des agents et de celle de leur environnement, les actions de ceux-là devant s'exécuter au sein de celui-ci.

III.2. Niveaux d'organisation

On peut distinguer trois niveaux d'organisation dans les systèmes multi-agents :

- Le niveau *micro-social*, où l'on s'intéresse essentiellement aux interactions entre agents, et aux différentes formes de liaisons qui s'expriment entre deux ou un petit nombre d'agents.
- Le niveau des *groupes partiels*, où l'on s'intéresse aux structures intermédiaires qui interviennent dans la composition d'une organisation plus complète. A ce niveau on étudie les différenciations des rôles et des activités des agents, l'émergence de petites structures organisatrices entre agents, et le problème général de l'agrégation des agents lors de la constitution d'organisations.
- Le niveau des *sociétés globales (ou populations)* où l'intérêt repose surtout sur la dynamique d'un grand nombre d'agents, et sur la structure générale et son évolution. A ce niveau, les organisations multi-agents sont considérées comme des systèmes régulés.

Cette classification suggère qu'il est possible d'analyser et de concevoir des organisations artificielles soit à partir d'une spécification globale de la société que

l'on veut obtenir et des propriétés recherchées, soit au contraire à partir de la définition fine des agents, la société finale étant la conséquence – recherchée ou non – des interactions entre les agents.

La première approche est descendante et caractéristique d'une démarche d'ingénieur cherchant à obtenir un système qui réponde à un besoin. La seconde, qui est ascendante, est plus expérimentale, et s'accommode mieux d'un travail exploratoire dans lequel on tente d'obtenir des propriétés émergentes. Mais ces deux approches ne sont pas antinomiques : ce n'est qu'à partir d'études ascendantes permettant de connaître les relations existant entre le niveau de l'agent et celui de l'organisation qu'il est possible de construire des sociétés répondant à des besoins précis comme nous le verrons section V.

Le travail portant sur les organisations artificielles se situe donc au centre d'une autre dualité irréductible mettant en jeu les agents et l'organisation : toute organisation est le résultat d'une interaction entre agents, et le comportement des agents est contraint par l'ensemble des structures organisatrices, comme le montre la figure 2.

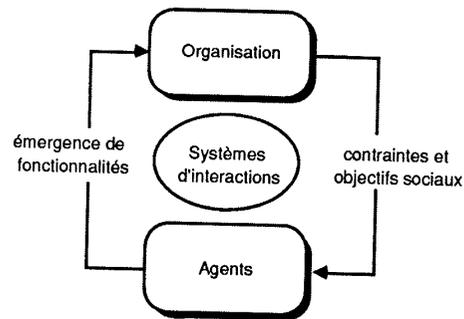


Figure 2.

Par exemple, si la différenciation comportementale et la constitution de spécialistes peuvent être vues comme des fonctionnalités émergentes de certains systèmes multi-agents, l'attribution d'un rôle à chaque agent réduit d'autant la marge de manœuvre de chacun et impose donc des contraintes à chacun des agents sur l'ensemble de ses comportements possibles.

Le rapport qui existe entre agent et organisation est une réalité mouvante. Sauf dans les cas où l'organisation est décrite intégralement par le concepteur du système, la répartition du travail, la coordination des actions et l'assignation des rôles résultent des activités des agents. Une organisation n'est donc pas seulement une

structure statique telle qu'on peut l'analyser si l'on considère un système multi-agents à un moment donné, mais comme un processus organisateur dont la structure n'est qu'un effet résultant. Cette conception rejoint celle de M. Crozier et E. Friedberg sur les organisations humaines (Crozier et Friedberg, 1977), où ces dernières sont considérées comme procédant des systèmes d'actions des acteurs de ces organisations, c'est-à-dire des stratégies de prises de pouvoir, de repli et de négociations définissant des « ordres locaux » de régulation (Friedberg, 1993).

Entre les individus qui en sont les acteurs et les organisations qui en résultent, il existe donc des processus essentiels par lesquels cette dualité s'exprime. Il s'agit des phénomènes d'interaction dont la logique dépend à la fois des capacités des agents mais aussi des caractéristiques et des contraintes du système dans son ensemble.

