Modélisation des Systèmes Adaptatifs par Agents : vers une Analyse-Conception Orientée Agents

Alain Cardon
LIP6 UMR 7606
Paris VI UPMC
4 Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05
Alain.Cardon@lip6.fr

Résumé
La construction de certains systèmes simulant des organismes vivants ou des structures sociales ne peut être appréhendée avec une approche mécaniste. Ces systèmes sont typiquement adaptatifs et leur comportement est non régulier. Leur conception nécessite de prendre en compte les notions de non régularité organisationnelle et de développement autonome. Elle s'appuie alors typiquement sur le paradigme agent, en posant le problème du niveau de la définition organisationnelle du concept d'agent, qui n'est plus seulement fonctionnelle. Le système d'agents doit alors exprimer des caractères radicaux, telle que la réification de la notion d'émergence, la propriété de reproduction auto-contrôlée de groupes d'agents et le comportement non linéaire.

Abstract
The construction of some system simulating leaving organisms or social systems, cannot be implemented using a mechanical approach. These systems are typically adaptive and their behavior is no regular. Their conception entail to take into account the notions of no regular organizations and of autonomous growth. The conception is founded on the agent paradigm, setting the problem at the level of the agent concept, which is organizational and not only functional. Then, the multi-agent system must express radical characters, such reification of emergence, property of controlled self-reproduction of group of agents and no linear behavior.

Avertissement

Ce rapport de recherche suit la présentation de nos travaux sur la conscience artificielle publiés en Rapport Laboratoire LIP6, en Février 1998. Il sera souvent fait référence à ce rapport, dans lequel est présentée l'importance des systèmes adaptatifs et où sont données de nombreuses définitions concernant ces systèmes, que nous ne reproduirons donc pas ici.

L'optique de ce rapport de recherche est double :

1. présenter une approche de la conception des systèmes adaptatifs se démarquant radicalement de l'approche d'analyse-conception orientée objets prépondérante dans de vastes secteurs de l'Informatique,
2. présenter des travaux de recherche récents d'abord en Rapport Laboratoire, pour notre communauté la plus proche.

Ces travaux s'appuient sur les recherches effectuées par ailleurs par cinq doctorants qui sont, par ordre alphabétique, Stéphane Allorge, Hamina Boukachour, Stéphane Durand, Franck Lesage, Jean-Philippe Vacher.

Introduction

Nous allons traiter un problème qui ouvre sur une certaine polémique : la démarche de modélisation d'un système complexe par l'utilisation systématique d'agents et d'organisations d'agents, en n'utilisant la modélisation par objets que par la suite, comme simple moyen pour l'implémentation.

La réalisation classique d'un système informatique procède aujourd'hui d'une démarche qui suit les principes du Génie Logiciel dans son approche orientée objets. En effet, la démarche adoptée par le modélisateur, et le constructeur, relève généralement, pour ses qualités multiples, du paradigme objet. Il existe de plus de très nombreux langages à objets et les méthodes OMT [RUM 97] ou UML [MUL 97] utilisent le concept d'objet comme entité de base de la modélisation, en s'appuyant sur les trois caractères classiques de celui-ci : permanence, état et comportement. La construction du système se déploie alors selon des étapes bien précises, allant de l'analyse-conception jusqu'au code et aux tests, avec un paradigme unifié.

Mais la démarche de modélisation par objets se fonde sur un a priori qui restreint quand même le domaine des systèmes que l'on y modélise. Le système est, dans l'approche objet, considéré comme *fonctionnellement bien décomposable* [CAR 96]. Il est considéré comme constitué d'éléments nombreux, parfaitement identifiés comme le sont les relations entre ces éléments, dont les rôles sont donc entièrement établis avant que de passer au codage et à la mise en oeuvre. Par cela, la structure du système correspond bien à ce qu'on attend de son fonctionnement. Les méthodes d'analyse et de conception permettent de représenter et d'évaluer la structure du système ainsi que la pertinence des diagrammes de classes, abstraction des objets.

Mais tous les systèmes possèdent-ils cette propriété de bonne décomposabilité, qui permet de concevoir l'organisation en relation bijective avec la structure ? On peut, aujourd'hui, répondre par la négative. La recherche en Informatique ouvre de nouveaux domaines, notamment en Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), et permet de s'intéresser à des systèmes aux caractères structurels beaucoup moins statiques que ceux des systèmes bien décomposables, qui sont et restent mécanistes. Comment, par exemple, modéliser puis construire un système qui aurait pour caractère comportemental principal de se représenter son environnement pour s'y déployer socialement *le mieux possible,* et non pour y résoudre un problème bien posé ? Ce système, qui peut-être un robot ou un groupe de robots, est fortement autonome et doit posséder des caractères semblables à ceux des systèmes vivants sociaux. De tels systèmes sont ceux étudiés dans certains domaines de l'IAD à l'aide des systèmes multiagents.

Nous pensons que ces systèmes, aux caractères comportementaux typiquement adaptatifs, ne sont pas réalisables en procédant d'une démarche semblable à celle qui est utilisée dans le Génie Logiciel orienté objets. Il va falloir concevoir une certaine méthode de création de ces systèmes, dans laquelle les composants informatiques de base, les agents, ne seront plus que des générateurs de constitution de la structure du système, dont l'agencement de ces éléments générateurs ne sera que des agrégations émergentes plastiques de sous-systèmes adaptatifs, dont le comportement général ne sera pas une adéquation fonctionnelle à des situations environnementales prévues, mais une auto-adaptation globale réalisée par clôture opérationnelle sur un environnement perçu par le système et dont le problème de la stabilisation relèvera de l'étude de sa trajectoire dans des espaces descriptifs avec attracteurs chaotiques. Le monde de ces agents est autre que celui des objets.

Nous présentons dans ce rapport les caractères principaux de la modélisation par objets, pour en montrer les limites en ce qui concerne la construction des systèmes aux caractères typiques d'adaptabilité. Nous présentons ensuite les premiers caractères d'une démarche de modélisation orientée agents, qui doit permettre de concevoir puis de réaliser des systèmes adaptatifs.

1- Analyse et conception par objets

Le centre d'intérêt du Génie Logiciel se situe dans la programmation à grande échelle [BOO 94]. Le but est clairement de rationaliser les développements d'applications conduisant à des codes de très grande taille, réalisés par des équipes de développeurs. A partir d'un problème bien posé, mais considéré comme "complexe" car composé de très nombreux éléments en relation, on entame une démarche de modélisation, dans le temps et l'espace, en s'appuyant soit sur un modèle fonctionnel descendant, soit sur un modèle à objets, où les objets sont composés par agrégations, pour aboutir à la construction du logiciel, avec évaluation et validation continues de la démarche.

On construit ainsi des systèmes, formés de très nombreux modules qui doivent assurer de très nombreuses fonctions. Le Génie Logiciel dans l'approche objet permet de définir clairement, dans une étape initiale d'analyse, les éléments du système et leurs relations, pour pouvoir développer aisément plus tard, dans l'étape de codage, les éléments logiciels, en se référant toujours à ces éléments structurels parfaitement définis et permanents.

L'attitude de contrôle du processus de réalisation aboutissant au code composé de nombreux modules communiquants, revient à préciser entièrement, et d'abord, un certain modèle du système, puis à procéder par la suite au codage, en se plaçant dans le cadre d'une démarche rationnelle unifiée. La voie choisie, celle de l'objet, a en effet permis d'unifier dans l'objet les concepts de base utilisés dans la modélisation, pour éviter les inadéquations conceptuelles et structurelles entre les étapes.

1.1. Les approches fonctionnelles, objets et agents.

G. Gardarin et al. [BGV 97] illustrent l'opposition entre la modélisation fonctionnelle et la modélisation par objets par une métaphore. L'approche fonctionnelle, descendante, revient à trouver, par des découpages fonctionnels successifs, les bonnes fonctions du système, de la même manière que l'on recherche la bonne place des éléments d'un puzzle. Chaque élément a une et une seule place, qui est à trouver ou à définir. Dans le modèle fonctionnel, chaque action est celle de la bonne fonction, au bon moment, sur la bonne donnée.

Dans l'approche par objets, le degré de liberté des entités est plus grand. Les auteurs comparent le problème de la détermination des objets à la construction d'une certaine configuration formée de pièces de Lego^{TM}. Chaque pièce de Lego^{TM} a des possibilités d'agencement avec les autres, nombreuses mais fixées, et l'ensemble de ces pièces doit former un assemblage cohérent, répondant au souhait du constructeur. L'ensemble des objets forme un système répondant typiquement à des sollicitations multiples, limitées, structurellement déterminées.

Nous poursuivrons la métaphore pour illustrer l'approche par agents. On peut par exemple considérer un jardin devant être aménagé par un jardinier. Ce dernier doit en prévoir l'aménagement architectural, technique, et planifier son travail. Il doit préparer les outils, le terrain, y effectuer les plantations et les semis. Ensuite, les plantes vont se développer et croître. Il va en modifier certaines, jugées déficientes ou à la croissance anarchique. Mais il ne pourra influer sur tous les paramètres concernant la vie du jardin : il ne contribuera que partiellement à la croissance effective des plantes, que très peu à la vie des micro-organismes du sous-sol et pratiquement pas aux mouvements des insectes pollinisateurs. Il aura donc un rôle de suscitateur du développement des multiples plantes, et, par simple extension, de la vie et de la mort de nombreux organismes végétaux et animaux de l'écosystème qu'il ne contrôle que très partiellement. De plus, la distance affective entre ce jardinier et son jardin le fera passer du rôle très fonctionnel d'observateur à celui d'acteur.

Les agents, dans ce cas, seront toutes les entités, considérées à une certaine échelle, participant à la vie du jardin, jusque, éventuellement, à des agents idéels qui représenteraient les idées du jardinier à propos de ce problème. Ainsi, l'approche par agents revient à déterminer des éléments générateurs du comportement d'un système complexe, qui va se réorganiser continûment selon différentes échelles temporelles, grâce à ses entités actives et en suivant certaines lois physiques. Le comportement global du système résultera de celui des relations entre les entités, et ce comportement sera parfois régulier, parfois chaotique, dans tous les cas non linéaire. Le modèle comportemental doit donc prendre en compte des possibilités de non régularité du système.

Cela distingue bien l'approche par agents de celles, quand même très mécanistes, retenues avec les modèles fonctionnels et les modèles à objets.

1.2. L'objet

Le concept de base, et qui sera gardé de façon permanente tout au long des différentes phases de réalisation du système en méthodologie par objets est évidemment l'objet. Un *objet* est un concept ou une abstraction ou encore le correspondant d'une certaine chose physique, que l'on dote d'une définition précise et non ambiguë et de limites comportementales strictement définies [RUM 97].

C'est donc une entité qui a une identité permanente, un état et un comportement, à la fois précis et stables. L'objet existe dans le temps et l'espace du système informatique, en se comportant de façon essentiellement réactive, c'est-à-dire de manière contractuelle envers les sollicitations qu'il reconnaît [MEY 87]. Il est un élément de conception et d'action répondant avec justesse et fiabilité à des sollicitations prévues à l'avance dans sa structure. Notons que dans ce cadre, le graphe d'association et d'agrégation des objets est fixé a priori, et sert à définir la structure, permanente, du système.

L'objet a un double rôle : représenter, tel un signe représente quelque chose à propos du réel ou du système en construction, et également permettre la réalisation commode, c'est-à-dire la conception et le codage des objets s'insérant dans les modules. Ce double rôle est très ambitieux, car il revient à unifier par une seule catégorie d'entité totalement définie à la fois la chose abstraite ayant la fonction organisationnelle de base dans le système conçu et d'autre part l'entité très concrète et opérationnelle qui sera l'élément codé du programme.

L'enjeu est de passer de la première de ces catégories, le concept énoncé, à l'autre le plus raisonnablement et naturellement possible, en y contrôlant rationnellement les démarches des équipes qui conçoivent et réalisent ensembles le système. La part du modélisateur inspiré ou du programmeur très astucieux voyant au-delà de son code, disparaît sous la contrainte des outils de développement du cycle de vie du logiciel, qui imposent l'usage de langages de spécification volontairement contraignants.

1.3. Abstraction et classe

La détermination initiale des objets qui seront pris en considération dans le modèle sera réalisée par un processus particulier dit *d'abstraction*. Une abstraction est un procédé de compréhension et de réduction de la complexité structurelle du système à modéliser, qui consiste à déterminer des *invariants* organisationnels. Ainsi, on considère le problème posé dans les termes du cahier des charges, on déploie conceptuellement l'espace de ce problème et on y détache des entités, des choses, ou encore des relations, par découverte et par invention, qui y seront considérées comme invariantes. Ces éléments seront les objets. La définition opératoire que donne G. Booch de l'abstraction est la suivante [BOO 94]:

- *Une abstraction fait ressortir les caractéristiques essentielles d'un objet (qui le distinguent de tous les autres) et donc procure des frontières conceptuelles rigoureusement définies, par rapport au point de vue de l'observateur.*

Cette définition de l'abstraction permet au modélisateur d'exprimer les objets du domaine qui lui paraissent pertinents, et qui seront considérés comme conceptuellement invariants, toujours selon son point de vue, c'est-à-dire satisfaisants à des préconditions et à des postconditions permanentes et non modifiables une fois que définies. Le modélisateur distingue, par découverte, un ensemble d'entités permanentes et significatives dans le domaine qu'il considère, par invention de caractères, comme devant être les objets. Ces objets ont des propriétés statiques et dynamiques, mais ils ont toujours un caractère absolu d'invariance contractuelle [MEY 87].

