SYSTEMES MULTIAGENTS ADAPTATIFS

Alain Cardon (1, 2) & Zahia Guessoum (1, 3)

1 - LIP6 UMR 7606 Paris VI
UPMC 4 Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

2 - LIH Université du Havre
25 Rue Philippe Lebon
76063 Le Havre Cedex

3 - LERI, Université de Reims

Alain.Cardon, Zahia.Guessoum @lip6.fr

Résumé : Les systèmes adaptatifs se caractérisent par l'existence de tendances organisationnelles conduisant leur réorganisations : ce sont des systèmes complexes qui modifient sans cesse les couplages entre leurs composants et qui modifient ces composants. Nous présentons l'architecture d'un tel système basé sur une organisation d'agents, en réifiant les tendances organisationnelles dans un réseau neuromimétique couplé à cette organisation. Nous montrons que les agents doivent avoir une structure particulière, appelée adaptative, qu'ils doivent être eux-mêmes adaptatifs dans leur environnement pour constituer un système adaptatif. Nous montrons donc que l'adaptativité est une propriété distribuée dans tous les composants du système.

Abstract:
Adaptive systems are mainly characterized by organizational tendencies leading their organizations : these are complex systems that continuously modify the connecting between their components and their components.
We introduce an architecture for such systems. This architecture is based on an agent organization, by reifying the organizational tendencies into a neuromimetic net connected with this organization. We show that agents need a particular structure, called adaptive and must be adaptive in their environment to make the system adaptive. We show then that adaptability is a distributed property into all the component of the system.

I - INTRODUCTION

La notion intuitive d'adaptativité précise qu'un système qui a cette propriété se comporte de façon adéquate face aux sollicitations de son environnement. Et l'on entend par système un objet construit rationnellement, dans le but de servir les objectifs de son constructeur en utilisant des méthodes classiques et éprouvées.

Un système adaptatif ne sera pas construit dans le but de servir les visées très précises de son constructeur, et il ne sera pas construit de manière classique. Un tel système s'adapte à son environnement parce qu'il adapte sa propre organisation à des tendances fondamentales qui lui sont propres. Il fonctionne parce qu'il est conduit par ces tendances, que celles-ci l'amènent à réorganiser ses composants, que la réorganisation de ces composants conduit à générer des plans originaux qui sont, par le fait que le système est situé dans un environnement dont il appréhende des caractères et par le fait qu'il est sans cesse soumis à des tendances fondamentales, adéquats avec la situation courante.

Il est en effet très simple de constater qu'un système est adaptatif en le regardant se comporter dans son environnement. Et cela conduit à considérer que l'adaptativité est une propriété locale, parmi d'autres, comme par exemple la capacité à se diriger en optimisant une trajectoire ou bien à émettre des sons harmonieux. Mais ce n'est pas la réalité. L'adaptativité est un *caractère organisationnel dense* dans tout le système, qui, parce qu'il est dense, est inévitable en ce qui concerne son influence sur le comportement du système. Et ce comportement apparaît comme adaptatif, alors qu'aucun composant du système n'a la fonction dédiée de le rendre adaptatif.

L'adaptativité est le résultat de la mise en fonctionnement complexe d'un certain système dont l'architecture est basée sur une boucle systémique [Le Moigne 1990], [Cardon 1999]. Il s'agit donc d'une nouvelle classe de systèmes, en Informatique, qui impose de nouvelles architectures. Il n'y aura pas de notion d'état final atteint, pas de progression vers la solution d'un problème bien posé, mais reconformation coordonnée de deux structures en fort couplage, et conduisant à un état stable, l'état adaptatif, avant qu'un quelconque stimulus ne fasse reprendre le processus de couplage et les réorganisations entre les entités.

Un tel système est construit à partir d'une organisation d'agents, qui a la capacité de bien traiter une classe de problèmes et qui prend des informations dans l'environnement. Mais le système est aussi doté d'une structure qui représente des tendances réorganisationnelles globales, et qui est fortement couplée à la précédente. La seconde structure suscite et limite les actions de *l'ensemble* des agents, qui sont conduits à se réorganiser de certaines façons, qui se comportent de certaines manières adéquates à ces tendances. Le comportement des agents est ainsi adéquat à la fois aux stimuli environnementaux et aux tendances fondamentales. Le système ne se contente donc pas de réagir à des stimuli, mais il les interprète selon les capacités de ses agents *et* les pressions de ses tendances. Il est ainsi à la fois robuste et adapté à un environnement changeant. Il est organiquement adaptatif.

Nous présentons d'abord la notion de tendance organisationnelle, qui est centrale, puis nous détaillons l'architecture d'un système adaptatif basé sur une organisation d'agents. Nous présentons un tel système comme composé de trois parties : l'organisation d'agents proprement dite, le réseau neuromimétique dit réseau membranaire qui réifie les tendances fondamentales et le système de couplage mettant ces deux composantes en interactivité forte.

Nous montrons enfin, en détaillant les composants du système, que la structure des agents doit être adaptative, dans un sens spécifique, que les agents doivent être adaptatifs à leur niveau, dans la mesure où il doivent être capables de gérer à la fois leurs connaissances locales et les connaissances globales relatives aux tendances fondamentales du système, et qui sont réifiées dans le réseau membranaire. Ces deux conditions permettent alors au système, dans son entier, d'être adaptatif aux stimuli de son environnement, sous la pression de ses tendances fondamentales. Nous montrons donc que l'adaptativité est un caractère réparti, dense, dans tout le système.

II - TENDANCES FONDAMENTALES ET ADAPTATIVITE

Nous nous intéressons à des systèmes dont les principes d'existence et de fonctionnement sont d'une autre nature qu'en ce qui concerne les systèmes relatifs à la résolution de problèmes [Clancey 1985]. Ce sont des systèmes qui ont une évolution structurelle que l'on considère comme *inévitable*, et qui ont des *finalités* [Le Moigne 1990]. Ils doivent bien sûr résoudre des problèmes, mais essentiellement pour satisfaire à leurs principes d'existence. Tous les systèmes vivants et sociaux appartiennent à cette catégorie.

Nous considérons que leur comportement n'est ni aléatoire, ni fonctionnellement défini pour la résolution de problèmes précis, mais qu'il est simplement conduit, engagé par des tendances fondamentales, qui le font se déployer dans certaines directions plutôt que dans d'autres.

Tendances fondamentales

> *Certains systèmes, naturels ou artificiels, sont conçus pour qu'ils satisfassent à des besoins très généraux qui orientent leur comportement de manière décisive. Ces besoins généraux, multiples et contradictoires, seront appelés tendances fondamentales du système.*

Les tendances fondamentales, pour les organismes naturels, sont de survivre, de se nourrir, de se reproduire, de se reposer, de maintenir leur situation d'existence dans leur environnement ... Ce sont ces raisons qui conduisent leurs comportements, d'abord en réorganisant leur structure, et ensuite en faisant action dans leur environnement. Et par la nécessité à se comporter et à agir que leur imposent ces tendances fondamentales, ils sont amenés à résoudre des problèmes variés, et à apprendre à les bien résoudre. La résolution de problèmes est donc, pour ces systèmes, un moyen et non un but. Nous appellerons ces systèmes dont le comportement est conduit par des tendances fondamentales, des *systèmes adaptatifs*.

On considère que les tendances fondamentales présentes dans le système sont nombreuses, et contradictoires. Dans le cas où le système n'a qu'une tendance fondamentale, ou que toutes sont fortement concordantes, constituant par exemple une hiérarchie avec un besoin dominant permanent, le système se ramène alors à un système de calcul avec un but explicite, utilise des procédures de choix multictritères et un mécanisme d'apprentissage pour atteindre le but.

Un système soumis à des tendances fondamentales se comporte *pour* les satisfaire. Il doit *s'adapter*, avec les degrés de liberté organisationnelle importants conférés à sa structure et les contraintes limitatives imposées par ses tendances. La notion intuitive *d'adaptativité* précise le caractère d'adaptation d'un individu à son environnement, l'adaptation étant le caractère qui rend quelque chose solidaire, conforme ou acclimaté à son environnement.