IV. AGENTS COGNITIFS ET RÉACTIFS

IV.1. Les deux approches

Les systèmes multi-agents peuvent être caractérisés par de nombreux paramètres. L'un des plus marquants porte sur la distinction entre agents cognitifs et réactifs, correspondant à deux écoles de pensées différentes.

La première, l'école « cognitive », est la plus représentée en intelligence artificielle distribuée car elle trouve son origine dans la volonté de faire communiquer et coopérer des systèmes experts classiques. Chaque agent dispose d'une base de connaissance comprenant les diverses informations liées à son domaine d'expertise et à la gestion des interactions avec les autres agents et son environnement. Les agents sont généralement « intentionnels » c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts. Dans ce cadre, les problèmes de coopération ressemblent étonnamment à ceux de petits groupes d'individus, qui doivent coordonner leur activité, et sont parfois amenés à négocier pour résoudre leurs conflits (Bond et Gasser, 1988) (Demazeau et Müller, 1991) (Chaib-Draa *et al.*, 1992). Les analogies sont alors sociales, et nombre de chercheurs dans ce domaine s'appuient sur les travaux de sociologie et en particulier sur la sociologie des organisations et des petits groupes.

L'autre tendance, l'école « réactive », prétend au contraire qu'il n'est pas nécessaire que les agents soient intelligents individuellement pour que le système ait un comportement global intelligent (Deneubourg *et al.*, 1991) (Steels, 1989) (Ferber et Drogoul, 1992). Des mécanismes de réactions aux événements, ne

prenant en compte ni une explicitation des buts, ni des mécanismes de planification, peuvent alors résoudre des problèmes qualifiés de complexes. L'exemple le plus manifeste d'organisation émergente est celle de la fourmière (Corbara *et al.*, 1993) : alors que toutes les fourmis se situent sur un plan d'égalité et qu'aucune d'entre elles ne possède de pouvoir d'autorité stricte sur les autres, les actions des fourmis sont coordonnées de manière à ce que la colonie survive et fasse donc face à des problèmes complexes tels que ceux de recherche de nourriture, de soins aux œufs et aux larves, de construction de nids, de reproduction, etc.

Les agents cognitifs, en raison de leur sophistication et de leur capacité à raisonner sur le monde peuvent travailler de manière relativement indépendante. Les tâches qu'ils accomplissent sont complexes au regard des facultés plus élémentaires des agents réactifs. Ils peuvent ainsi résoudre des problèmes compliqués de manière relativement individuelle. Leur représentation interne et les mécanismes d'inférence dont ils disposent leur permettent de fonctionner indépendamment des autres agents et leur offrent une grande souplesse dans l'expression de leur comportement.

Inversement, la structure plus frustrée des agents réactifs leur impose des comportements plus rigides. De ce fait les agents réactifs ne sont pas très puissants réduits à leurs propres moyens. Individuellement ils sont très faibles. Mais leur force vient de leur capacité à se mettre en groupe, c'est-à-dire de constituer des colonies capables de s'adapter à leur environnement. Ainsi, ce n'est pas au niveau de l'individu que les agents réactifs sont intéressants, mais au niveau de la population et des capacités d'adaptation et d'évolution qui émergent des interactions entre ses membres. Les agents réactifs n'ont pas ou peu d'individualité : ils se fondent dans la masse, mais de par leur nombre et la redondance qui en découle, ils peuvent faire face à des tâches complexes et ainsi rivaliser en termes de performances avec des agents plus sophistiqués mais moins nombreux.

IV.2. Anticipation et réactions

Enfin, la distinction cognitif/réactif recouvre une autre dualité : la capacité ou non d'anticiper sur les événements futurs et de s'y préparer. Les agents réactifs, par le fait même qu'ils n'ont pas de représentation de leur environnement et des autres agents, sont incapables de prévoir ce qui va se passer et donc d'anticiper en planifiant les actions à accomplir.

Au contraire, les agents cognitifs par leur capacité de raisonner sur des représentations du monde, sont capables à la fois de mémoriser des situations, de les

analyser, de prévoir des réactions possibles à leurs actions, d'en tirer des conduites pour les événements futurs et donc de planifier leur propre comportement. En effet, toute planification suppose que l'on soit capable de traiter des actions en dehors de leur exécution, à partir de description de l'environnement et de ces actions. Et c'est donc grâce à leurs capacités cognitives qui leur permet de se construire un monde virtuel qu'ils peuvent manipuler, que les agents cognitifs sont à même de produire des plans d'actions.