Une fois les objets pertinents du domaine dégagés, par distinction, le modélisateur va s'intéresser à leur généralisation, c'est-à-dire qu'il va généraliser ce que chaque objet peut représenter dans sa singularité. Il va procéder à une démarche d'abstraction, qui le fait concevoir toute entité modélisée comme une désignation abstraite qui sémiotiquement vaut pour ce qui sera désigné [PEI 84]. Une classe est alors une abstraction pure, qui, d'une certaine manière, représente "l'essence" d'un objet [BOO 94].

On définit une classe comme *l'ensemble* des objets partageant une structure commune et un comportement commun. Après cette définition de la classe, et en partant de celle-ci comme abstraction initiale disponible dans le modèle, on peut alors définir l'objet comme étant une simple *instance* de classe. Un objet n'est donc pas une classe, car il a *plus* de réalité physique que celle-ci. En fait, avec un point de vue plus proche de la programmation, une classe se comprend dans une triple optique : c'est un type abstrait de données, un mécanisme de création d'objets et une représentation de références à des objets d'autres classes [BGV 97]. Ces trois caractères réfèrent typiquement au domaine de la programmation. Il y a bien une prégnance forte du niveau programmation dans le problème de la modélisation des systèmes à l'aide de l'objet, ce qui peut se révéler préjudiciable dans certains cas, pour certains types de systèmes.

Remarquons que lorsque les entités à représenter sont considérées comme très complexes (une interface graphique multimodale par exemple), il est clair que l'on ne pourra déterminer une unique classe, entité abstraite complètement décrite, qui permette d'abstraire l'entité. On pourra alors définir des groupes de classes qui collaborent, pour former ce que l'on nomme usuellement des *composants*.

1.4. Analyse par objet

Le modèle d'analyse par objets est, par définition, le modèle de *description des objets* du système à réaliser. On identifie les objets, en y précisant leur identité, relations, attributs et opérations. Ce modèle permet de décrire les aspects statiques et structurels des entités du système, en partant de la prise en compte des concepts du monde réel que l'on souhaite représenter dans le système.

On précise dans la phase d'analyse ce que l'implémentation devra plus tard résoudre, avec ce souci toujours présent en Génie Logiciel, de réaliser au mieux l'étape de codage.

La détermination des objets et des classes se base sur une certaine catégorisation possible du domaine modélisé. Il existe un certain nombre de catégorisations possibles [BOO 94], comme celle proposée par Shlaer et Mellor, où l'on retient comme genres devant permettre de définir les objets, les choses tangibles, les rôles de certaines choses actives, les événements produits par les choses actives et les types d'interactions entre les choses qui doivent s'activer [S&M 88]. On voit dans cette catégorisation une distinction radicale entre chose et action réalisée par la chose, qui permettra de considérer deux types de caractères différents dans le système : l'un, statique, qui permettra d'identifier de manière permanente, et l'autre, dynamique, qui assurera le mouvement du précédent.

Cette catégorisation se base sur l'existence de traits permanents et réguliers dans le domaine modélisé : on considère un ensemble de choses qui sont toujours elles-mêmes avec des actions typiques qui les déterminent et qui ainsi déterminent, dans leur ensemble, le système. Dans ce cadre mécaniste, il est bien évident que le système est et n'est que l'ensemble de ses parties, c'est-à-dire de ses objets. L'extension temporelle opérée par la suite par Shlaer-Mellor, en dotant les objets de durée de vie, ne change rien au problème. Les entités sont permanentes et régulières dans l'intervalle de temps où elles existent et elle constituent, par leur seule considération, le système.

Dans une autre approche, Rubin et Goldberg déterminent les objets à partir de l'étude du comportement du système[R&G 92]. Mais cette approche opère également par décomposition structurelle, en déterminant à partir du comportement global du système, des sous-systèmes stables en relations régulières, reconnus par leurs comportements typiques et invariants. L'observateur reconnaît les comportements réguliers, identifie les entités qui en sont dotées et ainsi détermine finalement les objets. Cette approche est en un certain sens duale de la précédente et s'apparente à celle utilisée par H. Simon pour définir des systèmes décomposables, ou même quasi-décomposables [SIM 91].

1.5. Conception

La phase de conception suit, en Génie Logiciel, celle d'analyse, et permet de définir le comportement des objets eux-mêmes. D'abord, elle consiste à valider, par des considérations de faisabilité et d'adéquation au cahier des charges, le modèle d'analyse. Ensuite, elle médiatise l'analyse par rapport au code. On y définit complètement les classes, en affinant leur structure avec précision, ainsi que les agrégations de classes qui seront utilisées par la suite dans l'implémentation. On précise également les algorithmes et les interfaces à employer pour réaliser certaines méthodes de classes. On adapte le système à son environnement d'implémentation, en prenant en compte ces nouvelles contraintes, qui sont typiquement celles induites par la programmation [JAC 93]. On améliore les performances attendues du système, en modifiant son architecture sous des critères de programmation.

On souhaite généralement définir à l'aide d'une représentation syntaxique précise, un cadre très structurant pour la conception des objets, qui produit un modèle dit logique, c'est-à-dire considéré comme relativement indépendant du langage cible employé. La distance est en fait assez faible, et les ateliers de Génie Logiciel s'efforcent encore de la réduire. Cela conduit aux modèles dits d'analyse-conception, comme OMT ou UML [LAI 97].

Le modèle de conception se construit d'abord en transformant les objets du modèle d'analyse en "blocs" qui vont représenter des abstractions de la véritable implémentation [JAC 93]. Cela garantit la traçabilité du développement du système. Ensuite, le modèle de conception, constitué de multiples blocs, est plongé dans son environnement d'implémentation, ce qui revient à définir de nouveaux blocs typiques de cet environnement et à y adjoindre des composants déjà existants.

Le modèle de conception comprend également des descriptions de diagrammes d'interactions, décrivant comment les objets qui communiquent, générant des cas d'utilisation. C'est donc un modèle dynamique, explicite dans la méthode OMT [RUM 97], qui permet de valider les cas d'activation des méthodes des classes en introduisant les notions de diagrammes d'états et d'événements.

Ces descriptions dynamiques sont facilitées par l'existence de la structure permanente des objets et par la régularité de leurs comportements. Il n'y a aucune création d'entités nouvelles pendant le fonctionnement de tels systèmes, et le comportement dynamique est strictement la résultante des comportements des objets, c'est-à-dire les résultats des activations des méthodes de classes.

1.6. Caractères typiques de l'approche objet

La démarche de modélisation par objets se fonde sur une propriété forte des systèmes que l'on construit, que nous avons déjà remarquée : ces systèmes sont fonctionnellement bien décomposables. Que l'on détermine d'abord les composants de base, les objets, pour que leurs agrégations constituent le système global, ou bien que l'on considère le système global et que sa décomposition fonctionnelle permette de trouver en fin de compte les objets ultimes, dans les deux cas le système est la somme compositionnelle de ses composants, en ce qui concerne sa structure et sa dynamique. Le comportement du système est le résultat de l'agencement des comportements des parties, sous-parties, jusqu'aux objets. Il s'agit typiquement d'une méthode rationnelle de construction de système.

Il est clair que cette perspective de construction hérite de la démarche technicienne de réalisation des systèmes mécaniques. Elle est évidemment parfaitement opérante pour réaliser tous les systèmes aux caractères fonctionnels évidents, comme par exemple les systèmes de contrôle temps réel de matériels embarqués ou les systèmes de conduite basés sur le calcul numérique. La puissance du paradigme objet est dans ce cadre, indéniable.

Mais les préoccupations changent. On s'intéresse aujourd'hui à des systèmes plutôt adaptatifs, qui ont certains comportements non réguliers et des actions créatrices. Les perspectives posées par l'Intelligence Artificielle Distribuée ne sont plus celles de systèmes réguliers, bien stables, au comportement volontairement défini de manière permanente dans la modélisation. Un système adaptatif n'est pas non plus un résolveur rapide et habile de problèmes subtils. C'est un système qui peut, par son organisation même, s'adapter à des environnements très variés, et cela signifie que son organisation est capable de reconformations et réalise une clôture opérationnelle avec l'environnement [CAR 98]. En cela, son organisation n'est ni stable ni régulière, et la recherche de composants permanents aux comportements définitivement définis, n'est que locale et temporaire dans le système. Les composants de ces systèmes seront des générateurs de comportements et, de plus, le système global sera, par le fait de la capacité de réorganisation autonome et de mutation de ses éléments, un peu plus que la somme des ceux-ci, définis lors de la construction.

La modélisation de tels systèmes n'entre alors plus tout à fait dans le cadre, devenu trop strict, de l'analyse et conception par objets.

2- L'approche sémiotique de la modélisation

Les systèmes que nous prenons maintenant en considération sont caractérisés comme étant *adaptatifs*. Un système adaptatif peut être vu comme un ensemble d'entités en relations de réorganisation, formant globalement une unité séparée de son environnement par une forme membranaire, réelle ou virtuelle, et adaptant son organisation interne à la fois aux actions de l'environnement et à son état organisationnel lui-même pour agir et être [CAR 98]. Par exemple, un système formé d'un groupe de robots coopératifs devant se comporter de façon appropriée, avec formations contingente de sous-groupes, et devant garder dans son environnement sa permanence de groupe, sera considéré comme adaptatif. A un autre niveau, un système isolé ayant capacité à réaliser des actions variées sur son environnement, qui ont pour objectif de préserver la typicalité de son existence dans une durée qui le dépasse, c'est-à-dire opérant des créations d'entités par reproduction, en est une autre sorte.

2.1. La problématique de modélisation des systèmes adaptatifs

Un observateur qui étudie un système adaptatif ne peut avoir l'appréhension globale et totale de son comportement sur une période significative de temps. L'état présent influence fortement l'état futur : le comportement est par définition non linéaire. Le système a un comportement résultant de concertations complexes et d'échanges de motivations contingentes entre ses composants internes évolutifs, ce qui rend l'évaluation de sa trajectoire comportementale très peu prédictible. En cela, ce type de système a certains caractères semblables à ceux des système chaotiques, c'est-à-dire fortement non linéaires [PJS 92]. Par exemple, un observateur qui souhaiterait décrire entièrement, par analyse exhaustive, la structure puis l'organisation du système isolé qui préserve son existence en se reproduisant par parties ou à travers son espèce, ne pourrait appréhender qu'une projection locale et partielle de celui-ci.

> **Définition**
> *Un système adaptatif est un système complexe formé de nombreux sous-systèmes en transformation et en relation d'échange d'informations, dont la structure n'est déterminable qu'à un instant du temps, notamment lors de la construction, et dont le comportement est non linéaire et seulement localement prédictible.*

La notion de système adaptatif artificiel provient des système sociaux et en particulier du système "homme social". Certains caractères biologiques, telle la création par programme générateur (les brins d'ADN), la reproduction et la mort, la transformation cellulaire, le situationnement conçu dans l'environnement, sont nécessaires à la définition d'un système adaptatif artificiel. Ces notions devront être présentes sous une certaine forme, par nécessité. Leur économie ramènerait inéluctablement à l'approche résolution de problèmes sous le paradigme objet, en réduisant l'adaptation comportementale du système.

L'organisation d'un système est, par définition, l'évolution de sa structure dans le temps et l'espace. Il sera donc difficile au concepteur du système de définir l'ensemble des composants ultimes, formant sa structure, et qui permette de définir entièrement son organisation future. Le caractère classique de décomposabilité, avec volonté de conduite de l'organisation, ne s'applique pas aux systèmes adaptatifs.

Il reste à définir une méthode de construction de ces systèmes, prenant en compte des contraintes structurelles et organisationnelles précisant leur comportement, qui sera sensiblement différente de la méthode factuelle et mécaniste de construction des systèmes au comportement régulier. L'approche agent, considérée à un certain niveau, permet aujourd'hui cette démarche.

2.2. Considération sémiotique de l'ontologie des connaissances d'un système adaptatif

Les systèmes adaptatifs ont une structure complexe. Leur capacité de réorganisation interne n'est pas la simple résultante d'une réaction fonctionnelle à des stimulus environnementaux. Leur schéma ne se réduit pas à une boucle de feed-back entre une entrée et une sortie, ni a des appels impératifs de multiples "callback". L'agencement de leur structure est conduite par un processus de clôture opérationnelle entre celle-ci et l'environnement, s'appuyant sur une représentation plus ou moins élaborée de cet environnement [VAR 89].

Il est absolument nécessaire a un système qui se comporte par adaptation à son environnement et a lui-même, de disposer d'une certaine représentation de l'environnement et de soi. Ces systèmes possèdent donc un caractère organique de réflexivité sur leur organisation. Ils nécessitent une modélisation au niveau connaissance, puisqu'ils ont une représentation de leur environnement qui *est effectivement*, pour eux, de la connaissance, à un certain niveau et sous une certaine forme. De plus, ils ont, par un certain médium qui dépend de leur structure et de leur membrane, une capacité à échanger des informations *utilisables comme connaissances* avec des entités de leur environnement, ceci dans les deux sens. Mais l'approche des systèmes adaptatifs au niveau connaissance est spécifique.