Système adaptatif, définition générale

> *Un système adaptatif est un système dont la raison à fonctionner est conduite par la satisfaction de ses tendances fondamentales. Pour satisfaire à ces tendances, le système doit adapter sa structure et ainsi modifier son comportement. Sa structure sera, pour cela, globalement très plastique. Le système modifiera l'organisation de ces composants par le fait de se situer dans son environnement en maintenant cette organisation dans un domaine conforme aux besoins fondamentaux.*

Ce type d'adaptativité est entendu au sens organisationnel, en précisant que la structure du système évolue, se reconforme sans cesse, pour qu'il puisse se placer en situation de concordance structurelle avec les sollicitations de son environnement et avec ses tendances fondamentales, c'est-à-dire pour qu'il s'adapte.

Nous allons nous intéresser à des systèmes artificiels, dotés de tendances fondamentales artificielles et de capacité forte de réorganisation de leur structure, en nous appuyant sur le paradigme agent.

III - AGENTS ET SYSTEMES MULTI-AGENTS ADAPTATIFS

Considérons un système construit à partir d'une organisation d'agents et qui est considéré comme adaptatif au sens que nous avons précisé précédemment, c'est-à-dire un système plastique dont la raison à fonctionner est conduite par la satisfaction de ses tendances fondamentales. Dans ce système, les entités minimales de conception seront des agents. Ceux-ci forment une architecture naturellement plastique au niveau des actions coordonnées et des communications, permettant de constituer des groupes d'agents, par partage de particularités communes.

Nous allons préciser l'architecture minimale des agents et des organisations d'agents pour que le système soit effectivement adaptatif. Remarquons bien qu'il ne s'agit pas de définir *a priori* l'adaptativité au niveau des agents et de la propager à celui du système, mais il s'agit de doter un système multiagent de la propriété d'adaptativité organisationnelle, puis d'en déduire la structure nécessaire des agents. Nous verrons ainsi que les agents d'un système adaptatif au sens organisationnel doivent être dotés de propriétés bien spécifiques et que nous pourrons ainsi, par extension, les appeler des "*agents adaptatifs*" [Guessoum & Cardon 1999a].

L'adaptativité confère au système, alors qu'il suit strictement ses tendances fondamentales, la capacité de générer un état organisationnel concordant avec l'état de l'environnement, pour y agir au mieux de ses intérêts courants. Pour cela, il dispose d'une structure plastique, qu'il va modifier constamment. La structure sera composée d'agents, mis en relation selon leurs accointances et communiquant dans un langage spécifique, comme par exemple KQML [Kuokka & Harada 1995]. Le graphe de couverture représentant les communications entre agents, et la distribution des rôles entre ceux-ci, sont sujets à des variations significatives lors des réorganisations.

On considère donc un système qui opère sur un certain domaine précisé à la construction : gestion de transactions financières ou économiques, gestion d'écosystèmes, gestion de situation d'urgence multi-participants ... Les connaissances relatives au domaine, et celles relatives aux inférences sur ces dernières, sont essentiellement localisées dans les agents, en adoptant le paradigme des systèmes distribués [Davis 1982]. Le système est en accès direct pour les différents utilisateurs qui l'utilisent, via un ou des Interfaces Homme-Machine ou tout autre moyen, et il saisit les caractères de son environnement à l'aide de ses capteurs [C.f. Fig. 1]. Il a ainsi une autonomie *relative*, à la fois limitée par ses réorganisations et étendue par la richesse de ses tendances fondamentales, et il est *ouvert* dans son environnement [von Bertalanffy op. cité].

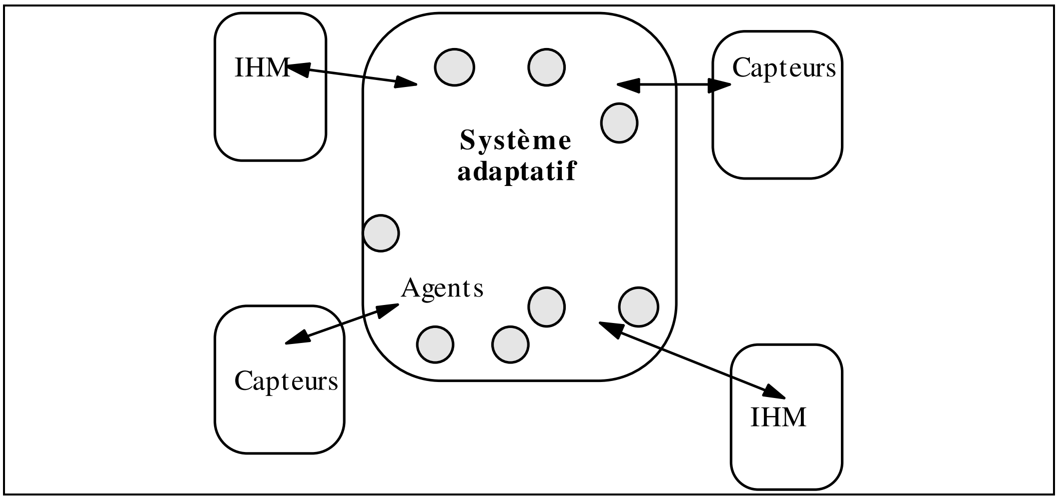

Figure 1. Système adaptatif et ses moyens de communication avec l'environnement

3.1 - Agent adaptatif

Nous allons d'abord nous intéresser aux agents de l'organisation, qui construisent une certaine représentation adéquate de la situation courante, se déroulant dans l'environnement, puis qui génèrent des plans d'action pour agir et modifier cet environnement.

Un agent d'un système adaptatif doit à la fois opérer comme un agent classique, c'est-à-dire agir, pro-agir, communiquer avec les autres agents de son réseau d'accointances [Ferber 1995]. Il doit également *communiquer*, d'une certaine manière, avec le système considéré dans son entier, pour se conformer aux tendances fondamentales de celui-ci, et qui sont des tendances générales. Les tendances fondamentales sont d'une autre nature, au sens d'une autre catégorie conceptuelle, que ce que les agents sont capables de comprendre usuellement dans leurs actions de manipulation de connaissances, de communication et d'action. Il sera ainsi nécessaire d'étendre leur structure, pour leur permettre ce nouveau type de préhension et de communication de connaissances.

Dans le système, les agents ont une certaine représentation de leur propre environnement d'agent. Il ne s'agit évidemment pas d'une représentation intentionnelle de l'environnement du système, qui est en quelque sorte la synthèse et l'interprétation de ces représentation partielles et locales. Il s'agit d'une représentation strictement locale de la situation de chaque agent, suivant leurs accointances. C'est par ce moyen que les agents vont pouvoir s'associer, former des groupes, s'opposer, avoir des débats et se livrer à des luttes hégémoniques [Cohen 1995].

La représentation de l'environnement local d'un agent doit lui permettre de définir ses propres buts, qui ne sont que locaux, et ceci de manière à ce qu'ils ne soient pas en opposition trop forte avec les tendances fondamentales du système multiagent dans son entier, auquel il appartient. Il s'agit, pour chaque agent, de n'être surtout pas en flagrant désaccord avec l'évolution de la tendance dominante de l'organisation, s'il en est une. Il s'agit donc bien, dans la génération des buts de l'agent, d'un rapport de signification locale, où il sert ses propres intérêts, à une signification globale, qu'il ne connaît pas et où il prend cependant en compte des éléments de l'état de l'organisation. L'agent adaptatif est, par cela, capable d'une certaine *généralisation conceptuelle implicite*. On se rapproche, sur ce point, de la notion de méta-connaissance [Pitrat 1993].

Nous appellerons un *agent adaptatif* un agent ayant cette capacité de généralisation conceptuelle implicite, qui met en relation son action locale avec les tendances fondamentales du système. Il sera donc doté d'une composante spécifique, qui lui permettra de générer et d'interpréter cette nouvelle catégorie de connaissance.

Agent adaptatif

> *Un agent adaptatif est un agent d'un système adaptatif qui est capable de générer et d'interpréter implicitement des indications relatives aux tendances fondamentales du système. Ces indications influent implicitement sur son état et sur sa structure, alors qu'il opère comme un agent ordinaire quant à ses actions, pro-actions et communications.*

Nous reviendrons sur la structure particulière d’un tel agent dans le paragraphe 5.1.

3.2 - Architecture d'un SMA organisationnellement adaptatif

Nous disposons donc d'agents adaptatifs pour constituer l'organisation d'agent d'un système adaptatif. Il reste alors à définir l'architecture d'un tel système, à partir de ces agents particuliers.