Cette capacité d'anticipation et de planification permet à des agents d'optimiser leur comportement et ainsi de n'effectuer que les actions véritablement nécessaires. Par exemple, supposons qu'un robot veuille franchir une porte et que cette porte soit fermée à clef. S'il s'agit d'un agent cognitif il pourra construire un plan « dans sa tête » qui consiste en :

```
Plan : ouvrir Porte
        aller jusqu'où se trouve la clef
        prendre la clef
        aller jusqu'à la porte
        ouvrir la porte avec la clef
```

En exécutant ce plan, l'agent ira directement au lieu de la clef pour prendre la clef, puis il se dirigera vers la porte pour l'ouvrir.

Au contraire, un agent réactif, du fait qu'il ne dispose pas de représentation de l'univers dans lequel il évolue, ne peut pas effectuer ce type de raisonnement *a priori*. Il ne réagit que face à la situation. Pour résoudre ce problème, on pourra construire un agent réactif qui dispose du comportement suivant :

```
R1 : si je suis devant la porte et que j'ai une clef,
      alors l'ouvrir
R2 : si je suis devant la porte et sans clef,
      alors essayer de l'ouvrir
R3 : si la porte ne s'ouvre pas et que je n'ai pas de clef,
      alors aller chercher la clef
R4 : si je cherche une clef et qu'il y a une clef devant moi,
      alors prendre la clef et aller vers la porte
```

Ces quatre règles suffisent pour régler le comportement d'un robot réactif : si l'agent se trouve devant une porte fermée à clef, il essaiera de chercher la clef, puis il reviendra pour l'ouvrir.

La différence entre les deux comportements est caractéristique. En ce qui concerne l'efficacité en terme de nombre d'actions effectuées, l'avantage revient

évidemment à l'agent cognitif qui optimise le nombre de ses déplacements puisqu'il peut prévoir la suite des actions à entreprendre, alors que l'agent réactif est contraint d'aller d'abord vers la porte avant de se rendre compte que la clef n'est pas là et qu'il faut aller la chercher. En revanche, l'agent réactif est plus souple. Si la porte est ouverte, il l'ouvre directement sans aller chercher la clef au préalable.

On peut aussi dire que l'agent réactif contient une connaissance compilée des actions à effectuer : il n'a pas besoin de construire une représentation mentale de son monde car il lui suffit de simplement réagir aux situations qui se présentent. Mais la simplicité de ces comportements témoigne plus de l'intelligence des concepteurs que de celui des agents.

V. COOPÉRATION INTENTIONNELLE ET RÉACTIVE

La différence entre ces deux approches peut être aisément illustrée par un exemple classique en intelligence artificielle distribuée, dans lequel plusieurs agents chasseurs doivent entourer une proie qui fuit en avançant de manière

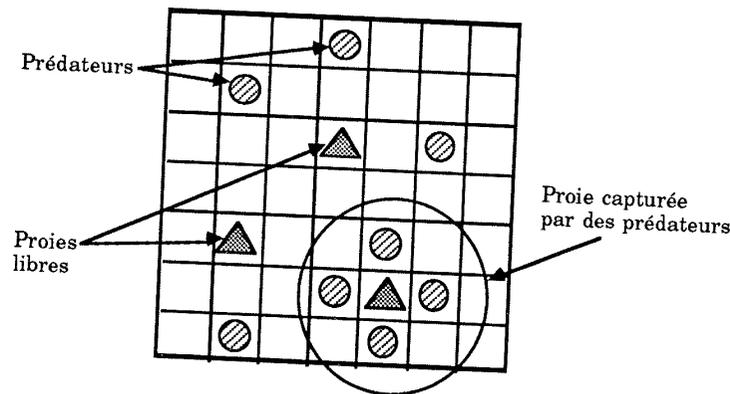


Figure 3.

aléatoire. Le problème consiste pour les chasseurs à capturer la proie en l'entourant comme le montre la figure 3. On suppose de plus que les chasseurs n'ont qu'une perception limitée de l'environnement et qu'ils ne peuvent voir qu'à quelques cases de distance.