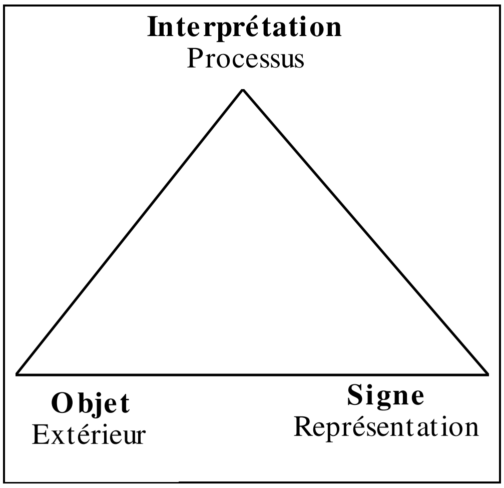

Figure 1. Le triangle sémiotique général

L'approche de la représentation des connaissances par la sémiotique triadique [PEI 84] semble pertinente car elle présente alors un avantage décisif. On y pose la distinction nécessaire entre toute chose du réel à considérer et ce qui va prendre sa place dans la représentation que le système adaptatif s'en fait. Le transfert entre la chose du réel, extérieure ou intérieure, et ce qui la dénote, son signe, qui est à sa place dans la représentation, est clairement posé. De plus, ce transfert est assuré par une action d'interprétation que réalise le système qui effectue une mise en liaison par interprétation entre objet et signe.

Mais il reste à préciser ce qu'est effectivement le processus d'interprétation et les liens de précédence qui s'établissent entre objet et signe.

Dans une approche strictement rationnelle de prise en considération de la connaissance, l'objet est là, dans l'environnement, à prendre tel il est. Il est pris en considération par la capacité du système (le correspondant de l'entendement kantien) et interprété pour s'affirmer par son signe correspondant. En ce qui concerne les systèmes mécaniques ou réactifs à structure fixe, cela signifie que le réel sera observé par le système muni de capteurs, qu'il repérera parmi l'ensemble des formes de son environnement visible celle qu'il recherche et saura interpréter. Il va alors considérer cette forme et la dénoter avec ses caractères locaux. Pour en arriver là, il faut bien que la forme repérée dans le réel soit clairement désignée dans le système par une structure qui la représente (son signe), ou même par un certain symbole (un concept langagier). Le signe sera donc, dans ce type de système, préexistant au réel observable et observé. Le système informatique aura une base de connaissances conséquente qui contiendra une dénotation de tous les éléments repérables, ce qui est éventuellement considérable. Ce système pourra alors difficilement être autre chose qu'un outil, peut être très sophistiqué, mais limité à son champ d'action instrumentale prédéterminée.

Ce n'est pas évidemment comme cela que doit être compris un système adaptatif. A partir d'un ensemble de représentations internes préexistantes et génériques, le système modifie l'organisation de ces représentations pour assigner à un certain objet de l'environnement une désignation structurelle, qui n'a pas encore à ce moment de l'interprétation, caractère de vérité. Cette désignation, qu'elle soit la reconnaissance d'un objet connu, déjà vu ou totalement nouveau, est toujours *une nouvelle désignation* dans la représentation réalisée par le système. Ensuite, par un processus de conception, le système assigne une valeur de vérité, c'est-à-dire attache une forme conceptuelle, au signe interprété. Nous avons présenté un tel processus dans [CAR 98] et [C&L 98]. Cette position distingue l'approche de représentation de la connaissance dans les systèmes adaptatifs, assez radicalement, de celle suivie par les cogniticiens plus classiques qui étudient les systèmes réactifs. L'acte d'interprétation conduit une action de réorganisation d'un ensemble de représentations, pour faire correspondre, à un certain moment, dans une certaine situation, un objet à une structure représentationnelle. C'est l'action de clôture opérationnelle [VAR op. cité].

2.3. Concepts

Nous allons introduire les concepts nécessaires à la démarche de modélisation d'un système adaptatif.

2.3.1. Substrat d'un système adaptatif

Un système adaptatif est formé des trois catégories suivantes de composants:
1. un ensemble d'entités de base, qui sont ses éléments constitutifs élémentaires, et qui vont, une fois agencés, former sa structure,
2. une membrane qui le délimite et qui permet l'échange d'informations avec l'environnement extérieur,
3. les moyens de l'action spatiale et temporelle effective sur l'environnement, qui permettent au substrat enveloppé de sa membrane de se comporter activement pour atteindre certains des buts auto-définis.

Ces trois catégories forment le substrat du système adaptatif, c'est-à-dire permettent de poser son action identitaire dans son environnement. On pourrait penser que la définition de la structure du système pourrait se faire comme lors de la phase d'analyse par objets. Mais dans ce cas, la notion d'environnement, dont la perception est médiatisée par la membrane, n'aurait qu'un caractère de générateur de stimulus, ce qui n'est pas le cas : le système n'existe pas sans son environnement ni sans sa membrane. Notons que les actions de l'environnement modifient, éventuellement très sensiblement, l'organisation du système et particulièrement sa structure.

2.3.2. Membrane

Le système sera isolé, organisationnellement, de son environnement par une membrane. Il prend donc des informations sélectives dans l'environnement, par l'intermédiaire de sa membrane qui joue le rôle de limitateur, de capteur et de filtre. Ces informations sollicitent la transformation organisationnelle du système, qui ainsi s'adapte, par action de clôture opérationnelle, à son environnement. Il n 'y a donc pas de communication directe entre système et environnement et la membrane sert de médiateur. Elle permet également la définition d'un appartenance identitaire des composants du système.

2.3.3. Structure

Une structure sur un ensemble d'entités de base du substrat est définie comme un ensemble de relations et d'actions possibles sur ces entités, posant l'existence des lois d'évolution des composants, des ensembles de composants et du système. Les relations sont des liaisons d'entités à entités ou encore entre groupements. Elles peuvent également préciser des ruptures de groupes.

2.3.4. Système

De manière classique, on définit un système comme étant tout à la fois un ensemble autonome en rapport avec son environnement, un ensemble cohérent constitué de sous-systèmes en interactions et enfin un ensemble subissant des modifications plus ou moins profondes, mais lui assurant toujours une certaine permanence [WAL 77]. C'est donc un ensemble objectivement détaché de son contexte.

Un système adaptatif est constitué d'un ensemble d'entités enveloppées d'une membrane et de relations entre ces entités. Il se trouve dans un environnement qui lui permet de se maintenir en état de fonctionnement et d'évolution. Il évolue en conservant sa permanence, dans une certaine durée, pour une certaine raison que lui confère sa structure et son environnement.

Il existe toujours, par hypothèse en ce qui concerne les système adaptatifs que nous considérons, un niveau où les composants interagissent par communication *d'informations*. Ceci distingue ces systèmes, qui appartiennent typiquement au domaine de l'Informatique, des systèmes de la microphysique par exemple.

2.3.5. Communication entre entités et entre systèmes

La communication entre entités du système consiste en l'ensemble des processus physiques à connotation organisationnelle effectués entre les entités pour qu'elles satisfassent à leurs fonctions, transforment la structure et changent l'état du système.

A un autre niveau, le système pourra communiquer avec l'environnement. Selon la complexité de sa structure et la richesse de sa membrane, cette communication l'engagera dans son entier, c'est-à-dire qu'elle aura la complexité de sa structure (communication langagière par exemple), ou bien n'engagera que certaines entités de sa structure (échange de messages numériques par exemple).

La question de la communication dans un système composé d'entités distribuées est évidemment fondamentale. Elle dépend de la granularité des entités qui sont en cause. On peut, et on doit, dans un système adaptatif, considérer qu'il existe simultanément plusieurs niveaux de granularité.

2.3.6. Organisation

La structure définit la constitution architecturale du système. Une fois que les actions et communications portées par les relations entre entités sont engagées et que les échanges avec l'environnement, via la membrane, s'effectuent, la structure se place dynamiquement dans le temps de sa transformation. L'ensemble du système structuré mis en mouvement constitue alors une organisation. L'organisation est le déploiement du système dans l'espace et le temps de l'action, lui permettant de conserver toujours une certaine permanence (une ipséité dans le vivant conscient).

2.3.7. Système adaptatif

On appellera système adaptatif un système dont la structure est non suffisante pour décrire son organisation. Le système a donc une capacité de transformation propre, d'auto-adaptation de son organisation, qui lui permet de se modifier pour s'adapter à son environnement et à lui-même.

2.3.8. Degrés de complexité des systèmes

Un système est dit bien descriptible lorsque sa structure détermine causalement son organisation.
- Exemple : système solaire, moteur, cellule biologique, programme de contrôle ...

Un système est dit structurellement approximable si sa structure détermine une partie significative de son organisation.
- Exemple : groupe sociaux observés en approche macro-économique, océan, forêt, système multiagent réactif ...

Un système est dit complexe si sa structure n'est que génératrice de son organisation.
- Exemple : esprit et conscience, terre considérée comme système vivant, Homme, mammifère, groupe social, système adaptatif artificiel ...

3- Vers la modélisation des systèmes adaptatifs

Le traitement d'un problème par constitution d'un système d'agents recouvre aujourd'hui deux domaines bien différents : celui de la résolution de problème classique, héritier de l'Intelligence Artificielle et de la programmation par objets, et celui des systèmes adaptatifs, qui s'apparentent plutôt aux systèmes sociaux, avec leurs caractères non linéaires et complexes. Nous présentons successivement ces deux domaines.

3.1. Organisation et agents dans l'optique résolution de problème

La problématique de résolution de problème est la plus courante dans le domaine de l'IAD [S&V 97]. On considère un problème bien posé dont le traitement fait apparaître des caractères de répartition et de distribution plus ou moins collectives des actions. On décide de le traiter en approche agent. La notion usuelle d'organisation de ces agents réfère à la façon dont ceux-ci réalisent en commun leurs actions pour améliorer l'atteinte du but global. Les agents ont des tâches à effectuer, précisées a priori par une gamme de tâches, et ils règlent par eux-mêmes la coordination de ces tâches. Pour arriver à cela dans le système d'agents autonomes, chacun des agents doit préciser son rôle dans la réalisation de tâches communes et régler la question de son appartenance à des groupes.

Il y a alors deux approches qui peuvent être retenues en ce qui concerne la formation de groupes. Dans une première approche, l'organisation est considérée comme une entité spécifique, externe aux agents et qui est à gérer à part [BOU 93]. Le contrôle et la connaissance sont alors localisés dans l'entité qui représente l'organisation, et qui peut être un agent spécifique. Cette approche s'apparente aux tableaux noirs. Dans une seconde approche, l'organisation est virtuelle et répartie dans les structures et comportements des agents [GAS 88]. La détermination de l'organisation provient du comportement de chaque agent qui tient compte du comportement de tous les autres. Le contrôle et la connaissance sont distribués.

En fait, une organisation d'entités relativement autonomes est considérée comme une certaine agrégation de ces entités. On peut ainsi parler de niveaux d'organisation pour préciser la granularité des associations d'entités, allant du groupe à l'organisation collective, en passant par différentes formes de hiérarchies ou de systèmes de marché [FOX 81]. Ces types d'organisations permettent d'envisager des systèmes spécifiques et répondent à des problèmes typiques. Le choix d'une organisation dépend du problème que l'on veut résoudre et il entraîne le choix des structure des composants, c'est-à-dire des agents et de leurs moyens de communication.

Cette approche vise à construire un système particulier pour résoudre un problème précis. On détermine les tâches des agents, qui ont évidemment un certain degré de liberté et dont l'agrégation peut s'avérer inefficace, puis on se donne des critères de mesure pour apprécier la valeur des tâches effectuées par les agents. Le but du paramétrage du SMA est de résoudre le problème posé en minimisant les tâches individuelles et collectives, selon le critère de coût. La difficulté réside dans l'équilibre délicat à trouver entre le temps passé à la coordination des tâches par envois de messages et le temps effectivement passé à agir pour traiter le problème.

Dans cette optique, la méthodologie de développement du système est la suivante [FOX op. cité] :

1. Définition du problème posé.
2. Choix de l'organisation apte à le traiter.
3. Définition des niveaux d'organisation, des liens entre les niveaux et des mesures.
4. Définition des tâches, des communications et des groupements d'agents.
5. Activation et évaluation des performances de l'organisation, à l'aide des mesures.

La démarche de développement d'un système adaptatif diffère sur un point, essentiel, qui est qu'il n'y a pas de problème initial bien posé. Le système n'est pas construit pour résoudre *un* problème, mais pour s'adapter à lui-même, aux caractères de l'environnement et pour adapter l'environnement par ses actions. Il n'est donc pas possible de se référer à la démarche précédente, qui est assez conforme à l'analyse-conception par objets en ce qui concerne les trois premiers points.

La question propre à tout système multiagent, est de définir des structures spécifiques pour l'organisation. Comme on considère plusieurs types d'organisations, il y a plusieurs types de structures de coordination. Nous retiendrons les réseaux contractuels [SMI 80], les treillis de production [GAS 88] ou le plan partiellement global [D&L 91].

3.2. Caractères distinctifs des différents types de système : de l'objet au système adaptatif

Classiquement, la construction d'un système dépend d'abord du type de problème à résoudre, puis du type de système retenu pour le résoudre. Les systèmes à objets se situent à un niveau d'uniformité de l'entité de base : tout est objet, les objets étant des entités qui ne peuvent que répondre à des stimulus. Ainsi, l'action dans une organisation d'objets est localisée dans les méthodes et la dynamique de chaque objet.