La façon de représenter l'architecture du système adaptatif par une organisation d'agents, c'est-à-dire sa composition au niveau conceptuel, revient à définir quatre sous-systèmes distincts, et couplés [C.f. Fig. 2] :

1. *l'interface* du système, qui saisira les informations à portée locale venant de l'environnement et déploiera les actions du système dans son environnement. Cette partie sera composée, de manière classique, d'agents réactifs.
2. une *organisation d'agents*, qui sera chargée de définir une représentation conforme de la situation courante et *également* de construire la conception distribuée du plan d'action, par composition des plans locaux générés par les agents, c'est-à-dire en utilisant les communications entre agents et la formation de groupes,

une *composante connexionniste* appelée réseau membranaire, qui représentera explicitement les tendances fondamentales, les caractères de l'information à protée globale, en réifiant les caractères typiques de cette information " [Guessoum & Cardon 1999b],

3. une dernière composante, dynamique, représentera la liaison entre l'ensemble des agents et la composante connexionniste, pour faire en sorte que la réorganisation opérée par les agents soit concordante avec les tendances fondamentales exprimées par la composante connexionniste. Ce sera la *structure de couplage* entre organisation d'agents et réseau connexionniste.

L'agent représente, dans le système, l'entité ayant une action et un rôle strictement locaux. La composante connexionniste, représentée par un réseau neuro-mimétique, aura pour rôle de représenter les tendances fondamentales du système. Ce réseau réifiera ce qui est essentiel au niveau adaptatif dans le système. Le système de couplage assurera le lien organique entre "le tout", c'est-à-dire le réseau connexionniste, et les parties, c'est-à-dire les agents et fera satisfaire les tendances fondamentales par l'organisation d'agents.

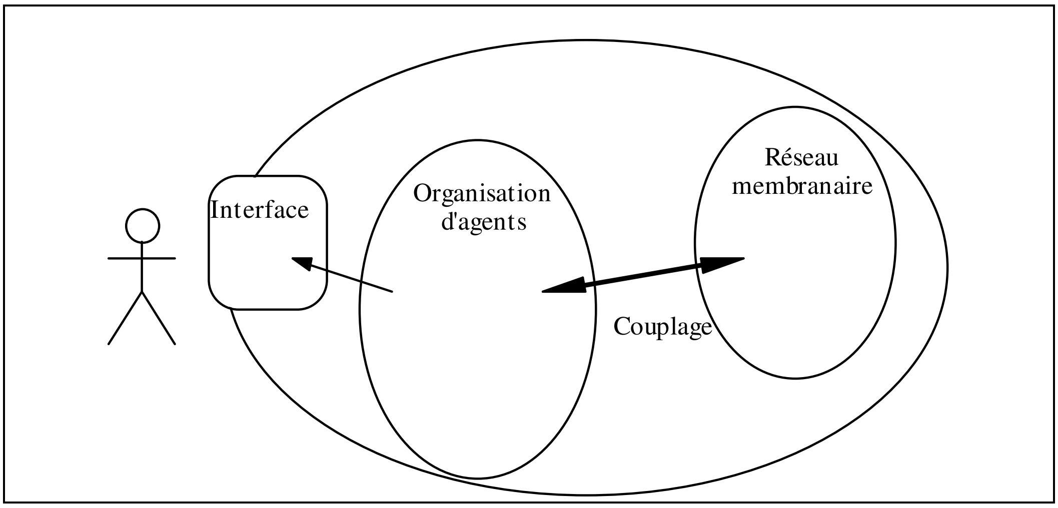

Figure 2. Les quatre parties d'un système multiagent adaptatif

3.3 – Le fonctionnement bouclé du système adaptatif

Pour définir les tendances fondamentales du système adaptatif, ce qui est la spécificité qui va le rendre adaptatif au sens organisationnel, il sera nécessaire de compléter l'organisation d'agents, de la coupler à une autre structure réifiant l'expression de ces tendances.

De plus, l'architecture du système sera évolutive : il y aura l'architecture produite à la construction, avec ses caractères, et il y aura l'architecture acquise au cours du fonctionnement du système, et qui sera structurellement différente. Ainsi, un système artificiel adaptatif est un système qui se transforme, qui acquiert une autre structure au cours de son fonctionnement. Il s'agit d'une adaptation architecturale du système.

L'information venant de l'environnement et la représentation adéquate que se fait le système de sa situation dans cet environnement, seront évidemment distribuées dans les agents de l'organisation. La troisième composante, le réseau membranaire, réifie les tendances fondamentales qui conduisent le comportement du système, sera couplée aux deux précédentes [C.f. Figure 2].

Le système dans sa généralité, considéré comme une entité active, agit sur l'environnement, poussé par la nécessité de suivre ses tendances fondamentales tout en respectant l'état opérationnel de son organisation, c'est-à-dire en s’efforçant de ne pas se dégrader. Pour cela, la connaissance et les fonctionnalités ont été distribuées dans l'organisation d'agent. Cette distribution est réalisée, lors de la conception du système, par le mécanisme d’agentification.

Ainsi, on peut résumer le fonctionnement du système adaptatif par les fonctions suivantes :
1. saisie des informations venant de l'environnement, par des agents d'interface et prise en compte des tendances fondamentales actives,
2. réorganisation des agents et construction, de façon distribuée, d'une représentation concordante de la situation,
3. conception d'un plan d'action à partir de l'état des agents,
4. action dans l'environnement,
5. retour en 1.

La conception des plans est réalisée de manière totalement distincte de la saisie des informations, c'est-à-dire que les informations, à portée locale et venant de l'environnement, ne sont pas directement transmises à la partie du système opérant la représentation et la conception de la situation. Il y a médiatisation, stricte, entre partie interface et partie représentation - conception des plans. Ce type de fonctionnement s'apparente à la clôture opérationnelle d'un système autopoïétique [Varela 1989].

La composante traitant les tendances fondamentales, l'activité informationnelle à portée globale, agit de façon semblable à des champs de prégnances [Thom 1972], qui font tendre le comportement du système de représentation et de conception vers tel état plutôt que vers tel autre, en influençant les composants du système de représentation et de conception. Il faut évidemment remarquer que l'organisation d'agents, qui réalise la représentation et la conception des plans d'action, influence la composante exprimant les besoins fondamentaux. Réciproquement, la composante neuro-mimétique exprimant les besoins fondamentaux influence très sensiblement l'organisation d'agents qui construit une représentation - conception de plans d'action. Le système est ainsi basé sur le processus de couplage entre ses deux composantes.

La définition suivante précise ce qu'est, au sens de ses propriétés nécessaires, un système multiagent adaptatif.

Système multiagent adaptatif

Un système multiagent adaptatif est un système :
1- ouvert *au sens systémique du transfert informationnel avec l'environnement et qui est soumis à des tendances fondamentales.*
2- qui médiatise *l'information qu'il reçoit : il a une interface de transcription / restitution lui permettant la communication avec l'environnement.*
3- qui appréhende *son univers (environnement et lui-même) et qui représente l'état de l'environnement et celui de sa propre organisation, en concevant un plan d'action adapté à la situation contextuelle..*
4- qui modifie *continuellement sa structure en fonctionnant,*
5- qui s'altère*, sous deux tendances fondamentales duales : dégradation de l'information et amélioration des connaissances, et qui doit, par nécessité, se maintenir en activité.*

Les deux tendances fondamentales qui sont présentées dans cette définition, conduisent l'évolution du système, qui n'a pas de permanence organisationnelle et qui est, comme tout système adaptatif, en déval dans le temps.

3.4 - Représentation des tendances fondamentales par un réseau neuromimétique

Les tendances fondamentales, dans un système multiagent adaptatif, sont conformes à celles de tout système adaptatif, mais elles sont quand même spécifiques sur un point : elle doivent exprimer l'état organisationnel de l'ensemble des agents. En effet, un agent a un caractère cognitif : il représente de la connaissance et de l'action localement intentionnelle, et n'est pas un simple processus.

Les tendances fondamentales d'un tel système *seront* les tendances globales conduisant la réorganisation des agents. Les agents comprendront et distribueront, et chaque agent selon ses caractéristiques, des indications locales relatives aux tendances fondamentales qui sont, elles, comprises comme globales.

