
ETUDE DE LA CONCEPTION ET DU CONTROLE COMPORTEMENTAL D'UNE ORGANISATION MASSIVE D'AGENTS

Alain Cardon

- 1- LIP6, Laboratoire d'informatique de Paris VI, Thème OASIS
UPMC Case 169, 4 Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05.
- 2- LIH, Faculté des Sciences
Université du Havre, 76057 Le Havre Cedex.
Alain.Cardon@lip6.fr

Résumé : Nous approchons les systèmes multi-agents massifs comme des systèmes instables, évolutifs et adaptatifs. Nous montrons que leur conception et leur construction se font en utilisant une méthode d'agentification incrémentielle à partir de fonctionnalités distribuées dans les comportements des agents. Les modifications du nombre des agents, de leurs structures et de leurs capacités de communication par le fait du fonctionnement même du système n'est pas compatible avec une spécification complète faite a priori ni avec une prédiction fine du comportement du système. Le contrôle de tels systèmes ne peut se réaliser qu'en les dotant, dans leur fonctionnement, de caractères d'auto-évaluation de leur organisation. Nous posons que ceci est réalisable en définissant une nouvelle organisation d'agents observant l'organisation initiale pendant son fonctionnement, évaluant les modifications de ses caractères morphologiques et utilisant cette évaluation pour modifier l'organisation initiale, dans une boucle systémique d'autocontrôle. Nous présentons une application d'une telle approche : les Systèmes d'Information et de Communication de gestion de crise.

Abstract: We approach massive multi-agent systems as unsteady, evolutionary and adaptive systems. We show that their conception and their construction are made while using an incremental agentification method, from functionalities distributed in the behavior of organization of agents. Modifications of the number of agents, of their structures and of their capacities of communication, by the fact of the working, aren't compatible with a complete specification set a priori nor with a fine prediction of the behavior of such a system. The control of the system achieve itself while endowing agents in their working, with characters of self-assessment of their organization. We claim that we can control such a system while defining a new organization of agents observing the initial organization during its working, valuing modifications of its morphological characters and using this assessment to modify the initial organization, in a systemic loop of self-control. We present an application for this approach: a C3I system for crisis management.

Mots clés : *systèmes multi-agent, adaptativité, auto-organisation, morphologie, agentification, instabilité, construction de systèmes, comportement.*

Keywords: *multi-agent systems, adaptivity, behavior, self-organization, morphology, agentification, instability, construction of systems.*

INTRODUCTION

Les recherches dans le domaine des systèmes multi-agents connaissent actuellement un grand développement. Les caractères plastiques, dynamiques, sociaux de ces systèmes leur permettent, en simulation, de bien exprimer le comportement de systèmes réels pour lesquels les modèles équationnels sont insuffisants et, en fonctionnement non simulé, de produire des comportements typiquement adaptatifs. Les systèmes multi-agents sont appliqués dans des domaines très variés où ils présentent une alternative intéressante aux approches classiques, mais il existe une limitation à leur utilisation : on ne sait ni facilement concevoir ni bien contrôler le comportement de systèmes multi-agents de très grande taille, contenant des dizaines ou des centaines de milliers d'agents.

Nous nous intéressons plus particulièrement à des systèmes dont l'organisation est complexe et qui sont typiquement adaptatifs à leur environnement [Le Moigne 1990], [Cardon 2000]. Ce sont des systèmes qui suivent le paradigme du vivant et qui sont capables d'initiatives, d'adaptativité, de comportement originaux, comme doivent l'être des robots autonomes dotés d'intentions, des simulateurs d'écosystèmes de très grande taille réalisant automatiquement le changement d'échelle ou encore les systèmes générateurs de sens dotés d'une conscience artificielle. Nous pensons que les systèmes multi-agents massifs (SMAM) sont particulièrement adéquats pour représenter de manière logicielle ces phénomènes complexes. Les agents, dans ces systèmes, ne peuvent avoir qu'une structure simple et être plutôt réactifs, de façon à être facilement construits et générés par reproduction automatique. Ils ont, structurellement, des connaissances très limitées mais révisables, leurs buts seront également modifiables selon les connaissances manipulées dans les communications. Nous appelons ces organisations d'agents, lorsque le nombre de ceux-ci dépasse le millier, des organisations d'agents massives.