Il y a de nombreuses façons de catégoriser les systèmes multiagents [S&V 97]. Nous retiendrons principalement la question du contrôle. Les systèmes multiagents sont caractérisés par une distribution du contrôle dans l'organisation. Il y a ainsi un niveau contrôle dans ces systèmes et qui se distingue du contrôle instrumental retenu dans les systèmes à objets. Ce contrôle est réalisé par chaque agent, avec le fait qu'il prend en compte, plus ou moins, l'état de son contexte pour l'exercer. Il y a donc détachement définitif de la définition du contrôle qui est déposé dans l'objet pour qu'il s'y exerce, du contrôle dont un agent est doté et qui sera exercé *dans* la dynamique de l'organisation, contextuellement.

L'exercice de ce contrôle peut revêtir deux aspects et il y a ainsi deux types de systèmes multiagents. Dans un premier cas, la structure de l'agent est aussi réduite que possible, et elle est essentiellement fonctionnelle. C'est le domaine des agents réactifs, simulant des insectes [CDB 96] ou des mécanismes de surveillance temps réels intelligents, avec définition de co-évolutions compétitives [BFS 95].

Dans un second cas, les structures des agents sont complexes et on considère ceux-ci comme dotés de connaissances et même d'un niveau de connaissance sur ces connaissances. Ce sont les agents dits cognitifs [L&R 92]. On peut même imaginer qu'ils sont munis d'intentions et de caractères de subjectivité [TZA 95].

La construction de ces systèmes d'agents peut se faire en s'appuyant pour partie sur le paradigme objet. Il existe alors un niveau élémentaire des entités du système dans lequel celles-ci sont permanentes et régulières. C'est le niveau des composants et ces composants peuvent tout à fait être vus comme des objets. Le niveau agent correspond alors à une modélisation organisationnelle *au-dessus* des objets, où ceux-ci sont agrégés pour former des entités à la dynamique comportementale variable. Notons que dans cette optique l'agent humain est considéré comme le modèle limite d'agent cognitif, composé de parties fonctionnelles permanentes, tels des objets. Nous ne suivrons pas cette approche structuraliste.

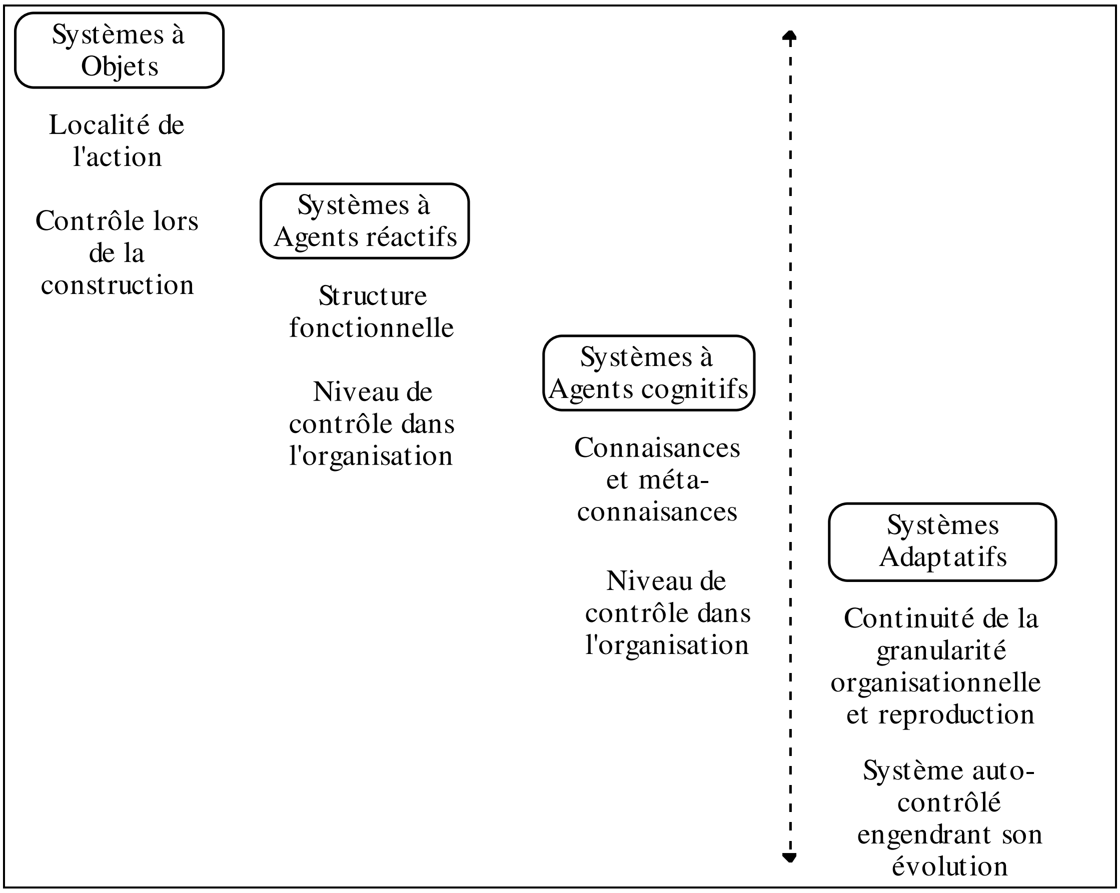

Figure 2. Les caractères organisationnels des différents systèmes

Les systèmes adaptatifs sont en rupture avec les trois types de systèmes précédents, systèmes à objets, SMA réactifs et SMA cognitifs classiques. Ils sont des organisations complexes, où il n'existe pas pour la construction de niveau ultime permanent composé d'entités définitivement définies, indépendantes et fonctionnelles, qui seraient tels sont les objets. Le système est un tout et il évolue en modifiant plus ou moins, sans interruption et pour lui-même, son organisation et ses composants. Ses parties sont des sous-ensembles qu'un observateur a distingué, mais qui sont organiquement intégrées à toutes les autres parties. Dans le cas d'un mammifère, qui est typiquement un système adaptatif, il est en effet difficile de considérer des parties indépendantes, puisque toute partie quelle qu'elle soit, provient de la génération par réplication de brins initiaux d'ADN et qu'elle s'est développée en relation avec le développement de toutes les autres.

En ce qui concerne les systèmes adaptatifs artificiels, il faudra bien adopter une démarche de construction conforme à cette typicalité. On ne pourra alors que définir des *générateurs de structure et d'organisation*, qui auront la propriété de pouvoir et devoir en engendrer d'autres, dans une organisation dotée des moyens de se développer effectivement. Ce développement sera conditionné par trois facteurs :

1. la structure initiale et génératrice,
2. la limitation et l'interfaçage du système par la membrane,
3. l'action du et sur le milieu extérieur.

Ainsi, les systèmes adaptatifs artificiels s'inspirent des systèmes du vivant supérieur, avec une différence notable : ils doivent pouvoir maîtriser leur processus de réorganisation et de reproduction afin d'améliorer leurs performances, ce qu'un système vivant ne peut pas faire puisqu'il reste définitivement soumis à son domaine de temps et d'espace.

3.3. Système adaptatif : la mise en situation dans la durée

La notion informatique usuelle de système détache sa conception de sa trajectoire comportementale. Le système apparaît ex-nihilo suivant la méthode de construction employée et il doit satisfaire à des fonctions prédéterminées précises. Or aucune fonction sociale, et notamment l'aptitude au mouvement organisé ou la pratique du langage, ne sont autre chose que des résultats d'évolutions longues et continues. Cette notion de distinction entre deux échelles de durée, l'une permettant l'évolution dans l'espace social et l'autre l'action dans l'environnement, doivent être prises en considération pour introduire tout caractère social qui, sinon, apparaît comme anachronique. Et la spécificité de l'Informatique permettra de jouer sur les échelles temporelles, en forçant les destins de ses créatures.

L'autonomie d'un système est d'abord comprise comme comportementale : le système a une évolution, réfléchie par la représentation conceptuelle de celle-ci dans le système. Mais il a également une action comportementale de transformation de sa structure, par des actions internes : il se reconforme et il modifie certaines de ses parties pour réaliser, par exemple, sa représentation courante de l'environnement. Ces deux caractères permettent de définir un système adaptatif ex-nihilo, en le considérant comme isolé et bien défini, capable d'avoir des rôles et d'engager des actions. On ne s'adapte pas sans raison et l'adaptation n'est pas de la réactivité multiforme. Tout système adaptatif a donc une tendance à développer la permanence de son genre dans l'étendue de son environnement. Il assure cette tendance, principalement, par la reproduction ici artificielle, qui le fait se placer dans la perspective d'une certaine lignée. Ce point est essentiel et permet de passer du système instrumental au système autonome.

Cette tendance à la reproduction sera même considérée comme dense dans l'organisation du système adaptatif. Certains de ses composants auront la possibilité de se reproduire, pour s'améliorer ou tout simplement pour assurer leur maintien en fonction dans la durée. Des ensembles de composants auront également cette propriété, et le système, clos par sa membrane, aura également cette propriété. La prise en compte de cette propriété dans sa fonction, dans son rôle et dans sa conception, nous fera quitter définitivement l'univers de l'objet, si rigide.

Un objet est permanent et il n'a pas vocation à induire un caractère de reproduction au niveau organisationnel. L'objet n'a pas de moyen d'auto-évaluation par l'appréhension de son contexte et de sa stabilité, qui le ferait se transformer, selon ses besoins et la pression de son contexte. Un ensemble d'objets non plus. Dans cette affaire, le niveau objet correspond à celui de l'entité matérielle, fonctionnelle, physique, d'un certain organisme considéré comme mécaniste. Pour un système adaptatif artificiel, le niveau objet est le niveau vu comme très strictement symbolique, et l'organisation est alors très clairement située au-dessus de ce niveau. Nous avons donc nécessité de nous situer au niveau organisationnel, et au niveau connaissance, au-dessus du niveau symbolique que les objets décrivent fort bien. L'hypothèse d'A. Newell, si décriée aujourd'hui, doit plutôt être "revisitée".

3.4. Modélisation d'un système adaptatif par agents

Le caractère premier d'un système adaptatif est d'avoir une organisation qui lui permette d'opérer par adaptation à l'environnement et à lui-même. Il aura deux niveaux d'entités :

1. le niveau des entités instrumentales,
2. le niveau des entités agrégatives.

3.4.1. Les entités instrumentales

Le système est, au niveau minimal où les éléments ne sont que fonctionnels et simples, constitué d'entités indépendantes, chacune ayant une fonction précise à effectuer. C'est le niveau des éléments de base du système. Il correspond exactement, dans la phase d'analyse d'un système, à la détermination des objets qui vont fonder le système.

Cependant, ce n'est pas à partir de ces constituants élémentaires que l'on peut concevoir l'organisation du système. Celui-ci n'est en effet pas une somme de ces entités, mais une organisation à capacité d'autonomie. Ces éléments ne seront donc pas suffisants pour concevoir le caractère comportemental du système.

C'est cependant avec un certain ensemble de ces entités que sera constituée la membrane du système. Celle-ci est à la fois une enveloppe de limitation et un interface d'échange d'informations avec l'environnement. C'est une structure surfacique, sans profondeur pour son organisation, et de nombreux systèmes à objets n'ont d'ailleurs que ce caractère.

3.4.2. Les agrégats dans un système adaptatif : les agents

Les entités principales du système adaptatif ont des structures et des possibilités d'action qui doivent permettre le déploiement organisationnel. Ces entités ont pour rôle de s'influencer mutuellement, de se modifier, de s'altérer ou de se reconformer, déterminant par cela un comportement local et plastique au système. De plus, ces entités d'action vont conférer au système un comportement organisationnel variable et vont réaliser effectivement son organisation. Elles ne seront pas considérées comme indépendantes au niveau conceptuel. Rappelons que les objets sont conçus indépendamment les uns des autres. Les entités doivent permettre de réaliser éventuellement toutes les partitions possibles sur les entités instrumentales : ces entités seront des agents.

C'est cette difficulté conceptuelle majeure qui nécessite de définir chaque entité selon l'existence de toutes les autres, qui imposera de ne définir que des entités *génératrices*, dont le comportement réalisera ensuite dynamiquement le maillage relationnel, par adaptation et reproduction.

Définition d'un agent dans une optique organisationnelle

Un agent est :

1. *une structure formée d'entités instrumentales. Cette structure permet fonctionnellement de représenter des caractères d'autonomie comportementale, en étant close par rapport à son environnement immédiat et en agissant sur et dans celui-ci.*
2. *une loi de comportement lui permettant de se situer dans son environnement et d'agir sur ce dernier en le modifiant et en modifiant pour cela sa propre structure,*
3. *un principe de transformation, par évolution ou par reproduction.*
4. *un principe d'association permettant l'agrégation avec d'autres agents pour passer à un niveau d'organisation supérieur, tout en conservant les caractères 1, 2, 3 et 4.*

Le quatrième principe d'association admet évidemment un état limite qui est l'autoréférence du système à lui-même, et qui est point fixe des transformations organisationnelles [CAR 98]. Le système adaptatif conçoit donc un agent comme une entité constituante *non indépendante* qui permet de concevoir le système dans son mouvement organisationnel et dans son entier, en changeant de niveau d'organisation et tout en restant limité par la membrane du système.

3.4.3. Les règles de construction du système

Le niveau où occurre l'agent est organisationnel. L'agent est l'élément conceptuel de l'organisation, celle-ci étant comprise comme la mise en mouvement d'une certaine structure, dans un certain espace et dans le temps. Un agent ne se conçoit que dans un système d'agents, le système multiagent, où le caractère apparent le plus typique est la formation de groupes d'agents. La notion de groupe est pour l'instant entendue intuitivement comme une réunion d'agents partageant momentanément certains caractères communs.