Nous représenterons ces tendances fondamentales par des *formes*, des formes de caractère géométrique, de la même manière que nous avons représenté la signification du fonctionnement d'un substrat calculable par des formes, dans une étude sur la conscience artificielle [Cardon 1999]. Il s'agit d'une hypothèse géométrique, quant à l'expression des tendances fondamentales.

De telles formes seront effectivement représentées par l'état d'un certain réseau neuro-mimétique couplé à l'organisation d'agents. Le réseau aura pour rôle de représenter l'évolution de l'organisation d'agents, c'est-à-dire sa réorganisation, considérée comme un ensemble *d'indications*. Chaque agent produit un vecteur d'indications, l'ensemble des agents produit ainsi une certaine forme vectorielle, ou un certain nuage de points, qui possède un caractère géométrique, dont le réseau doit retrouver la structure. Pour cela, un réseau à compétition de type carte topologique de Kohonen est particulièrement bien adapté [Kohonen 1990]. De tels réseaux à compétition sont particulièrement aptes à représenter la structure de données de grande dimension [Jodouin 1994].

Le système d'agents adaptatif est donc composé [C.f. Fig. 3]:
1. d'une interface d'entrée, manipulée par les utilisateurs,
2. d'une organisation d'agents, représentant les connaissances et actions distribuées d’une classe de problèmes,
3. d'un réseau membranaire, constitué de cartes de Kohonen, frontalisé par une structure d'entrée prenant ses informations dans l'organisation d’agents et produisant ses résultats dans une structure de sortie, réinjectée dans l'organisation d'agents.
4. l'organisation d'agents et le réseau sont couplés via les structures de frontalisation d'entrée et de sortie.

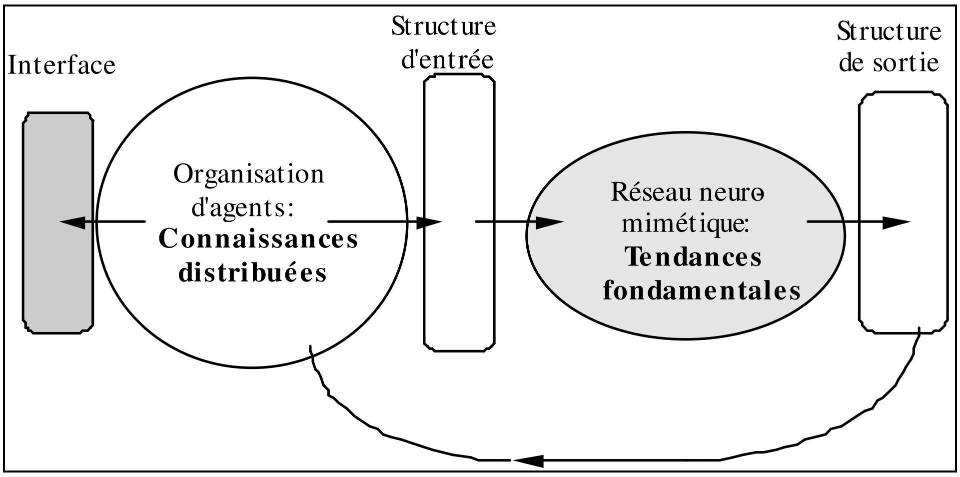

Figure 3. Schéma du couplage organisation d'agents - réseau neuro-mimétique

Le réseau neuro-mimétique prend des informations organisationnelles dans l'ensemble des agents via la structure d'entrée. Il est activé à partir de ces informations. Il produit, après traversée, un état stable qui est envoyé dans une structure de sortie. Cette dernière retourne ses valeurs aux agents de l'organisation. Le système fonctionne en boucle systémique [Le Moigne 1990], [Cardon - Durand 1997].

Ainsi, l'organisation d'agents produit, dans chacun de ses agents, des indications qui expriment leur propre comportement. Ces indications sont collectées par la structure d'entrée et sa synthèse produit une certaine forme qui active, en entrée, le réseau neuro-mimétique. L'information obtenue par la traversée du réseau est collectée par une structure de sortie, qui l'adapte à la compréhension des agents, et qui retourne ses valeurs aux agents. Il est assez clair que les structures d'entrée et de sortie servent à adapter agents et réseau neuro-mimétique : le couplage entre les deux types d'entités ne peut pas être direct, de par leurs natures très différentes.

Nous allons maintenant décrire, dans le détail, les différentes composantes d'un tel système adaptatif.

IV - LE RESEAU MEMBRANAIRE

En se réorganisant, l'ensemble des agents génère un plan d'action conforme à sa mise en situation dans l'environnement. Le plan est généré de manière distribuée, par la coopération des agents. Le système ne génère un tel plan que sous la pression exercée par une structure bien précise qui exprime les tendances fondamentales, qui fait effectivement s'engager l'organisation d'agents dans une certaine direction plutôt que dans une autre.

Nous utilisons, pour réifier les tendances fondamentales qui vont conduire les réorganisations de l'ensemble des agents, et puisque le système répond à la recherche de comportements conformes à des tendances générales, un réseau neuro-mimétique appelé, dans ce cas, *réseau membranaire*. La notion de tendance fondamentale, qui se caractérise au niveau de son effet par des états typiques de l'organisation d'agent, sera représentée par des formes géométriques. Ces formes seront les bassins d'attraction d'un réseau neuro-mimétique.

Le réseau membranaire va permettre de représenter, par ses bassins d'attraction, les *tendances de réorganisation* du système, au vu de l'état et des comportements des agents. Pour tout état de l'organisation d'agents, le réseau membranaire va appréhender les caractères organisationnels *globaux* de cet état, à partir de la considération de toutes les indications venant des agents, en appréhendant les tendances à s'orienter vers certaines organisations typiques qu'il sait reconnaître. Il va influencer le comportement de l'organisation d'agents, au niveau des groupes et au niveau de chaque agent, pour que l'organisation tende vers l'état qu'il précise par ses bassins d'attraction. Il s'agit clairement d'une réification de la liaison tout - parties d'un système complexe [Morin 1986].

Le réseau membranaire est un réseau neuronal de type carte de Kohonen, qui reconnaît la forme des états organisationnels globaux typiques de l'ensemble des agents, introduits dans le réseau à partir d'une base de cas. Il produit en sortie une certaine forme, qui est un vecteur indiquant la tendance organisationnelle reconnue. Cette forme sera envoyée à l'interface de sortie du réseau couplant celui-ci avec l'organisation d'agents [C.f. Fig. 3]. L'information produite par cette structure interface s'appelle une *forme membranaire*. La prise en compte des informations contenues dans cette forme membranaire par les agents pourra alors altérer leur comportement.

4.1 - Membranes d'agents et fonction membranaire

L'agent, pour communiquer avec le réseau membranaire, disposera d'un composant particulier, une *membrane*. La *membrane d'agent* est le composant de la structure de l'agent où confluent les deux types d'informations, à portée locale relative au monde de l'agent, et à portée globale relative aux tendances organisationnelles du système adaptatif.

Membrane d'agent

> *Une membrane d'agent est un composant qui permet, dans le sens agent - réseau, de générer des informations relatives aux tendances fondamentales, et dans l'autre sens, réseau membranaire - agent, de*

> *saisir et comprendre les indications générales relatives aux tendances fondamentales localisées dans les formes membranaires.*

La membrane véhicule donc, vers l'extérieur de l'agent, une information particulière, de la même catégorie que les traits sémantiques qui caractérisent une tendance fondamentale. Ces traits, qui seront représentés vectoriellement, sont appelés des *indications membranaires*.

Indication membranaire

> *Une indication membranaire est une information mesurant l'écart entre le sens de variation du comportement de l'agent et la variation de l'organisation soumise à ses tendances fondamentales. Elle est produite par la fonction membranaire de l'agent et est localisée dans la membrane de ce dernier.*

Les indications membranaires produites par tout agent sont des informations relatives à l'écart entre la variation de l'état de l'agent et la tendance globale de réorganisation des agents.

La fonction qui réalise le couplage entre la structure de l'agent et sa membrane est appelé *fonction membranaire*. Elle met en relation deux informations : le sens du comportement de l'agent et le sens de variation de l'organisation réifié par la structure de sortie du réseau membranaire.

Fonction membranaire

> *La fonction membranaire d'un agent est une fonction représentée par l'action d'un composant propre à l'agent et qui lui permet :*
>
> *- de mesurer l'état de sa trajectoire comportementale,*
>
> *- d'interpréter la forme membranaire envoyée par le réseau membranaire,*
>
> *- de construire une mesure d'écart entre son état courant et celui relatif à l'organisation et qui est représenté par la forme membranaire courante.*

Cette fonction a donc une capacité bidirectionnelle.