Dans une organisation massive, les agents ont été créés en employant une certaine méthode d'agentification qui a permis de réifier les fonctionnalités multiples dont on a voulu doter initialement le système. Les agents s'efforcent d'atteindre leurs buts en s'organisant au mieux, en utilisant leurs capacités de communication via leurs réseaux d'acointances, pour former des groupes multiples : ils échangent des messages entre eux selon le langage dont ils sont dotés [Cohen 1995]. Ils réalisent, par leurs actions et leurs pro-actions, la mise en activation de l'organisation d'agents dans son entier. Le système a alors un comportement qui est déterminé d'une part par l'action de certains agents dédiés à l'action sur son interface et d'autre part par l'activation de l'organisation des agents strictement internes du système.

La question est alors de définir, de concevoir et surtout de contrôler, les caractères du comportement global d'une organisation d'agents massive, et ceci pendant son fonctionnement même. Pour présenter le type de contrôle que l'on peut appliquer, nous allons étudier d'abord deux exemples avant de présenter une solution pour les systèmes multi-agents massifs.

Le premier exemple de système contrôlé composé de très nombreux éléments simples est celui des systèmes particuliers. Il s'agit de systèmes physiques composés de très nombreuses particules élémentaires. On sait parfaitement définir, en mécanique classique, la notion de trajectoire d'une particule, qui est représentée sous forme équationnelle. Lorsque les particules sont sans interaction, le comportement du système est alors entièrement déterministe et donné par toutes les trajectoires qui sont bien calculables. Mais lorsque les particules sont en interaction permanente, le système a un comportement complexe qui est difficilement déterminable par les équations classiques. On est conduit à adopter une représentation statistique du comportement du système, dont les états ne sont plus stables ni facilement prédictibles [Prigogine 1996].

Le second exemple de référence, dans le domaine de l'informatique cette fois, est celui des systèmes à objet dont le contrôle est total, pendant la réalisation du système et pendant son fonctionnement. Il est courant de concevoir et de construire des systèmes ayant des milliers d'objets. Les systèmes à objet seront vus comme une interprétation logicielle à la fois étendue et contrainte des systèmes particuliers, mais avec des interactions permanentes. Un objet est une entité beaucoup plus complexe qu'une particule élémentaire, qui interagit avec d'autres objets mais les interactions sont entièrement et définitivement réglées dans les diagrammes d'interactions et les diagrammes dynamiques du système, lors de la construction [Muller 1997]. On conçoit ainsi des systèmes selon une démarche très contrôlée pour que leur fonctionnement soit entièrement maîtrisable.

Enfin, les systèmes multi-agents seront vus comme une rupture conceptuelle avec les systèmes à objet, en ce sens que les agents sont plus complexes et surtout sont autonomes et proactifs [Wooldridge - Jennings 1994]. Les interactions entre agents, qui sont fondamentales dans le fonctionnement du système, ne peuvent pas être complètement précisées lors de la construction. Ces interactions sont évolutives et font de l'organisation d'agents un système dynamique semblable par certains aspects à un système particulière instable. Les systèmes multi-agents massifs seront donc vus comme des systèmes dynamiques complexes dotés, en ce qui concerne les actions et les communications des agents, d'un caractère de forte autonomie comportementale.

Un tel système a la particularité d'unifier dans son architecture la connaissance et l'usage de cette connaissance. Le fonctionnement et le traitement des connaissances seront exprimés par l'évaluation de sa morphologie, c'est-à-dire de la forme de son organisation en mouvement de calcul. Nous proposerons, pour représenter cette morphologie, une organisation d'agents spécifique liée organiquement au système multi-agent initial et exprimant son comportement. En bouclant cette interprétation avec le système de base en fonctionnement, nous obtiendrons alors un système auto-adaptatif.

Il y a une rupture entre la mécanique classique des systèmes stables et celle des systèmes évoluant loin de l'équilibre. Il y a également une rupture entre les systèmes informatiques construits pour réaliser des tâches précises et entièrement prévues et les

systèmes informatiques instables, s'adaptant à leur environnement d'usage et même à leurs propres caractères de fonctionnement. Il y a une rupture entre la mécanique idéale qui produit des objets d'usage entièrement maîtrisés et le vivant, naturel ou artificiel, qui évolue dans sa durée et pour son compte.