> ***Première règle de construction***
> *L'agent est toujours compris dans le mouvement de déploiement de l'organisation du système, dans sa relation bidirectionnelle à des groupes dont il est ou peut être un élément constituant.*

Dans le système à construire, la découverte des agents est l'action première, et elle revient à trouver les liens entre des formes d'action de modification, les futurs agents, et les groupes que ceux-ci peuvent constituer.

> *Un agent est, si et seulement si une certaine forme repérée ou conçue dans le système a un rapport de génération et de dépendance avec une forme qui la contient, et réciproquement.*

Ce fait reprend plus concrètement le principe hologrammatique [MOR 91]. Nous précisons donc qu'un agent est une partie du système si cette partie incluse participe à l'engendrement de toute partie qui la contient, et si la partie qui la contient l'influence ou la détermine.

Dans sa relation organisationnelle au groupe, l'agent joue un rôle, qui correspond à sa situation d'élément du groupe. Il ne se contente pas simplement d'agir, mais se comporte d'une certaine façon qui détermine, par ce fait, son appartenance à des groupes. On représentera ainsi de nombreuses possibilités de mesurer l'adhésion d'un agent au groupe, dans le temps, par des métriques appropriées [G&D 96].

Le groupe aura une influence sur l'agent, sur sa structure et sur sa loi de comportement. Cette influence, qui est la *prégnance* du groupe sur "l'être de l'agent", n'est pas symétrique de la relation de l'agent sur l'existence du groupe. L'agent et son groupe ne sont pas situés au même niveau organisationnel [W&W 95].

Remarquons qu'il est raisonnable de penser à des agents qui appartiennent simultanément à plusieurs groupes. Cette ambiguïté ne devra pas être réduite, mais bien traitée. L'un des moyens de la résoudre est la détermination, par exemple, d'un graphe de couplage entre agents, avec l'utilisation d'agents "trigger" [CDB 96]. Il est également possible d'utiliser un réseau à morphologie variable constitué d'agents réactifs opérant par "contract net" [C&L 98].

Pour former des groupes, les agents doivent communiquer, puis sélectionner des comportements communiquants pour typicaliser ces communications [S&T 92]. La communication entre agents n'est pas du tout de même nature que celle opérée entre objets. Il n'y a pas envoi d'un message qui déclenche automatiquement une méthode. Il y a génération d'une communication, sous une forme qui peut être explicite (information envoyée) ou implicite (attitude), puis adaptation organisationnelle du ou des récepteurs de la communication interprétée. Cette adaptation organisationnelle est ce que nous avons appelé, à la suite de F. Varela [VAR op. cité], une clôture opérationnelle d'agents [CAR 98]. Il est dans ce cas envisageable de définir une notion de membrane pour structurer l'agent, ne serait-ce que pour détacher l'interface de l'agent de l'organisation des agents.

> ***Seconde règle de construction***
> *Dans le système adaptatif, tout agent doit pouvoir communiquer avec tout autre. L'effet d'une communication est une clôture opérationnelle locale entre les agents communiquants. Tout agent a une tendance à typicaliser ses communications, ce qui entraîne sa sociabilité par formation de groupes.*

Nous pouvons maintenant définir les notions d'émergence et de groupe d'agents.

Définition de l'émergence
Une émergence est une certaine forme organisationnelle du système. C'est un sous-ensemble distingué dans la dynamique du système en mouvement.

La constitution d'un groupe rompt la structure, régulière ou chaotique, de l'organisation pour la contraindre à prendre une certaine forme comportementale. C'est une *prégnance*, au sens de R. Thom [THO 81], placée ici au niveau organisationnel.

Définition des groupes d'agents
Un groupe d'agents est une émergence au niveau organisationnel de l'ensemble des agents. Un groupe permet de fixer momentanément les rôles des entités qui le constituent et de construire, par ce fait, une composante significative de l'organisation.

Les groupes d'agents sont des entités actives du système, qui dénotent un certain caractère fonctionnel dans l'organisation de celui-ci. On peut ainsi associer à chaque groupe des fonctions opératoires qui permettent de les caractériser et qui sont localisées dans les agents. Notons qu'un groupe d'agents a rarement une seule fonction, ce qui le ramènerait à un comportement rigoureusement déterministe, mais en a plusieurs, et qui sont éventuellement contradictoires ou aporétiques. Les agents seront dotés de moyens de lever ces contradictions [R&G 95].

Nous allons permettre de moduler la granularité organisationnelle du système, c'est-à-dire permettre de passer de la notion d'agents, de groupes d'agents, d'organisations d'agents, au système.

Définition d'une organisation d'agents
Un ensemble de groupes d'agents dont le comportement global est attracteur par rapport au contexte de ce groupe et dont l'agrégation rend conforme le comportement des groupes qui le composent sans rompre l'identité du système, est appelé organisation d'agents.

Nous sommes donc passés de la notion d'agent, qui est locale, à celle de groupe, qui est le premier degré de la dynamique organisationnelle du système par distinction agrégative, puis à celle d'organisation, qui prend place au niveau de l'architecture générale du système. Le but est d'atteindre l'organisation globale du système, c'est-à-dire de la caractériser, pour la conduire.

Nous définirons le système comme une architecture plastique composée des organisations d'agents. Le système opère comme un ensemble d'organisations que limite son enveloppe. Cela lui impose de "réfléchir", c'est-à-dire de transmettre par déformation, des sollicitations venues de l'environnement, comme des réorganisations internes qui se propagent dans les différents niveaux de l'organisation : les processus de clôture opérationnelle. Notons que la notion de clôture opérationnelle opère à tous les niveaux dans le système, c'est-à-dire au niveau de l'agent, des groupes et des organisation d'agents. Le système n'est alors que la "mise en résonance" d'une organisation par rapport à son environnement, mais avec toutes les possibilités réorganisationnelles de cette structure, qui sont éventuellement combinatoirement considérables.

> ***Définition d'un système multiagent adaptatif***
> *Un système multiagent adaptatif est un ensemble d'organisations d'agents que limite une membrane, réelle ou virtuelle, et qui adapte dynamiquement son organisation aux sollicitations de l'environnement par clôture opérationnelle dense.*

Il reste à préciser ce qu'est et quel est le rôle de la membrane d'un SMA adaptatif. Un SMA adaptatif est un système dont le comportement est identifié comme singulier dans l'espace constitué de lui-même et de son environnement. Ce comportement peut être isolé dans le domaine, pour toute entité extérieure qui l'observe, grâce à la limite aux transformations organisationnelles qu'impose la membrane du système. Le système est constructible et perceptible comme entité identitaire et la membrane est un élément point fixe du processus de réorganisation du système.

> ***Définition de la membrane d'un système multiagent adaptatif***
> *La membrane d'un SMA adaptatif est la limite imposée aux transformations organisationnelles des composants du système adaptatif. Elle cause les transformations en engageant la clôture opérationnelle et transmet les actions vers l'extérieur. La membrane peut être une enveloppe réelle ou bien la limitation structurelle du degré d'indépendance des composants.*

Nous définissons une loi comportementale pour assurer la stabilité et la cohérence du système. Cette loi va imposer aux agents de se grouper, aux groupes de se conforter pour constituer des organisations et aux organisations de constituer un système, opérationnel selon sa structure et son environnement. Elle procède du caractère rationnel du comportement du système dans son ensemble.

> ***Loi de régularité du système multiagent***
> *Il existe une loi de conformité comportementale entre tous les constituants du SMA adaptatif, allant de l'agent au système lui-même. Toutes les entités procèdent alors de tendances comportementales similaires pour réaliser des émergences, ou des stabilisations.*

Il est nécessaire de concevoir une loi duale permettant la rupture et l'évolution de l'organisation du système, à travers la modification durable de son organisation et de ses constituants. Cette loi comportementale délie les constituants du système dans ce qu'ils ont d'uniforme et de stable. Si elle représente très clairement la mort physique dans les systèmes adaptatifs vivants, elle va représenter l'évolution contrôlée de l'organisation des systèmes adaptatifs artificiels.

> ***Loi de rupture organisationnelle du système multiagent***
> *Il existe une loi de rupture organisationnelle du système, le conduisant à se modifier dans le sens de l'altération et de la transformation de certaines de ses*

> *parties. Toutes les entités subissent cette loi, qui confère au système un comportement quasi-prédictible, quasi-régulier et quasi-stable.*

Le comportement du système est alors vu comme la réorganisation de sa structure sous la conduite contradictoire *de ces deux lois*. Leur conjugaison conduit à la notion de reproduction. Nous posons que la reproduction dans les systèmes adaptatifs provient de l'aporie entre les deux lois générales ci-dessus citées. Elle apparaît comme le seul moyen de *dépasser* la contradictions de tendances définitivement opposées.

3.4.4. Problème de stabilité d'un système adaptatif

La stabilité d'un système adaptatif, c'est-à-dire la dynamique de réorganisation de ses composants, est relative. Un tel système n'est que quasi-stable. Les échanges entre éléments de base (les agents) sont réguliers, c'est-à-dire que ce sont les mêmes pour les mêmes éléments, mais les échanges entre groupes d'agents ne le sont pas puisque la forme des groupes change. De plus, les agents peuvent modifier leur structure et leur loi d'action pendant le fonctionnement du système, par le fait de leur appartenance à des groupes. Il n'existe alors de stabilité du système que statistique.

Plus précisément, l'ensemble des formes organisationnelles que le système adaptatif produit constitue un ensemble d'objets géométriques (des formes), que nous nommerons O. Chaque forme ainsi définie est paramétrée par l'ensemble constitué par les caractères des agents qui l'on fait émerger. On note P cet ensemble de paramètres. Une forme paramétrée est donc notée O_p. On peut considérer, en plongeant les caractères des agents dans R^n, que l'ensemble P des paramètres constitue une variété différentiable de dimension finie, que l'on peut munir d'une topologie.

On peut alors considérer un domaine de O où, pour deux points p et q quelconques voisins dans ce domaine, les formes organisationnelles correspondantes O_p et O_q sont les mêmes. Dans ce cas, le domaine des formes est dit structurellement stable. L'ensemble des points de P tels que O_p soit stable forme un ouvert dit *stabilisateur*, pour la topologie retenue sur P. Le complémentaire de cet ouvert stabilisateur sera un fermé, appelé ensemble des *points de bifurcations* [THO 72]. La question est de savoir si cet ensemble des points de bifurcation est dense ou non pour la topologie sur P. Dans le cas ou ce fermé serait dense dans P, le domaine des formes organisationnelles serait typiquement instable. Ce cas limite ne sera pas envisagé, car il représenterait un système informatique sans intérêt. Par contre, on s'intéressera tout particulièrement à la structure topologique de l'ensemble de bifurcation, c'est-à-dire à ses singularités engendrant typiquement des désorganisations, ce qui constituera une théorie de la morphologie et de la stabilité structurelle de l'espace des formes organisationnelles [THO op. cité]. La notion centrale sera celle de bassin d'attraction conduisant une réorganisation a une rupture de forme, c'est-à-dire à un changement de comportement significatif du système.

De manière générale, un système multiagent adaptatif réalise son adaptation par clôture opérationnelle avec son environnement. On devra donc chercher des cartes locales de l'environnement représenté, permettant au système de concevoir la situation courante, pour s'y adapter. Ces cartes faisant émerger localement des formes déclenchant la réorganisation du système, sont appelées des *prégnances* [THO 81]. Elles seront représentées à la fois par des organisations d'agents (chapitre quatre) et par des champs de gradient du type lacet ou fronce, dans la théorie des catastrophes. Ces champs permettront de décrire, à une certaine échelle d'observation, le comportement du système et de bien caractériser la dynamique de celui-ci.

4- Analyse et conception des systèmes adaptatifs

Par rapport au problème posé, modéliser un système adaptatif, le paradigme agent va permettre de définir systématiquement des composants distribués dont le comportement représentera l'organisation du système. Il s'agit de poser les éléments d'une procédure planifiée qui permette de construire un noyau de système adaptatif. Dans la conception du système, on sera amené à définir trois types de composants : la membrane du système, l'agent d'action et l'agent d'introspection.

4.1. Conception de la membrane du système

Tout système informatique est borné, et même fini. Il est limité par le graphe de couverture entre les éléments actifs de sa structure. La question est de savoir si cette limitation est structurelle, posée a priori dans la construction, ou bien se reconstruit lors du fonctionnement du système. En ce qui concerne les systèmes que nous qualifions de classiques, il est clair que l'analyse-conception pose les limites définitives du système dans sa structure même, par les fonctions des composants et des classes d'objets. Cela permet de développer toute la démarche Génie Logiciel par objets et notamment les modèles dynamiques à états.

Par contre, pour les systèmes adaptatifs, la notion d'enveloppe revient à poser une *distance et une limite* entre le système et son environnement. Le système est un espace clos de réorganisation de ses composants, qui peut varier très sensiblement par rapport à son état initial. C'est un espace de génération de nouvelles formes organisationnelles, donc de nouvelles liaisons entre de nouveaux éléments. On a a priori une idée de son architecture, par la façon dont le problème à résoudre est posé. Mais chaque utilisateur du système va le solliciter pour que sa réorganisation permette d'engendrer la réponse appropriée. La membrane du système tient alors le rôle d'interface, à la fois limitative et adaptative, entre utilisateurs et système.