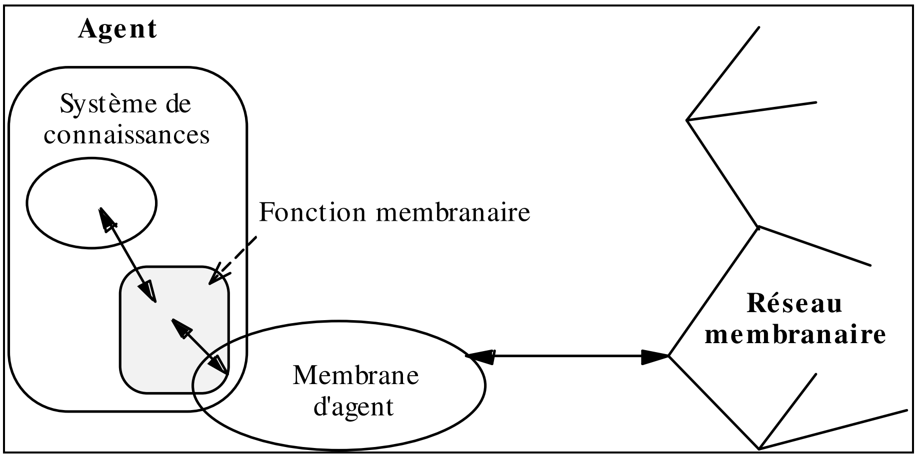

Figure 4. Agent, membrane et réseau membranaire

L'indication membranaire générée par l'agent est capturée par le sous-système chargé de réifier les tendances fondamentales et nommé réseau membranaire.

Réseau membranaire

> *Un réseau membranaire est une structure neuro-mimétique qui représente dans ses bassins d'attraction, les tendances fondamentales, au sens organisationnel, du système adaptatif.*

Ce réseau est une structure connexionniste, typiquement numérique, dont la dynamique exprime, par son état, les grandes tendances organisationnelles du système.

La sortie du réseau, ce qu'il produit, est envoyée sur la structure de sortie, l'interface réseau - organisation d'agents, pour être mise au format de lecture des agents. Ce que produit cette structure interface s'appelle *forme membranaire*.

Forme membranaire

> *Une forme membranaire est l'interprétation de ce que le réseau membranaire produit. C'est donc la forme produite par la structure de sortie interfaçant le réseau membranaire et l'organisation d'agents, mise au format de compréhension de chaque agent.*

Il sera parfois possible de représenter directement la forme membranaire par l'état de sortie du réseau membranaire, sans avoir à l'adapter. Cependant, il sera nécessaire de synchroniser cette sortie avec la distribution effective dans les agents.

4.2 - Tendances fondamentales et mise en situation de l'agent

Un réseau membranaire est un système neuro-mimétique où chaque noeud est nommé *noeud membranaire*. Un tel noeud est un neurone formel, selon le type de réseau employé.

Le réseau membranaire doit produire des informations sur les tendances organisatrices fondamentales du système et notamment des informations relatives à l'activité de l'ensemble des agents. Les tendances sont relatives au champ d'activité du système. Elles sont toujours définies de manière duale, pour pouvoir générer des oppositions et ainsi faire tendre le système vers un état de stabilité seulement relative, qui n'est surtout pas un état d'équilibre.

Les caractères de ces tendances, ce qui permet de les déterminer selon le domaine d'application du système adaptatif, sont :
1. aller vers la régularité du fonctionnement,
2. aller vers une régularité singulière,
3. aller vers l'insatisfaction de toutes les tendances fondamentales,
4. aller vers la satisfaction d'une tendance fondamentale,
5. aller vers un conflit de tendances fondamentales,
6. aller vers la stabilisation de l'organisation sur un état reconnu,
7. aller vers la stabilisation de l'organisation sur un état inconnu,
8. aller vers une organisation chaotique,
9. aller vers une fracture de l'organisation,
10. aller vers un état instable,
11. aller vers des états antagonistes,
12. ...

Pour un système du domaine économique où les agents représentent des entreprises ou des services, ces tendances fondamentales seront :
- se développer ensemble de manière équilibrée,
- dégager un groupe fortement dominant,
- spécialiser les fonctions des agents économiques,
- généraliser les fonctions des agents économiques,
- éliminer les éléments les plus faibles,
- conserver la diversité,
- accroître les agents,
- réduire le nombre des agents par fusion,
- définir une structure hiérarchique,
- définir un marché équilibré,
- définir des accords rigides,
- définir des compromis variables,
- ...

Pour un système dans lequel les agents représentent les éléments d'un écosystème, les tendances fondamentales seront :

- se développer de façon équilibrée,
- occuper tout le territoire,
- se sédentariser,
- se spécialiser,
- généraliser son comportement,
- éliminer les éléments faibles,
- s'associer pour croître,
- muter pour se développer,
- conserver ses structures identitaires,
- ...

Toutes ces tendances fondamentales réfèrent au comportement de l'organisation d'agents. Elles représentent le sens de variation de la trajectoire comportementale du système et elles peuvent être toutes simultanément représentées dans le réseau membranaire selon la capacité de celui-ci. Le système se comporte alors par soumission à des tendances contingentes et il n'atteint jamais d'état d'équilibre. Il est stable, au mieux, un certain moment [von Bertalanffy 1973], [Prigogine 1982].

Ces tendances représentent ce vers quoi l'état organisationnel de l'ensemble des agents *doit* se diriger, selon qu'elles sont correctement prises en compte, ou non, au niveau de chaque agent. L'ensemble du système est alors considéré comme un système dynamique, qui évolue systématiquement dans le temps, en mettant en situation chacun de ses agents.

Mise en situation de l'agent

> *L'agent a une perception de sa propre situation, par rapport à son état courant, ses buts, ses engagements ... Il est également informé de l'état du réseau membranaire, par la forme membranaire, de la tendance globale vers laquelle se dirige l'organisation. Il apprécie, selon ses propres caractères, sa situation par rapport à la situation globale qu'il perçoit. Il situe ainsi sa trajectoire comportementale propre par rapport à l'appréciation de la trajectoire comportementale globale du système. Il produit une mesure d'écart, à l'aide de sa fonction membranaire. Cette mesure d'écart est une indication membranaire qui sera envoyée par l'agent au réseau membranaire.*

Remarquons bien que la mesure d'écart est une mesure au second degré : c'est un écart entre des variations. Il s'agit de la mesure entre le sens de variation de l'agent, la variation de sa trajectoire comportementale, et le sens de variation de l'organisation donné par la forme membranaire appréciée par l'agent.

Indication membranaire d'un agent = fm_A*(Variation de l'état local de l'agent, Information membranaire perçue par l'agent)*

où fm_A est la fonction membranaire de l'agent. Cette fonction dépend donc de deux paramètres explicites. Elle dépend évidemment fortement du temps, du moment où elle effectue son calcul.

On représente ainsi les connaissances globales sur l'organisation par des indications membranaires qui ont un caractère organisationnel marqué. On dira qu'un agent qui manipule de telles informations, c'est-à-dire qui les considère comme des connaissances, aura une *propriété d'adaptativité*.

Propriété d'adaptativité d'un agent

> *Pour un agent adaptatif, toute action interne ou dirigée dans son environnement, donne lieu à la génération d'une indication membranaire considérée comme de la connaissance. Cette indications membranaire est transmise, ou non, via le filtre membranaire de l'agent, au réseau membranaire.*

Ainsi, toute activité d'un agent adaptatif est *explicitement interprétée* selon le point de vue organisationnel de l'ensemble du système. Ce point de vue organisationnel décrit, qualitativement et quantitativement, en quoi l'agent contribue au développement de l'organisation.

Nous pouvons maintenant proposer une définition d'un SMA adaptatif prenant en compte les définitions données ci-dessus.