De nombreuses stratégies peuvent être mises en œuvre. Les stratégies cognitives procèdent généralement d'une analyse descendante en définissant les différentes fonctions que doit remplir le système : détection des proies, élaboration des équipes de chasse, allocation des rôles (prendre la proie par le nord, l'ouest, l'est ou le

sud), réorganisation des équipes si le nombre des chasseurs est mal distribué (deux équipes de trois chasseurs par exemple), etc. Toutes ces fonctions sont bien identifiées et implémentées dans les agents sous forme de comportements adaptés nécessitant un système de communication permettant le dialogue et la prise de décision distribuée. On suppose alors que les agents ont des buts, et qu'ils agissent rationnellement par rapport à ces buts en désignant si nécessaire un agent leader pour organiser la répartition du travail et coordonner les actions (Bouron, 1992).

En revanche la réalisation d'un système réactif pour résoudre ce problème procède d'une toute autre démarche. On supposera que les proies émettent un signal dont l'intensité décroît proportionnellement à la distance et qui joue le rôle d'attracteur pour les chasseurs. De ce fait, plus un agent se trouve près d'une proie, plus le signal reçu sera fort. S'il est considéré comme un stimulus, les chasseurs se trouvant près d'une proie P auraient plutôt tendance à se diriger vers P que vers toute autre proie dont ils pourraient percevoir les émanations et dont ils sont plus éloignés. De plus, afin que les chasseurs ne se retrouvent pas tous au même endroit, et donc qu'ils entourent effectivement la proie, on fait émettre par chaque chasseur un petit signal servant de répulseur pour les autres chasseurs. Ainsi, chaque chasseur est à la fois attiré par les proies et (faiblement) repoussé par les autres chasseurs, et le fait qu'ils soient capables de capturer une proie émerge de leurs interactions, comme le montre la figure 4.

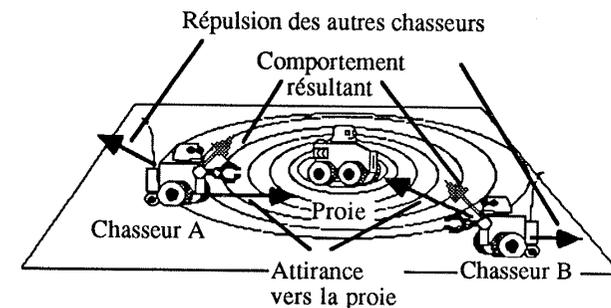


Figure 4.

On peut dire que si la coopération induite par les agents cognitifs est *intentionnelle*, puisqu'ils disposent de capacités de dialogue et d'allocation de tâches explicites, les agents réactifs introduisent un autre type de coopération que l'on pourra qualifier de *réactive*, et qui n'apparaît que comme un simple effet de bord du comportement individualiste de chaque agent.

Cette opposition entre cognitif et réactif, si elle permet de bien situer les problèmes, ne doit cependant pas être prise au pied de la lettre. Il existe en effet toute une gradation entre l'agent réactif pur, qui ne réagit qu'aux stimuli, et l'agent cognitif total qui possède un modèle symbolique du monde qu'il met continuellement à jour et à partir duquel il planifie toutes ses actions. Entre ces deux extrêmes, tout un éventail de possibilités est offert (figure 5), de l'agent qui s'adapte en mémorisant certaines informations sous forme de paramètres numériques à celui qui possède une « carte mentale », c'est-à-dire une représentation analogique de son environnement lui permettant ainsi de déterminer des trajectoires lors de son déplacement.

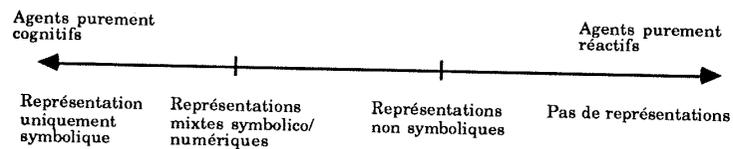


Figure 5.

L'enjeu actuel est à la fois de voir comment il est possible de construire des agents cognitifs à partir d'organisations réactives et d'autre part de réaliser des agents qui disposent à la fois de capacités cognitives et réactives.

VI. CONCLUSION

Nous avons présenté les bases de la kénétique, approche consistant à définir les systèmes à partir d'un ensemble d'agents en interactions. Ces agents sont définis en particulier par leurs capacités à percevoir ce qui se passe dans leur environnement et à réagir de manière adéquate en modifiant cet environnement. Un paramètre essentiel de ces systèmes multi-agents réside notamment dans la distinction entre agents cognitifs, capables d'élaborer des modèles internes de leur environnement et agents réactifs, qui ne font que réagir à la situation présente.