Pour un problème posé dont le traitement nécessite la construction d'un système adaptatif, la membrane est l'interface fonctionnelle. Elle est définie initialement par ses caractères minimaux, posant les limites d'action des entités constituantes (intervalles finis, topologies de compacts). L'évolution du système, par l'apprentissage de son comportement, conduira à la modification des caractéristiques de la membrane, et notamment des représentations des signes graphiques (l'IHM, dans la terminologie classique), mais en conservant la limitation imposée.

> ***Définition***
> *La conception de la membrane du système revient à préciser les domaines des prises d'informations du système et des représentations interfaçables, selon les*

> *contraintes de l'organisation du système et ses lois d'évolution dans son environnement. Ces domaines sont et restent bornés.*

Ainsi, l'enveloppe du système est son médium limitatif de communication bidirectionnel avec l'environnement, utilisateurs compris. Elle évolue, en forme et en expressivité, avec l'évolution du système, tout en restant bornée. L'usage d'un tel système n'est pas fixe et constant, même si les "données", les sollicitations de l'utilisateur, sont les mêmes. L'adaptabilité imposera l'évolution et nécessitera une mémoire sélective opérant par réorganisations, dans les limites imposées par la membrane [CAR 98].

La notion de membrane d'un système adaptatif que nous donnons est plus générale que celle d'enveloppe interface d'un système. La membrane est une loi de limitation et d'identité du système et de son comportement. Le système est constitué de composants logiciels distribués et leur appartenance à *un* unique système est posée par l'existence d'un composant, en général virtuel, qui réifié la notion d'appartenance. Pour cela, la membrane limite les comportements des entités et impose la reconnaissance des éléments de la famille générique, distinguant les éléments étrangers. Cette reconnaissance peut être partiellement assurée par les réseaux d'accointances des agents, mais la notion de transmission d'informations identitaires dans les caractères reproducteurs des agents, sera plus précise.

4.2. Conception des agents du système

Une fois la membrane du système définie, l'organisation interne peut être précisée. Le système va pouvoir se construire à partir des transferts informationnels reconnus avec l'environnement. Cette approche est typiquement celle d'un système qui va apprendre, et dont l'apprentissage va préciser l'organisation.

La définition des agents du système à concevoir prend en compte le point de vue hologrammatique de l'organisation [MOR 91]. Le point de vue similaire, en ce qui concerne la découverte des objets, où a priori tout est un objet, n'est pas ici opérant. Le système est d'abord considéré comme constitué de *formes*, c'est-à-dire d'entités actives dont la structure et le rôle sont à préciser. Ce sont les fonctions supposées du système, les entités physiques ou conceptuelles jugées nécessaires, les structures hiérarchiques repérées, les composants, les modules, les relations, les évolutions. A partir de ces formes, on va dégager les agents.

> ***L'agent***
> *Un agent est trouvé quand une forme active prise en considération dans la structure ou l'organisation du système à concevoir permet d'opérer, par sa seule considération, un changement de granularité dans l'appréciation de l'organisation du système.*

Cette définition prend en compte le point de vue du modélisateur du système dans une approche à la fois dynamique et sémiotique. Le système que l'on analyse et conçoit est a priori constitué de formes, c'est-à-dire d'ensembles significatifs pour sa compréhension. Une forme sera comprise comme étant un agent si elle permet de réaliser un double mouvement dans le fonctionnement du système :

1. jouer un rôle actif typique et local,
2. permettre la représentation à une autre échelle.

Le premier caractère est classique, et c'est celui qui est utilisé dans la construction de tout système d'agents aujourd'hui: un agent est conçu pour jouer un *rôle*. Le second est typique des système adaptatifs. Il engage à considérer systématiquement l'organisation du système dans son mouvement allant du singulier au général, et inversement.

Cette approche lie la forme à sa désignation par un certain agent, dans le système, par un mouvement de généralisation, qui comprendra les groupes d'agents, les organisations, puis le système. Ce mouvement est bien celui de l'interprétation dans le processus sémiotique [C.f. Fig. 1].

Une forme qui sera comprise comme un agent devra être environnée de formes similaires, qui la renforceront. La loi de rupture organisationnelle, opérante dans le système, est volontairement affaiblie par l'existence d'une structure qui compense les ruptures. Cette structure compensatrice est représentée par la multiplicité d'agents relativement semblables. Ainsi, le concepteur découvre une forme pertinente dans le système, qui a donc une certaine fonction, et l'enveloppe de formes semblables ou similaires, qui correspondront à des fonctions presque identiques. Ainsi, le système sera organiquement stabilisable, par l'inertie de la redondance de sa structure.

> ***Règle de redondance structurelle***
> *Si un objet est conçu de manière à optimiser la structure du système à construire, un agent, générateur de groupes et d'organisations sous les deux lois comportementales de régularité et de rupture, est conçu comme modulable par famille, pour permettre la redondance et compenser les défaillances organisationnelles.*

4.2.1. Agents d'action

Il y a deux sortes d'agents dans un système adaptatif. Les premiers sont typiques des actions au caractère fonctionnel : ce sont les agents dits d'action. Les seconds sont mêlées aux actions des premiers et engagent le système dans la considération de sa propre organisation : ce sont les agents d'introspection. Le système adaptatif a en effet une capacité à réfléchir sur son organisation, pour se représenter l'environnement, son organisation et ce qu'il en éprouve. Nous pensons que ces deux catégories d'agents doivent être distinguées, mais cela n'est pas une règle absolue.

Les agents d'action sont les agents selon les approches classiques, tels qu'ils sont définis dans les SMA réactifs ou cognitifs [S&V 97]. Ils ont ici deux caractères d'action, l'un spécifique à une certaine fonctionnalité (communiquer, chercher un identifiant, mémoriser une information, dégrader un autre agent, générer un clone ...)

et l'autre de globalisation organisationnelle (engendrer un groupe, scinder un groupe, engendrer une généralisation ..).

Un moyen de représenter le caractère de globalisation organisationnelle est fourni par la théorie des engagements (commitments) [FIK 82], [C&L 90]. L'engagement exprime les liens d'agrégation dans une organisation et permet de définir et justifier un certain comportement social des agents. Certaines propriétés du concept d'engagement sont présentées dans [BOU 93], en insistant sur le caractère de jugement et de croyance attaché à l'engagement, ou même d'intention [TZA 95], [H&D 95]. Mais l'agent devient alors fort complexe et semblable à une organisation sinon à un système, ce qui repousse le problème.

Notre approche des agents est plus simple. L'agent est doté de certains caractères très partiels, systématiquement insuffisants pour lui conférer un caractère d'organisation. Il représente des traits, des types d'actions, des cas d'usage et ce caractère partiel nécessite, puisqu'il est partiel, de constituer des groupes pour former une organisation puis un système. Les traits conceptuels, telle l'intention ou le jugement, seront localisés dans les organisation [C&L 98]. Dans la modélisation d'un système qui simule des comportements d'animaux, c'est-à-dire des animats, un tel animat ne sera pas un agent mais systématiquement une vaste organisation d'agents.

Cette approche est en effet plus robuste et plus conforme au caractère d'adaptabilité du système. Elle est incrémentielle, et donc facilement augmentable, et elle permet d'inclure des cas de stabilisation comme des cas de rupture de l'organisation, ce qui est bien typique des systèmes adaptatifs.

La structure de l'agent ainsi considéré est celle d'un certain automate, ou ATN, ou bien toute structure équivalente qui peut être formée d'objets. Nous avons présenté de telles structures dans [CAR 98]. Dans le système, il sera naturel de représenter l'agent par au moins un processus.

4.2.2. Agents d'introspection

Nous avons défini dans [CAR 98] les caractères d'un système à boucle d'interprétation. Il s'agissait de définir une certaine organisation d'agents dont le but était de représenter à la fois l'environnement perçu par le système et la réflexion du système sur cette représentation. Un système adaptatif a en effet pour fonction de faire émerger le sens de la représentation de son environnement et de son organisation, entendu comme processus d'interprétation liant des objets à des signes.

Ce système repose sur une quadruple organisation d'agents (C.f. Fig. 3) :

1- Les sollicitations venant de la membrane sont représentées, pour correspondre à leurs caractères fragmentaires, par des agents logiciels, dits *agents aspectuels*. L’action de chaque agent consiste à exprimer une tendance, une virtualité, pour dégager la catégorie qu’il réifie, en tenant compte de son contexte d’action, c’est-à-dire des autres agents. Une première organisation d'agents va donc s'approprier toute information pour en dégager les caractères saillants, dans son contexte.

2- Une seconde organisation d'agents va, en opérant sur le paysage des agents aspectuels, en dégager les caractères pertinents, les lectures admissibles, les structures causales et temporelles possibles. Ces agents dits *agents de morphologie*, qui opèrent selon des buts rationnels, tentent de dégager les formes pertinentes dans l'ensemble des traits exprimés par les agents aspectuels, en constituant des *chréodes* [JOR 89], en agrégeant les agents aspectuels en structures significatives. Les chréodes sont des émergences réifiées sous forme d'agents ainsi créés. Ainsi, le paysage d'agents aspectuels admet différentes lectures, explicitement représentées.

3- Une troisième organisation d'agents va prendre en considération les agents de morphologie et les chréodes, pour former une analyse de ces morphologies potentielles. Ces agents, dits *agents d'analyse*, vont fournir une vue globale cognitive de ce qui a été exprimé par les informations venant du contexte (le paysage des agents aspectuels). Ils vont réaliser des inférences pour construire une représentation conçue de la situation courante. Ces générations sont systématiquement des émergences. Cette organisation d'agent est bouclée sur celle des agents aspectuels, réalisant ainsi un processus de génération du sens (boucle systémique).

4- Une quatrième organisation d'agents va réaliser des actions de décision, en choisissant des stratégies d'inhibition d'action des agents d'analyse et en contrôlant ainsi la génération du sens dans le système. Ils vont limiter le déploiement de la réorganisation du système en prenant en compte les caractères typiques de cette réorganisation. Cette décision est un phénomène qui utilise la morphologie des systèmes d'agents aspectuels et organisationnels comme des "patrons décisionnels" [B&S 96]. La décision prend ainsi typiquement en compte les points de vue multiples.

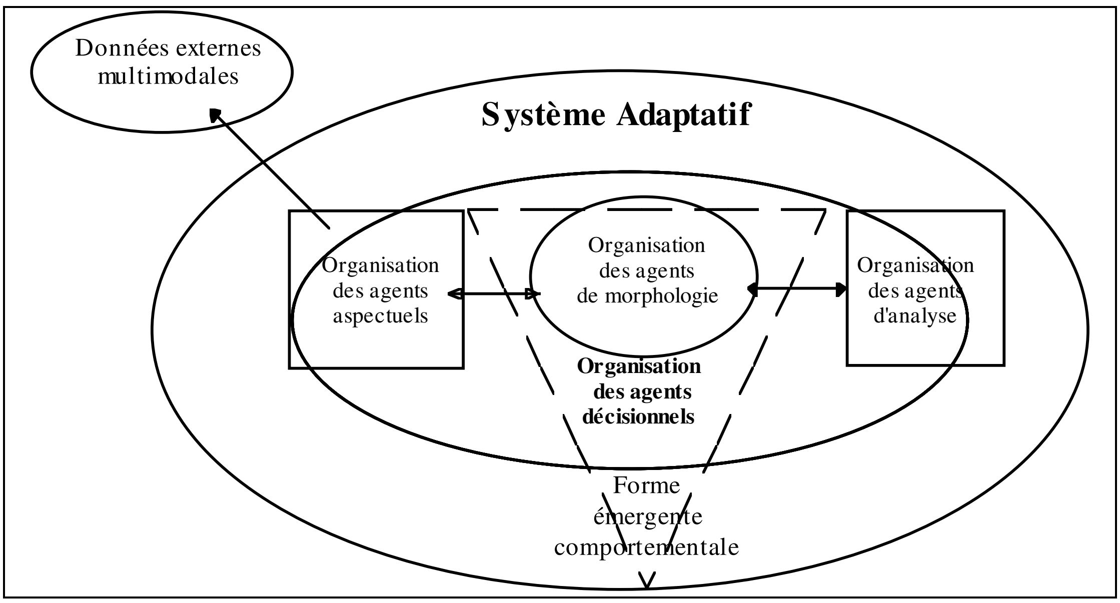

Figure 3. Structure d'un système adaptatif avec organisations d'agents d'introspection

Ces organisations d'agents (aspectuels, de morphologie, d'analyse et de décision) constitue l'ensemble des agents dits *d'introspection*. Ces agents ont pour but de construire une représentation conçue (et donc pas simplement perçue) de la situation courante système-environnement. Ils permettent de détacher définitivement l'action du système adaptatif, résultant de l'émulation de certains agents d'analyse, des informations brutes produites par l'enveloppe. Le système n'opère donc pas par réaction.

Notons que la structure des agents d'introspection qui a jusqu'à maintenant été retenue est assez souple. Elle permet son augmentation et sa modification. Le codage en Smalltalk permet d'ailleurs d'en modifier automatiquement la structure par génération de nouvelles classes.

Le rôle des agents est de produire des organisations d'agents concurrentes. Le moyen est l'activation des agents et leur mise en communication. Le cas d'usage des environnements informatiques monoprocesseurs ne facilite pas les choses et impose de résoudre de difficiles problèmes de simulation de la concurrence.

Le rôle des organisations d'agents est de permettre à chacune d'être dominante sur une certaine période. Le rôle principal du système est de faire évoluer les organisations pour renforcer la permanence identitaire du système. Cela est réalisé par la boucle systémique d'inhibition-renforcement de l'organisation des agents d'introspection.