Système Multiagent adaptatif

> *Un système multiagent adaptatif est un système composé de deux ensembles plastiques d'entités s'activant en couplage fort, l'un formé d'une organisation d'agents dont les activités sont cognitives et locales et l'autre formé d'un réseau neuro-mimétique reconformant représentant les tendances fondamentales du système. Les deux systèmes sont en interaction par échange asynchrone d'indications membranaires.*

4.3 - Algorithme de fonctionnement d'un SMA adaptatif

L'algorithme suivant décrit le fonctionnement général d'un système multiagent adaptatif [C.f. Fig. 5]. On suppose que le mécanisme de couplage est réalisé, que les agents sont définis et que le réseau membranaire a mémorisé des tendances fondamentales.

<u>Algorithme d'activité</u>

Début

[Interaction du système avec l'environnement, prise d'informations]

Tant que *les processus sont actifs* **faire en parallèle**

début
[*si des agents de l'organisation sont actifs*]
activité de l'ensemble des agents pour résoudre le problème courant par activations locales, coopérations et communications.

[*si les indications membranaires sont pertinentes pour l'entrée de la structure de couplage*]
synchronisation et transmission des indications : activité de couplage.

[*si un vecteur membranaire est transmis au réseau membranaire*]
activation du réseau membranaire, indiquant la tendance organisationnelle globale, selon à l'état de l'organisation d'agents, génération d'une forme membranaire transmise à l'organisation d'agents.
fin

Fin.

Figure 5. Algorithme d'activité d'un système adaptatif

Dans l'algorithme, la notion de processus doit être entendue au sens systémique du terme, c'est-à-dire comme *organisation en fonctionnement*. Il est bien évident qu'elle est plus générale que celle de processus informatique ou de "thread", qui seront implémentées au niveau des composants actifs du système.

Les trois processus décrits dans la boucle "tant que" sont activés en parallèle. L'organisation d'agents opère selon ses règles (action, pro-action, communications). La structure de couplage, lorsqu'elle estime disposer d'indications pertinentes, réalise ses transmissions, soit vers le réseau, soit vers l'organisation d'agents. Le réseau membranaire, lorsqu'il dispose d'un vecteur d'entrée, s'active et fait se produire une nouvelle forme membranaire.

Un tel système n'a évidemment pas d'état final, qui est une notion réservée aux systèmes de calcul résolvant des problèmes. Il s'arrête de fonctionner lorsqu'il est en panne ou lorsqu'on l'arrête physiquement. Sinon, il produit, par l'activation de ses agents, des plans d'action et agit, de façon continue et adaptée, sur l'environnement. Nous avions précisé dans [Cardon 1999] que tout état stable d'un tel système était un point fixe du processus de couplage, en remarquant qu'un tel point fixe n'était que temporaire. C'est exactement la cas ici, où toute sollicitation de l'environnement fait se réorganiser le système, sous l'action de son processus de couplage.

Une version très détaillée de cet algorithme fera l'objet d'une autre publication. Les questions de synchronisation et du moment de la saisie des indications membranaires sont en effet des problèmes en soi, conduisant toute l'évolution effective de tels systèmes.

V - LA STRUCTURE COMMUNICANTE ENTRE ORGANISATION D'AGENTS ET RESEAU MEMBRANAIRE

Un tel système adaptatif, pour satisfaire à la fois à un principe d'adaptation à son environnement et à un principe d'auto-conservation de l'organisation de ses entités, sera architecturé à partir d'un système de couplage entre deux sous-systèmes, l'organisation des agents et le système neuro-mimétique réifiant les tendances fondamentales. Ce système de couplage va permettre à l'ensemble des composants du système de se stabiliser en produisant une action adaptée sur l'environnement.

Le système adapte son organisation, c'est-à-dire ses agents et les neurones de son réseau membranaire, principalement à elle-même et de manière seulement indirecte par rapport aux stimuli venant de son environnement. A partir d'un certain stimulus, ou de la pro-action significative de certains agents ou groupes d'agents, le système active le processus de couplage entre ses deux structures plastiques, ce qui va permettre à la fois d'échanger des indications membranaires, d'altérer le comportement même des agents et des neurones et d'engager le système à user de ses tendances fondamentales. Le processus de couplage se poursuit jusqu'à la stabilisation, éventuelle et très sensible aux actions internes et externes, des deux ensembles d'entités.

5.1 - Structure adaptative d'un agent

Le problème est maintenant de définir la structure précise d'un agent lui permettant de générer et d'envoyer au réseau neuro-mimétique réifiant les tendances du système des indications membranaires, c'est-à-dire des informations relatives à ses buts, à son comportement et à son placement organisationnel dans des groupes.

Les constituants de base de l'agent seront les suivants [C.f. Fig. 6] :
1. un sous-système d'action sur son environnement,
2. un sous-système de communication avec les autres agents,
3. un sous-système de connaissances lui permettant de se représenter sa situation courante,
4. un sous-système de méta-connaissances lui permettant d'évaluer ses buts, actions et communications, un sous-système dit de comportement, indiquant son état courant et ce qu'il peut atteindre comme nouvel état, par ses actions ou pro-actions,
5. un sous-système de cohérence structurelle, contenant ses propres besoins fondamentaux, ses fonctions, et lui indiquant si sa structure est cohérente avec ses besoins, opérationnelle pour l'action, et s'il doit ou non la modifier.

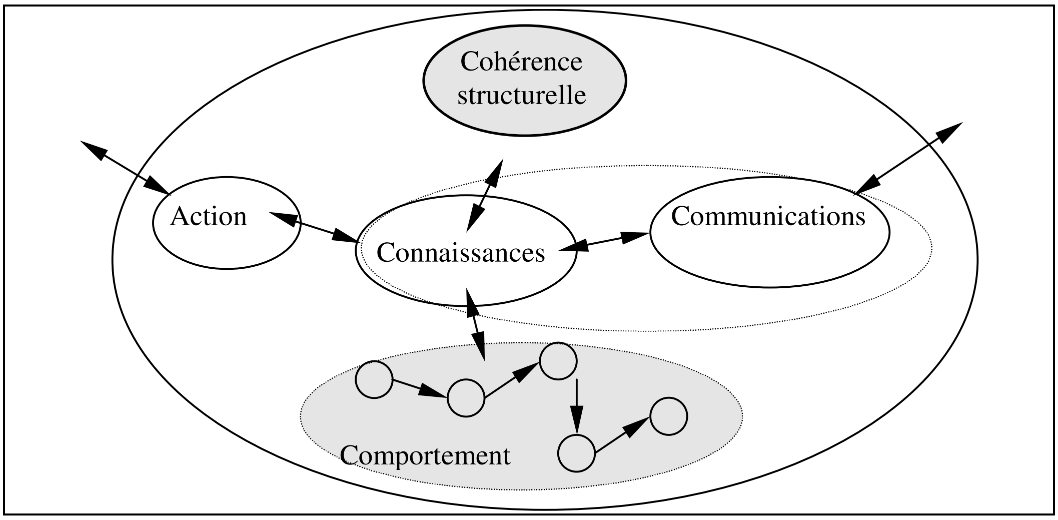

Figure 6. Structure générale d'un agent adaptatif

Un tel agent a donc, par rapport aux agents classiques (voir par exemple l'architecture proposée dans [Guessoum 96]), une composante supplémentaire importante. Il dispose en effet d'un sous-système dit de *cohérence structurelle* qui est similaire à la composante exprimant les tendances fondamentales du système lui-même. Le sous-système de cohérence structurelle représente le caractère adaptatif de la structure de l'agent. Il indique sa tendance à l'évolution. Mais ce caractère est représenté ici par un composant, et l'est donc fonctionnellement. En cela, il diffère conceptuellement du réseau membranaire avec son système de couplage. Notons que son absence aurait rendu l'agent peu cohérent, peu consistant, avec la partie du système contenant le réseau membranaire.

Cette composante importante a pour rôle d'évaluer la structure de l'agent par rapport à ses besoins fondamentaux représentés par ses buts à atteindre. Lorsque l'agent est construit, il est doté de fonctionnalités relatives à son rôle et à ses actions dans l'organisation. Au cours du fonctionnement du système, et donc de la mise en action de l'organisation d'agents, les tendances fondamentales du système vont s'exprimer et vont influencer à la fois l'organisation d'agents et les agents. Au niveau de l'agent, l'influence s'exercera par une certaine modification de son état, de ses buts courants, et également de ses fonctionnalités. Ainsi, l'agent pourra se trouver dans un état de stabilité relative où se buts, actions et fonctionnalités ne seront plus tout à fait cohérents. Dans ce cas, sa composante de cohérence structurelle aura pour rôle de modifier sa structure, et essentiellement, comme nous allons le voir, son mécanisme de comportement.