Notes et Références

1. On emploiera le terme système artificiel uniquement dans le sens « dispositif construit par l'être humain et qui est lui-même composé d'éléments artificiels ». Il s'agit donc essentiellement de systèmes électroniques ou informatiques qui sont visés par de tels vocables, et non des entreprises ou des éco-systèmes naturels aménagés par l'homme.

H. ATLAN, *Entre le cristal et la fumée, Essai sur l'organisation du vivant*, Paris, Éditions du Seuil, 1979.

E. BERNARD-WEIL, *Précis de systémique ago-antagoniste. Introduction aux stratégies bilatérales*, Limonest, L'Interdisciplinaire, 1988.

L. v. BERTALANFFY, *General System Theory*, New York, Braziller, 1968.

A. BOND, L. GASSER, *Readings in Distributed A.I. San Mateo*, California, Morgan Kaufmann, 1988.

T. BOURON, *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents. Thèse d'université*, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1992.

B. CHAIB-DRAA, M. MOULIN, R. MANDIAU, P. MILLOT, Trends in Distributed Artificial Intelligence, *Artificial Intelligence Review*, 6, 1992, p. 35-66.

J. CHAREST, *La conception des systèmes: une théorie, une méthode*, Québec, Gaëtan Morin, 1980.

B. CORBARA, A. DROGOUL, D. FRESNEAU, S. LALANDE, Simulating the Socio-genesis Process in Ant Colonies with MANTA, In *Towards a Practice of Autonomous Systems II*, ed. P. Bourguin and F. Varela, Cambridge, MIT Press, 1993.

M. CROZIER, E. FRIEDBERG, *L'acteur et le système*, Paris, Éditions du Seuil, 1977.

P. DELATTRE, *Système, structure, fonction, évolution*, Paris, Maloine, 1971.

Y. DEMAZAU, J.-P. MULLER, ed. *Decentralized AI 2*, Amsterdam, Elsevier North-Holland, 1991.

J. L. DENEUBOURG et al., The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots, *From Animals to Animals*, Paris, Jean-Arcady Meyer and Stewart W. Wilson (Ed.), MIT Press, 1991, p. 356-363.

J. FERBER, *Organisations artificielles. Une introduction à l'intelligence artificielle distribuée et aux systèmes multi-agents*, à paraître, 1994.

J. FERBER, A. DROGOUL, *Using Reactive Multi-Agent Systems*, in Simulation and Problem Solving, In *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Practice*, ed. Les Gasser and Nicholas Avouris, Kluwer, 1992.

J. W. FORRESTER, *Principes des systèmes*, traduit de l'américain par Patrick Sylvestre-Baron, Presses Universitaires de Lyon, 1980.

E. FRIEDBERG, *Le pouvoir et la règle*, Paris, Éditions du Seuil, 1993.

J. W. LAPIERRE, *L'analyse de systèmes*, Paris, Syros, 1992.

F. LE GALLOU, Activités des systèmes, décomposition des systèmes, In *Systémique. Théorie et applications*, ed. Francis Le Gallou et Bernadette Bouchon-Meunier, Paris, Lavoisier, 1992, p. 71-100.

J.-L. LE MOIGNE, *La théorie du système général*, Paris, PUF, 1977.

H. MATURANA, F. VARELA, *The Tree of Knowledge*, Boston, New Science Library, 1987.

E. MORIN, *La méthode, T1: la nature de la nature*, Paris, Éditions du Seuil, 1977.

I. PRIGORINE, I. STENGERS, *La nouvelle alliance*, Paris, Gallimard, 1979.

E. SCHWARTZ, A Coherent and Holistic Metamodel for the Functioning and Evolution of Viable Systems, An application to Human Societies, *4th International Symposium on Systems Research Informatics and Cybernetics*, Baden-Baden, 1993.

L. STEELS, Cooperation between distributed agents through self organisation, *Journal of robotics and autonomous systems*, 6, 1989.

F. VARELA, *Autonomie et connaissance*, Paris, Éditions du Seuil, 1989.

N. WIENER, *Cybernetics*, Paris, Hermann, 1948.