4.3. La notion de reproduction dans les systèmes d'agents

Classiquement, un système est conçu, développé puis mis en service. Dans le cas du Génie Logiciel dans l'approche objets, la phase de mise en service précède simplement celle de maintenance, où des spécialistes développeront de nouvelles fonctionnalités, le plus facilement possible. Un système adaptatif conçu dans une approche agents, n'est qu'un générateur d'organisations, développé puis mis en service pour se transformer, au moins selon les différents usages que l'on en fera. Evidemment, en utilisant une notion typique des systèmes adaptatifs vivants, il serait agréable de pouvoir disposer de "systèmes-brin d'ADN" qui coderaient pour des systèmes bien adaptatifs. Cela semble doublement impossible, par la complexité combinatoire du correspondant chromosomique nécessaire et par le fait que le système ne serait pas suffisamment spécifique pour résoudre une classe de problèmes.

Nous allons présenter le problème de la reproduction selon trois aspects : l'un applique la technique des algorithmes génétiques à des systèmes d'agents déjà constitués pour satisfaire à des fonctions de fitness, un autre envisage l'introduction du concept de sénescence dans le système, et un dernier, qui généralise les deux cas précédents, pose les bases d'un système à agents générateurs.

4.3.1. Redondance, sélection et usage des algorithmes génétiques

Nous avons vu que le système adaptatif a, au niveau de ses agents, une structure redondante. On le construit pour qu'il y ait toujours plusieurs agents qui soient aptes à répondre à une certaine sollicitation réorganisationnelle. Cela permet la disparition de certains agents (par accident par exemple) et donc la robustesse du système. Toute disparition ou défaillance est compensable par l'action d'agents "sémantiquement proches". Cela permet surtout de disposer d'un domaine d'agents que l'on va pouvoir spécialiser, par reproduction contrôlée.

On peut ainsi sélectionner des caractères typiques dans l'organisation. Une organisation d'agents, initialement conçue avec redondance, va pouvoir se réorganiser en choisissant certaines émergences et certaines morphologies plutôt que d'autres. Le système va opérer son apprentissage par des sélections. Nous avons expérimenté cette approche dans le cas d'un système multiagent traitant de l'amélioration d'un planning par des algorithmes génétiques [VCG 97], [VCL 98]. Les fonctions de fitness, qui sont en général multi-objectifs, sont localisées dans certains agents et contraignent l'évolution des autres agents grâce a des croisements, mutations et mort d'agents.

Dans cette approche, le système est construit avec des agents possédant tous un caractère chromosomique typique, dont le grain est adapté aux actions qu'ils ont à entreprendre. Le fonctionnement revient alors à faire évaluer par les agents à fonction de fitness les développements des diverses organisations, puis à réaliser des sélections. Le système fonctionne pour résoudre un certain problème, et il adapte son organisation interne pour cela. On peut considérer que le système adaptatif a, entre l'état de prise d'information par la membrane et la production d'un état observable (la réponse) sur celle-ci, une phase de fonctionnement de ce type. Mais ce fonctionnement est aujourd'hui expérimental dans les systèmes adaptatifs, puisque l'usage d'algorithmes génétiques est très coûteux en temps de calcul.

4.3.2. La sénescence

La finalité d'un système adaptatif, s'il en est une, n'est pas de résoudre *un* problème ni de s'adapter pour s'adapter. L'introduction, dans la boucle systémique, de notion d'intentionnalité et de génération du sens, ne peut raisonnablement se faire que sous l'existence d'une raison d'être propre au système. Il s'agit évidemment de système informatique, donc construit artificiellement. Ces notions de raison et d'intentionnalité sont typiques du domaine et, si elles sont parentes des notions que l'on applique à l'Homme ou à certaines espèces vivantes, s'en distinguent.

La raison d'être du système adaptatif est placée dans l'organisation elle-même. Le système s'expérimente, se reconforme par un processus bouclé, il produit des états quasi-stables, puis expérimente sa nouvelle organisation, et ainsi de suite. Son fonctionnement créé donc les états représentationnels de la situation qu'il conçoit. Ceux-ci sont traités comme des états émergents et non comme des ensembles de situations a priori définies et atteintes au bout d'une certaine trajectoire.

Il y a deux moyens pour entraîner le système dans un processus de construction de représentations :
1. le système peut fonctionner en boucle fermée sans interruption,
2. le système peut fonctionner pour ne pas cesser d'être tant qu'il le peut.

Le premier cas revient à construire un système, à le programmer puis à exécuter le programme. Si le programme est conçu autour d'une boucle infinie, il tournera vraisemblablement longtemps. La raison de son fonctionnement provient donc de son lancement.

Dans le second cas, le système comprend dans son organisation un moyen de se placer "en tension" pour éviter le non fonctionnement. L'ensemble des agents qui constituent le système sont construits et ont tous un caractère de sénescence [TZA 95]. Les agents se dégradent dans le temps et ont, par différentes fonctions homéostatiques, à gérer leur dépense d'énergie pour ne pas s'éteindre trop rapidement. Cette gestion est équationnelle, et repose sur des fonctions à seuil. Il n'y a pas de moyen continu pour passer de la fonction de sénescence de l'agent à la fonction de sénescence du système : ce cas localise la notion de durée au niveau de l'agent.

Mais cette fonction de sénescence peut être placée dans un système adaptatif au niveau des agents d'introspection, c'est-à-dire que le concept de finitude de l'action, considéré comme objet (un ensemble d'agents aspectuels référant au temps), est interprété selon le contexte d'une certaine situation (la boucle systémique opérant sur une certaine organisation courante), pour produire un certain signe (une structure d'agents d'analyse). La notion de finitude du fonctionnement du système est éventuellement perceptible pour toute réorganisation entreprise par le système. Il existe alors une conception émergente de la durée, qui engendre des représentations temporalisées de chaque situation.

On peut voir ce cas comme celui d'un système où les agents ont des possibilités de se reproduire (par clonage ou par mutation), mais sans qu'il n'y ait de fonction de fitness posée a priori. Le système doit simplement s'adapter en s'altérant à chaque adaptation. Il est ainsi prédateur de son environnement, pour compenser la dégradation de ses composants. Ce n'est pas un système résolveur de problèmes symboliques ni optimiseur systématique de comportement, mais un système qui négocie par sa réorganisation son altération temporelle. Sa distanciation avec les stimulus venant de l'extérieur est plus grande, puisque qu'il conçoit toute situation à la fois dans sa localité et dans la trajectoire de ce que l'on peut appeler la représentation de sa durée de vie.

4.3.3. Les agents générateurs et le processus d'évolution

Un système adaptatif doit quand même pouvoir représenter par son comportement un déploiement social. Pour cela, il serait nécessaire qu'il puisse se développer dans une "société" de systèmes adaptatifs. Il faut donc poser le problème de sa conception dans sa globalité :

1. on conçoit un nouveau système ex-nihilo,
2. ce système hérite artificiellement de propriétés de certains systèmes déjà conçus, avec lesquels il va communiquer,
3. il est placé en fonctionnement dans un environnement mixte, où figurent certains systèmes du même type et des utilisateurs humains,
4. l'ensemble des systèmes adaptatif a, entre autres, une pratique d'apprentissage et de développement mutuels.

Dans ce cadre, qui n'est plus irréaliste aujourd'hui, le nouveau système à concevoir est pensé comme constitué d'une organisation qui n'est que *génératrice*. Il doit être typiquement plastique et doit avoir vocation à évoluer, par confrontation avec ses utilisateurs et avec des systèmes semblables.

Toute l'organisation du système est à repenser par rapport à une approche classique, où les caractères sont définitivement posés pour être fonctionnels. Il n'est évidemment pas concevable aujourd'hui de construire un système tel un brin d'ADN artificiel qui coderait pour un système adaptatif effectif. Mais il est possible de concevoir un système dont l'organisation n'est que génératrice de développements de modules produisant son évolution et déterminant son comportement.

L'architecture du système adaptatif que nous avons proposée est bien adaptée à ce cas. Toutes les organisations d'agents sont génératrices de nouveaux agents, lorsque le système est en fonctionnement. Il y a dans le système un niveau de reproduction, qualifié d'élémentaire, qui consiste à faire muter localement et reproduire par clonage les agents pour améliorer leur fonctionnement et celui du système. Les groupes d'agents et les organisations d'agents, par la propriété de morphologie de paysages d'agents, peuvent se développer par croisements (cross-over sélectif sous fonction de fitness locale). La notion de finitude perçue sera introduite dans les agents de décision et dans certains agents d'analyse. Cela reste à expérimenter et constitue le domaine que nous explorons actuellement.

Ces recherches en cours, ouvrent une voie et il reste évidemment beaucoup à faire pour disposer de réels systèmes adaptatifs. La notion de croisement de systèmes adaptatifs, et donc de génération de "langage" d'agents et d'organisation d'agents, n'a pas encore été explorée, ni la notion de système à conception à partir "d'ADN artificiel". Ces deux notions sont pourtant essentielles, mais difficiles. On peut aussi penser à une formalisation de ces notions, comme dans une certaine mesure la théorie de la morphogenèse le proposait dans sa problématique.

5- Le caractère chaotique du comportement des systèmes adaptatifs

L'espace comportemental du système adaptatif soumis à la réorganisation par clôture opérationnelle et permettant la reproduction d'agents et d'organisations a une structure assez particulière. Cet espace comportemental constitue en fait un système dissipatif, puisque la notion de vie et de mort des agents et des organisations d'agents entraîne la propriété de consommation d'énergie. Le système prendra de l'énergie (de l'information) dans son environnement. Nous allons faire correspondre au système adaptatif, représenté par des agents, un espace comportemental muni d'une topologie métrique qui permettra de représenter sa trajectoire et d'en étudier les propriétés.

5.1. Attracteurs

Nous définissons l'espace comportemental structurel, qui sera noté E_S, comme l'ensemble des représentations des états des agents (états des variables, processus, structures), des organisations d'agents (états des graphes de couplages et des réseaux d'accointances) et des formes communiquées (structures informationnelles émises et perçues). Cet espace peut être plongé dans $R^{n,}$ muni d'une topologie métrique (C.f. Fig. 4).. L'espace de déploiement, c'est-à-dire le comportement dans le temps du système, est alors l'espace produit :

$$D = E_S \text{ x } T.$$

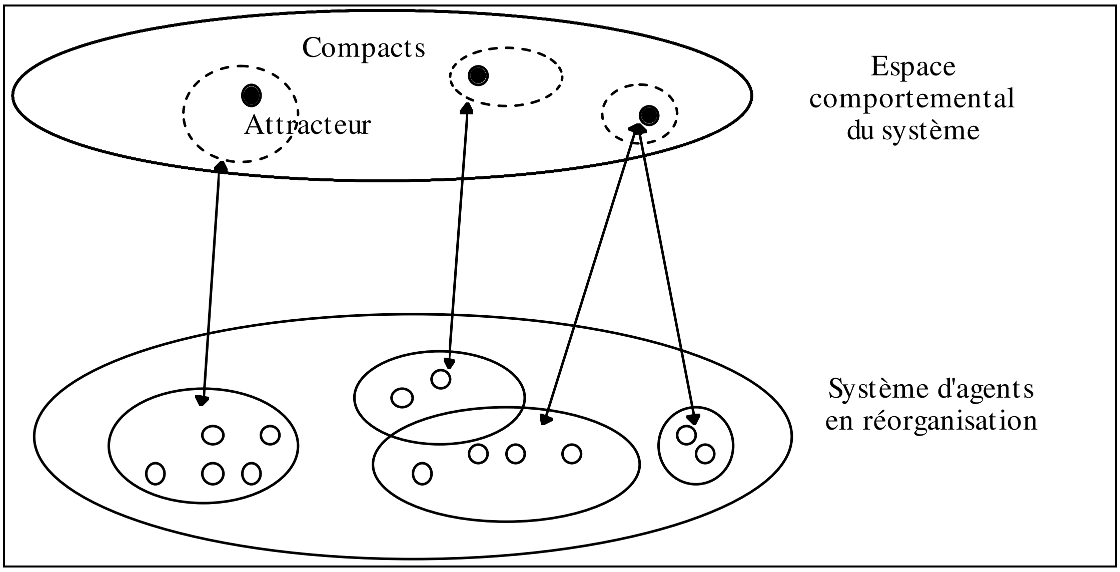

Figure 4. Système adaptatif d'agents et espace de représentation

Si nous permettons aux agents et aux organisations d'agents de se reproduire selon des lois de reproduction locales à ceux-ci, le système a un comportement qui devient typiquement non linéaire : son déploiement au temps t+1 dépend fortement de son déploiement au temps t, puisque entre ces deux instants de temps, sa structure a pu changer significativement [PJS 92]. La mesure de son comportement peut donc dépendre de la précision de cette mesure (cas des systèmes dynamiques continus).

On peut définir dans D une notion *d'attracteur* [RUE 80]. Une trajectoire comportementale du système adaptatif est une suite de points de D. C'est la courbe géométrique qui caractérise l'évolution du système. Un *attracteur organisationnel* A de D est un ensemble borné de D (un compact pour D muni d'une topologie métrique par exemple) qui possède la propriété suivante :

- il existe un voisinage V de A, c'est-à-dire un sous-ensemble de D tel que pour tout point x de A il existe une boule ouverte centrée sur x et contenue dans V, tel que toute trajectoire comportementale du système contenue dans le voisinage V reste dans V, pour toutes les itérations de D.