L'action de l'agent, à la réception éventuelle de communications ou par sa pro-action, est soumise aux indications de ce qui représente son sous-système comportemental. Selon l'état du sous-système comportemental, il sollicitera son système de connaissances et de méta-connaissances, décidera d'agir d'une certaine façon ou bien d'une autre, ou décidera de s'altérer structurellement. La question est de décider comment se représente ce sous-système comportemental.

Nous décidons de représenter le sous-système comportemental à partir d'une base rationnelle, c'est-à-dire se développant automatiquement. Il s'agira d'un automate à états de type ATN (Augmented Transition Network) [Bobrow & Fraser 1969], [Guessoum 1996], [Durand 1999].

Un ATN est un graphe avec des arcs étiquetés par des indications de tests qui permettent le franchissement d'un état vers un autre. Les noeuds d'un ATN sont groupés en sous-réseaux définissant un certain caractère de franchissement. Chaque état de l'ATN représente un certain état de description d'activation des composants de l'agent (méthodes actives, connaissances actives ...). Les caractères dont un noeud, ou un ensemble de noeuds, sont dotés, sont donc appréhendés d'après le fonctionnement de l'agent, c'est-à-dire d'après l'activité de ses différents composants. Chaque état décrit un type d'activation, repéré par les caractères activés, de certains ensembles de composants de l'agent.

La représentation du sous-système comportemental par un ATN a été proposé dans [Guessoum - Briot 1999] comme mécanisme très approprié permettant de gérer les pro-actions et les actions d'un agent cognitif. Evidemment, cet automate devra ici pouvoir se transformer, c'est-à-dire changer sa forme et ses fonctionnalités. Sa structure est bien adaptée pour cela.

Un tel agent, par le fait que son comportement est basé sur un ATN et qu'il peut le modifier par l'action de sa composante de cohérence structurelle, sera dit doté d'une *structure adaptative*.

Structure adaptative d'agent

> *Un agent à une structure adaptative s'il est formé de certains composants spécifiques (connaissance, méta-connaissances, action, communication, cohérence structurelle) et s'il est capable de modifier la structure du composant qui décide de son comportement (son ATN) ainsi que les relations entre ses composants (importance, valuation, synchronisation), à la réception d'un stimulus, ou simplement selon sa pro-action, par l'action de sa composante de cohérence structurelle.*

Les composants classiques constituant l'agent ne changent pas de rôle, mais seules changent éventuellement leurs structures (l'ATN notamment), et les relations entre ces composants. Le comportement de l'agent, représenté et compris au seul niveau de ses composants interopérables, est alors semblable à un fonctionnement par clôture opérationnelle de système autopoiétique [in Varela op. cité], mais cette clôture est ici représentée au niveau de composants symboliques.

Un agent a structure adaptative peut donc se modifier et adapter sa structure à son propre environnement, qui est composé des autres agents, et des informations membranaires.

Adaptation de la structure d'un agent

> *L'adaptation de la structure d'un agent à la suite de stimuli externes ou de sa proaction est le processus de modification implicite des relations entre ses composants (on dira aussi de restructuration de ses composants). C'est, pour un agent adaptatif, l'altération de son ATN et la modification des liens entre ses composants.*

5.2 - Procédé d'altération de la composante comportementale d'un agent

Chaque activation de l'agent, à la suite de la réception d'un stimulus ou de sa pro-action, revient à mettre en action son ATN, à partir du noeud représentant son état courant, en cherchant les franchissements admissibles descripteurs du ou des nouveaux états courants.

Les deux opérations à réaliser pour que la structure représentant le comportement soit raisonnablement altérable sont :
1. l'expansion d'un noeud ou d'un franchissement,

2. la réduction d'une partie connexe de l'ATN en un unique noeud.

Pour cela, les agents sont augmentés d'un module de modification de l'ATN. Ce module comprend un procédé d'expansion et un procédé de réduction.

Procédé d'expansion d'un franchissement dans l'ATN

Pour un état courant de l'ATN avec un franchissement possible vers un autre état, une expansion revient à chercher et à analyser les connaissances relatives à l'état courant et à son éventuel franchissement. Ces connaissances sont disponibles dans les composants de l'agent.

Ceci est effectué en utilisant une méthode spécifique du module de modification de l'ATN. Si les connaissances manipulées pour le franchissement de l'état courant sont significatives au regard du composant de cohérence structurelle, ce qui est calculé par seuillage avec une distance sémantique, le composant d'expansion de l'ATN peut créer un nouvel état sur le lien de franchissement et renommer les préfixes et suffixes des étiquettes du lien de franchissement.

Par ce procédé, un ATN initial grossier peut éventuellement se raffiner selon toutes les connaissances élémentaires dénotées dans tous les composants de l'agent, pour aboutir au déploiement total des possibilités comportemental, représentant toutes les cas d'utilisation des connaissances de l'agent.

Procédé de réduction de l'ATN

Il s'agit, dans la réduction de l'ATN, de joindre deux états contigus en un seul, c'est-à-dire d'annuler un franchissement. L'opération, simple, revient à supprimer le franchissement, à renommer les deux noeuds adjacents en un seul et à renommer les transitions des noeuds externes.

Elle est effectuée sous le contrôle du composant de cohérence structurelle qui, par une méthode prônant l'économie, tend à faire se réduire les liens dans l'ATN.

Conditions de modification de l'ATN : l'apprentissage

L'ATN est altéré, en augmentation ou en réduction de ses états, selon la décision opérée par le composant de cohérence structurelle. Le rôle de ce composant, dans ce cas, est de calculer une valeur d'usage relative à l'efficacité du franchissement d'un noeud vers un autre dans le contexte de l'état général de l'agent. Le module de méta-connaissances de l'agent fournit des indications sur la performance des actions réalisées, et le composant de cohérence structurelle évalue l'efficacité de la structure ayant produit ces actions.

Une fonction d'efficacité, dans le composant de cohérence structurelle, calcule la performance de la partie de l'ATN ayant contribué aux actions. Si la suite de franchissements est effectuée très fréquemment et si elle est significative pour l'atteinte des buts de l'agent, la fonction d'efficacité pourra décider de symboliser ces franchissements par un seul état, et donc de réduire l'ATN.

Si un franchissement demande la manipulation, à chaque fois répétée, de certaines connaissances et méta-connaissances du module de connaissances, puis des communications avec d'autres agents pour validation, le module de cohérence structurelle pourra décider de déployer le franchissement, jugé trop général, en y incluant des états représentant des connaissances contextualisées.

La fonction d'efficacité du composant de cohérence structurelle évalue donc la *satisfaction* de l'agent dans sa performance d'atteinte de ses buts, ou d'un de ses buts. Ainsi, la modification de l'ATN revient à un apprentissage par *renforcement et sélection sémantique*. L'agent a, par ce mécanisme, un fonctionnement basé sur un apprentissage implicite.

Apprentissage implicite

> *Un agent structurellement adaptatif, dont le comportement est basé sur un ATN évalué par un composant d'efficacité structurelle, a son caractère d'adaptation essentiellement fondé sur la modification de la structure de cet automate. Cette modification est la réification, dans sa structure, d'un procédé d'apprentissage par évaluation qualitative de ses actions comportementales, apprentissage par renforcement et choix.*

Un agent structurellement adaptatif voit donc sa propre structure se modifier selon l'évaluation qualitative de ses actions ou pro-actions, selon les décisions de son composant de cohérence structurelle.

VI – L'ADAPTATIVITE

Nous présentons maintenant le rapport de nécessité entre structure adaptative, agent adaptatif et système adaptatif au sens organisationnel.

6.1 - Propriété d'adaptativité d'un agent

Un agent adaptatif est un agent qui doit manipuler des informations membranaires, relative à sa mise en situation dans l'organisation d'agents. Il a un moyen d'appréhender la conformation de cette organisation, c'est-à-dire que sa géométrie représente ses tendances

Pour cela, il doit pouvoir lier des connaissances relatives à ses buts locaux et des connaissances liées à l'évaluation de son comportement. Il doit pouvoir modifier ses propres tendances, et donc sa propre structure, pour pouvoir se conformer aux indications relatives à l'organisation du système. Il doit être structurellement adaptatif.

Un agent qui peut générer des informations organisationnelles nouvelles, non stockées au préalable dans un composant *ad hoc*, doit avoir la capacité d'observer la modification de sa structure, de l'état de ses composants, dans l'optique d'une méta-observation qui le situe comme élément plastique dans l'organisation [Pitrat 1983]. L'observation de cette modification structurelle doit le conduire à représenter et transmettre des caractères de l'organisation de portée globale, et non plus simplement des caractères locaux.

La génération des caractères organisationnels, comme par exemple pour des agents économiques, les tendances fortes du marché, les ruptures d'équilibre les plus probables, la formation des groupes dominants ..., est calculée selon la mesure de la variation de la structure de l'agent sous l'effet des stimuli et de sa pro-action.

Un agent adaptatif ne fournit pas des informations de niveau *méta* déjà placées dans l'un de ses composants. Il construit, par l'activité de son composant de cohérence structurelle et par l'effet de son altération, des connaissances organisationnelles relatives à sa mise en situation dans son environnement. Sa modification structurelle entraîne une représentation nouvelle de sa mise en situation dans l'environnement. Une information organisationnelle, ou membranaire, est une mesure de type gradient de la reconformation structurelle de l'agent.

Agent adaptatif

> *Un agent adaptatif est un agent à structure adaptative capable de générer naturellement, par l'auto-observation de la variation de sa propre structure, des connaissances organisationnelles relatives à sa mise en situation dans l'ensemble des agents.*

6.2 - Conditions générales d'adaptativité

Tout agent d'un système adaptatif, qui exprime dans son fonctionnement les relations entre son comportement local et le comportement global de l'organisation, doit pouvoir émettre et recevoir des informations membranaires de caractère organisationnel. C'est la condition pour que chaque entité de base du système, c'est-à-dire l'agent, soit lié à l'organisation. L'agent, pour émettre et recevoir de l'information de niveau organisationnel, doit être adaptatif. Pour être adaptatif, sa structure doit être adaptative. Ainsi, un SMA adaptatif est composé d'agents adaptatifs dont la structure elle-même est adaptative.

Nous décrivons ceci par la propriété suivante, qui lie organiquement les trois types d'adaptativité :

Propriété d'adaptativité entre système, agents et structure des agents

Organisation adaptative d'agents ⊃
Agents adaptatifs
⊃ **Structure adaptative**

⊃ signifiant : *est dynamiquement composé de*

La propriété d'adaptativité est ainsi considérée comme permanente. Elle est présente dans la structure de l'agent, dans l'agent en activité, c'est-à-dire en communication et en relation avec son organisation, et également dans le système dans son entier, placé dans son environnement de fonctionnement.

L'adaptativité d'un système composé d'agents implique que les agents *soient* adaptatifs et que la structure de ceux-ci *soit* également adaptative. Ainsi, l'adaptativité n'est pas une propriété locale ni émergente, mais est une propriété organique, dynamique, dont le système et ses composants sont dotés. Cette propriété est en quelque sorte dense dans tous les constituants du système que l'on veut adaptatif. Ce qui sera émergent, alors, dans un tel système adaptatif, sera un certain état stable de l'organisation des agents et du réseau membranaire, qui indiquera que l'état organisationnel est *adéquat* à l'état de l'environnement. Cela constitue la forme minimale de l'action de signification d'un organisme dans son monde.

VII - CONCLUSION

L'approche des systèmes que nous avons présentée fait apparaître ceux-ci comme des systèmes ouverts, au sens où l'entendait von Bertalanffy, c'est-à-dire organisationnellement complexes, et dans lesquels la propriété d'adaptativité n'est pas un certain rôle ni une certaine fonctionnalité prise parmi d'autres. L'adaptativité est *le* caractère implicite d'un système soumis à des tendances fondamentales, et qui est adaptatif par *nécessité*. Un tel système fonctionne en se stabilisant sur des états qui ne sont jamais des états d'équilibre, en adaptant systématiquement leur comportement à la fois à l'environnement et à leur propre organisation.

Les résultats que nous avons présentés sont actuellement expérimentés sur certains cas typiques, où l'on s'efforce de montrer la robustesse et la fiabilité de tels systèmes par rapport à des systèmes plus classiques, qui résolvent des problèmes qui leur sont donnés à la construction.

Notre approche ouvre sur une problématique de recherche importante, et certainement fort difficile : comment faire se créer automatiquement, par un système qui est initialement composé d'agents adaptatifs à structure adaptative, un système adaptatif, qui génère ses propres tendances, les réifiant dans une structure qu'il déploie, telle une enveloppe organisationnelle ?

VIII - BIBLIOGRAPHIE

[Bertalanffy 1973], von Bertalanffy L., *Théorie générale des systèmes*, Bordas, Paris, 1973.
[Bobrow & Fraser 1968] Bobrow D.G., Fraser J.B., *An augmented state transition network analysis procedure*, Proc. Int. Joint Conf. on AI, I, 557, 1968.
[Cardon - Durand 1997] Cardon A., Durand S., *A Model of Crisis Management System Including Mental Representations*, AAAI Spring Symposium, Stanford University, Californie, USA, 23-26 mars 1997.
[Cardon 1999] Cardon A., *Conscience artificielle et systèmes adaptatifs*, Eyrolles, Paris, 1999.
[Clancey 1985] Clancey W.J., *Heuristic Classification*, Artificial Intelligence, vol. 27, pp. 289-350, 1985.
[Clergue 1997] Clergue G., *L'apprentissage de la complexité*, Hermès, Paris, 1997.
[Cohen 1995] Cohen & al., *Simulating Organizations, Computational Models of Institutions and Groups*, AAA8 Press/The MIT Press, California, USA, 1995.
[Davis 1982] Davis R., *Report on the Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, in SIGART Nexletter, n° 80, pp- 13, 23, 1982.

[Durand 1999] Durand S., *Représentation de points de vue multiples dans la couche communicationnelle d'un Système d'Information et de Communication*, Thèse d'Université, Université du Havre, décembre 1999.

[Ferber 1995] Ferber J. , *Les systèmes multi-agents*, InterEdition, Paris, 1995.

[Guessoum - Briot 1999] Guessoum Z. and Briot J.P., *From Active Objects to Autonomous Agents*, IEEE Concurrency. 7(3): 68-76, November 1999.

[Guessoum 1996] Guessoum Z. *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*, Thèse de l'Université Paris 6, LAFORIA, mai 1996.

[Guessoum –Cardon 1999a] Guessoum Z**.** and Cardon A.. Self-Adjustable Autonomy in Multi-Agent Systems. AAAI'99-Self Adjustable Autonomy. Stanford, 1999.

[Guessoum - Cardon 1999b] Guessoum Z., Cardon A. and Ramdani A., *Toward self-adaptive multi-agent systems*, Maamaw'97, Valencia, juin 1999.

[Jodouin 1994] Jodouin J.-F., *Les réseaux neuro-mémitiques*, Hermès, Paris, 1994.

[Kohonen 1990] Kohonen T., *The self-organizing map*, Proceedings of the IEEE, vol. 78, n° 9, p. 1464 - 1480, 1990.

[Krogh 1995] Krogh Christen, *The Rights of Agents*, in Intelligent Agents II, IJCAI'95 Workshop (ATAL), p. 1 - 16, Springer Berlin, 1995.

[Kuokka & Harada 1995] Kuokka D., Harada L*., On using KQML for matchmaking*, Proc. of First International Conference on Multiagent Systems, Menlo Park, CA., AAAI Press, USA, 1995.

[LeMoigne 1990] Le Moigne J.-L., *La Modélisation des Systèmes Complexes*, Dunod, Paris 1990.

[Mayr 1963] Mayr E., *Animal species and evolution*, Belknap Press, Harvard University Press., Boston, Mass., USA, 1963.

[Morin 1986] Morin E., *La méthode, Tome 3 : La connaisance de la connaissance*, Essais, Seuil, 1986.

[Pitrat 1993] Pitrat J., *L'Intelligence Artificielle : au-delà de l'intelligence humaine*, in "*Le cerveau : la machine-pensée*", DRT, D. de Béchillon, L'harmattan, Paris, 1993.

[Prigogine 1982] Prigogine I., *Physique, temps et devenir*, Masson, Paris, 1982.

[Thom 1972] Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, W. A. Benjamin, INC, Reading, Massachusetts, USA, 1972.

[Varela 1989] Varela F., *Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant*, Seuil, Paris, 1989.