La question est alors de décider du caractère éventuellement chaotique de A. Si les trajectoires du système adaptatif sont "sensitives aux conditions initiales", c'est-à-dire si toute génération particulière du système, tout cas de construction, entraîne des comportements sensiblement différents et dont les écarts ne sont pas prévisibles, alors l'attracteur sera dit *chaotique*. Si de plus sa structure, par le fait de reproductions anarchiques des agents, est rendue fractale, il s'agira d'un *attracteur étrange*.

5.2. Analyse du comportement d'un système adaptatif

La question de décider si un système adaptatif possédant la propriété d'auto-reproduction de certains de ses composants est ou non chaotique est évidemment centrale. Les systèmes physiques et sociaux considérés comme chaotiques sont multiples [PJS 92], et les systèmes adaptatifs artificiels s'engagent dans ce domaine.

5.2.1. Etude des trajectoires du système

On peut, et c'est ce que l'on fera, considérer certains éléments significatifs du système d'agents et les représenter, dans l'évolution temporelle du système, par des suites de points de R^n, avec n petit. L'étude de ces suites peut permettre de déterminer le processus de génération qui les engendre, c'est-à-dire ou bien un bruit, ou bien le graphe d'une fonction, ou bien un attracteur.

Les caractères intéressants concernant le comportement du système sont les états des agents (représentables par des vecteurs de R^n), le graphe de dépendance des agents (plus difficilement représentable par un vecteur de R^n), le gradient d'évolution de l'organisation des agents (représentable par des vecteurs de R^n), ou bien les communications entre agents (représentables par des vecteurs de R^n). On peut donc représenter l'état courant du système par un point d'un espace métrique (produit ou sélectionné), projeter cet espace dans un autre plus petit (par analyse en composantes principales par exemple), puis étudier le comportement de la trajectoire géométrique dans ce dernier espace. On détectera alors, ou non, des attracteurs. Ce procédé est actuellement étudié dans le système à boucle d'interprétation que nous développons.

5.2.2. Méthode de construction du système orientée comportement

On peut ainsi utiliser une méthode particulière en sept étapes pour construire et analyser le comportement d'un système adaptatif (C.f. Fig. 5).

1. Définition de la membrane du système (interface).
2. Définition des organisations du système (structure gros grain).
3. Définition des agents sans reproduction (structure grain fin).
4. Définition d'un espace comportemental (choix des variables et des topologies).
5. Etude des trajectoires simulées (découverte de régularités).

6. Introduction de la propriété de reproduction.
7. Etude des trajectoires dynamiques du nouvel espace comportemental (découverte d'attracteurs).
8. Introduction des ensembles stabilisateurs.

Figure 5. Méthode de développement d'un système adaptatif

Les cinq premières étapes sont naturelles et conduisent à définir méthodiquement un système et à étudier ses formes stables. Mais la détermination de l'espace comportemental du système est ici fondamentale. On peut donc s'efforcer de paramétrer cette première ébauche de système, qui est statique, c'est-à-dire sans capacité de reproduction. Les paramètres sont les caractères typiquement évolutifs du système, qui, dans cette première phase, sont fixés.

On introduit ensuite les capacités de reproduction à tous les niveaux organisationnels du système, puis on étudie les nouvelles trajectoires du système. Cela permet d'une part de moduler les capacités reproductives (bien définir les fonctions de fitness locales) et d'autre part de découvrir les attracteurs comportementaux.

Certains de ces attracteurs peuvent être considérés comme nuisibles et la dernière étape de réalisation du système consiste alors à introduire, comme ensembles stabilisateurs, des organisations d'agents de décision chargées de contrôler, en ligne, les déviations éventuelles du comportement du système. Cet procédé s'inspire de l'usage des algorithmes génétiques introduits au niveau global. Il peut aussi consister à introduire explicitement, comme dans une action de manipulation génique, un certain attracteur dans le système, sous la forme d'un système à dynamique structurelle agissant sur l'organisation des agents de décision.

Remarquons que ces ensembles stabilisateurs correspondent au processus de sélection opéré dans le vivant, à l'échelle de l'espèce. La sélection est ici simulée par ajout, automatique ou réalisé "à la main", de composants, avec une échelle de temps entièrement maîtrisable. Les systèmes adaptatifs artificiels se distinguent ainsi, dans ce cas, de leurs homologues naturels, par la maîtrise de leur temporalité.

Les conditions pour qu'un système, dont les composants initiaux ne sont que générateurs, se comporte, sinon quasi-linéairement, du moins avec un attracteur non chaotique, restent à expliciter. C'est un domaine de recherche ouvert et c'est sans doute parce qu'il n'y a pas aujourd'hui de réponse satisfaisante que l'on se limite à la construction de systèmes multiagents au comportement linéaire, tels des résolveurs de problèmes bien posés.

Conclusion

L'approche agent vient de la conjonction de deux préoccupations bien différentes. D'une part, on s'inspire de la conception des systèmes à objets distribués, qui relève d'une certaine méthodologie de programmation et d'une habitude usuelle de la résolution de problèmes. D'autre part, on s'inspire de l'étude des modèles sociaux, qui procède de préoccupations élargissant le cadre de l'Informatique traditionnelle. L'attitude la plus simple consiste alors à conserver, tant que faire se peut, des rapports agréables entre ces deux types de préoccupations. Ce n'est pas, selon nous, si simple. Nous pensons que les systèmes adaptatifs, tels que nous les avons définis, font rupture avec le domaine des traitements réguliers, linéaires et analytiques des problèmes. Il ne s'agit plus tout à fait d'Intelligence Artificielle classique ni de programmation systématique par objets, mais d'une approche des systèmes organisationnellement complexes et de la vie artificielle dans ses caractères fondamentaux.

Il faut alors penser de nouveaux outils, de nouvelles méthodes d'analyse-conception des systèmes, pour de nouveaux problèmes, qui sont par nature différents. Les systèmes adaptatifs posent en effet de très nombreux problèmes : l'étude de leur non linéarité typique, la génération d'un langage entre entités communiquantes, l'auto-organisation comme moyen d'adaptation à l'environnement et à son organisation, l'emploi de la reproduction pour s'affranchir de ses limites structurelles, la maîtrise de la trajectoire comportementale, c'est-à-dire la connaissance des caractères des attracteurs organisationnels. Ces problèmes doivent être posés et étudiés pour conduire à des propriétés bien validées et bien implémentables.

La conception d'un système adaptatif pose des questions différentes de celles survenant dans la construction des systèmes à objets selon l'approche Génie Logiciel. La frontière entre ces deux méthodes peut évidemment être réduite, ce qui est souvent fait, mais certainement au détriment de l'expressivité créatrice des systèmes à agents. On reste prisonnier de ses habitudes, et beaucoup de systèmes multiagents sont des systèmes à objets un peu déstabilisés ou un peu libérés si l'on préfère. Nous choisissons une approche plus radicale de l'agent, comme composant plastique d'un système adaptatif à fort caractère d'autonomie. Cela permet de poser des problèmes plus profonds, qui, même si nous ne les résolvons pas aujourd'hui, ou si nous les traitons de manière malhabile, sont plus formateurs pour le constructeur, et pour son adaptation à lui-même.

Bibliographie

[BFS 95] Bull L, Fogarty T.C., Snaith M., *Evolution in multi-agent systems: Evolving communicating classifier systems for gait in a quadrupedal robot*, Proccedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms, p. 382-388, San-Mateo, CA, 1995.

[BGV 97] Bouzeghoud M., Gardarin G., Valduriez P., *Les Objets*, Eyrolles, 1997.

[BOO 94] Booch G., *Analyse et Conception orientées objet*, Addison Wesley, 1994.

[BOU 93], Bouron T., *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multiagent*, Thèse de l'Université de Paris VI, 1993.

[C&L 90] Cohen P., Levesque H., *Rational Interactions as the Basis for Communication*, in "Intention in Communication", p. 221-255, MIT Press, 1990.

[C&L 98] Cardon A., Lesage F., *Toward Adaptive Information Systems: considering concern and intentionality*, KAW'98, Communication publiée dans les actes, Banff, Canada, Avril 1998.

[CAR 96] Cardon A., *La complexité des systèmes d'expression du sens*, Rapport Laforia Paris VI, 96-09, Février 1996.

[CAR 98] Cardon A., *Les systèmes adaptatifs à architecture d'agents dynamiques : une approche de la conscience artificielle*, Rapport LIP6 98/003, Janvier 1998.

[CDB 98] Collinot A., Drogoul A., Benhamou P., *Agent oriented Design for a Soccer Robot Team*, p. 41-47, Proceedings of ICMAS'96, 1996.

[D&L 91] Durfee E., Lesser V., *Partial Global Planning: a Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation*, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, 1991.

[DUR 89] Durfee H., *Coordination of Distributed Problem Solvers*, Kluwer Academic Publishers, 1989.

[FIK 82] Fikes R., *A Commitment-Based Framework for Describing Informal Cooperative Work*, Cognitive Science 6, P. 331-347, 1982.

[FOX 81] Fox M., *An Organizational view of Distributed Systems*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. SMC-11, p. 70-80, 1981.

[G&D 96] Grefenstette J., Daley R., *Methods for competitive and cooperative co-evolution*, Papers from the 1996 AAAI Spring Symposium, p. 45-50, Menlo-Park, CA, 1996.

[GAS 88] Les Gasser, *Distribution and Coordination of Tasks Among Intelligent Agents*, SCAI'88, p. 189-192, 1988.

[G&D 96] Guessoum Z., Dojat M., *A Real Time Agent Model in a Asynchronous-Object Environment*. Lectures notes in Artificial Intelligence 1038, Agent Breaking Away, W. Van de Valde and J. Param (Eds), Netherlands, p. 1990-1993, January 1996.

[H&D 95] Huber M., Durfee E., *Deciding when to commit to action during observation-based coordination*, ICMAS-95, p. 163-170, Menlo-Park, CA, 1995.

[JAC 93] Jacobson I., *Le Génie Logiciel orienté Objet*, Addison-Wesley, 1993.

[LAI 97] Lai M., *UML, La notation unifiée de modélisation objet*, InterEditions, 1997.
[L&R 92] Levy R., Rosenchen J., *A game theoretic approach to the pursuit problem*, Working Papers of the 11th International Conference on Distributed Intelligence, p. 195-163, 1992.
[MEY 87] Meyer B., *Programming as Contracting*, Report TR-EI-12/CO. Goleta, CA: Interactive Software Engineering. 1987.
[MIN 79] Mintzberg H., *The Structuring of Organizations*, Prentice Hall, 1979.
[MOR 91] Morin E., *La Méthode, Tome 4 : Les Idées*, Seuil, 1991.
[MUL 97] Muller P.-A., *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles 1997.
[PEI 84] Peirce C.S., *Textes anticartésiens*, Philosophie de l'esprit, Aubier, 1984.
[PJS 92] Peitgen H-O, Jürgen H., Saupe D., *Chaos and Fractals*, Springer Verlag, 1992.
[R&G 92] Rubin K., Golbberg A., *Object Behavior Analysis*, Comm of the ACM, Vol. 35 (9), Septembre 1992.
[R&G 95] Rao A., Georgeff M., *Bdi agents: From theory to pratice*, ICMAS-95, p. 312-319, Menlo-Park, CA, 1995.
[RUE 80] Ruelle D., *Strange Attractors*, Math. Intelligencer 2., p. 126-137, 1980.
[RUM 97] Rumgaugh J., *Modélisation et conception orientées objet*, Masson, 1997.
[S&M 88] Shlaer S., Mellor S., *Object-Oriented Systems Analysis: Modeling the World in Data*, Englewood Cliffs, New-Jersey, Yourdon Press, 1988.
[S&T 92] Shoham Y., Tennenholtz M., *On the Synthesis of Useful Social Laws for Artificial Agent Societies*, Proceeding of AAAI-92, CA, p. 276-281, 1992.
[S&V 97] Stone P., Veloso M., *Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective*, CMU-CS-97-193 Report, Carnegie Mellon University, 1997.
[SIM 91] Simon H., *Science des systèmes, science de l'artificiel*, Paris, Dunod, 1991.
[SMI 80] Smith R., *The Contract net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*, IEEE Transaction and Computers, vol C 29 no 12, p. 1104-1113, 1980.
[THO 72] Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, W. A. Benjamin, INC, Massachusetts, 1972.
[THO 81] Thom R., *Morphologie du sémiotique*, Recherche Sémiotiques, Vol 1 (4), p. 301-309, 1980.
[TZA 95] Tzafestas E., *Vers une systémique des agents autonomes: des cellules, des motivations et des perturbations*, Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1995.
[VAR 89] Varela F., *Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant*, Seuil, 1989.
[VCG 97] Vacher J-P., Cardon A., Galinho T., *Genetic algorithms in Multiagent Systems*, EuroGen'97, Communication publiée dans les actes, Trieste, Italie, Novembre 97.
[VCL 98] Vacher JP., Cardon A., Lesage F., *Genetic Algorithms in a Multi-Agents System*, INBS, IEEE Proc., Communication publiée dans les actes, Washington DC, USA, Mai 1998.
[WAL 77] Walliser B., *Systèmes et modèles*, Seuil, Paris, 1977.
[W&W 95] Walker A., Wooldridge M., *Understanding the emergence of conventions in multi-agent systems*, ICMAS-95, p. 384-389, Menlo-Park, CA, 1995.