Nous présentons successivement les systèmes particuliers instables, les caractères du très fort contrôle de la conception des systèmes à objet puis les systèmes multi-agents massifs. Nous proposons une méthode d'agentification incrémentielle avec apprentissage et un moyen de faire se contrôler le système par lui-même, dans le comportement de son organisation d'agents, par la définition d'un espace morphologique dont nous précisons à la fois les caractères et l'interprétation par agents. Nous présentons enfin la notion d'entropie pour un tel système et nous proposons une équation d'état exprimant le comportement et explicitant l'émergence dans un tel système.

LES SYSTEMES ET LE PROBLEME DU CONTROLE

Définissons d'abord, pour situer le problème, la notion de modèle, de modèle discret et équationnel et posons la notion de système complexe.

Modèles

On considère un certain phénomène, c'est-à-dire quelque chose que l'homme peut observer par ses sens dans son environnement, comme le déplacement d'un nuage, la fuite d'une proie, un arbre qui perd ses feuilles en automne, une transformation chimique .. Ces phénomènes sont considérés comme donnant lieu à des effets spatiaux par rapport à un arrière-plan et des transformations plus ou moins rapides dans la durée. Un phénomène sera la saisie, par l'observateur, d'une forme et d'une transformation :

1. il y a existence d'une spatialisation du phénomène, qui existe bien dans l'espace réel. Par exemple, un son perçu est une vibration physique de l'air ambiant.
2. il y a une durée du phénomène, qui va de l'instant comme la collision d'un photon avec un électron, à la durée la plus longue, comme le déploiement, par expansion, de l'univers.

Ce qui n'est pas un phénomène, dans ce que l'homme peut observer, sera un *effet*, c'est-à-dire un caractère instantané d'un certain phénomène, comme la couleur d'un arbre à un instant précis du temps, ou l'intensité d'un son à un instant donné de sa diffusion.

On dira que l'on modélise, au sens informatique du terme, le phénomène si on peut lui associer un système formel permettant de le décrire, avec plus ou moins de finesse, pendant des instants discrets de son évolution :

1. on définit la notion *d'état*, qui exprime les caractères du phénomène à tout instant t donné, à un certain niveau de description. Cet état est représenté par différentes entités informatiques, comme des variables, des structures de données, des objets, des processus, des agents ...
2. on définit des règles de changement d'état, permettant de représenter le changement des caractères dans les différents instants discrets du temps,

3. on décrit l'évolution du phénomène comme une succession rationnelle de changement d'états.

On a ainsi modélisé le phénomène si l'état courant et les changements d'états successifs sont adéquats, c'est-à-dire correspondent bien avec le phénomène réel observé. Toute la difficulté est alors dans la prise en compte et la représentation des bons caractères du phénomène.

Modèles discrets et modèles équationnels

La façon la plus simple de décrire un phénomène est de le représenter de la manière suivante [Thom 1968] :

1. on associe à chaque état du phénomène un système logique A_t , c'est-à-dire un ensemble de clauses constituant la description de l'état à un instant du phénomène,
2. on passe de l'état A_t à l'état A_{t+1} par une déduction, le système de clauses permettant naturellement d'obtenir l'état suivant de manière consistante.

On a ainsi une description du phénomène dans les termes d'une succession logique d'états. On peut alors représenter le phénomène par une équation générale :

$$\begin{aligned} X_0 &= A_0 \\ X_{t+1} &= g(X_t), \text{ pour tout entier } t \text{ positif ou négatif.} \end{aligned}$$

Il y a les conditions initiales et puis la règle d'évolution, fixée, qui décrit l'évolution du phénomène dans le temps. L'évolution du phénomène se décrit bien par la trajectoire de la fonction $g(X)$. Remarquons que cette description correspond tout à fait à l'évolution d'un programme contrôlé par des bouches.

Les physiciens utilisent systématiquement ce genre de modèle en portant l'état dans le continu ou d'ans un espace d'opérateurs, avec une équation non linéaire qui représente alors l'évolution des caractères du phénomène. Cette équation sera ensuite discrétisée par une méthode numérique adaptée. On obtient alors une équation, qui est généralement compliquée mais qui peut se simplifier pour être intégrée. Un tel modèle est dit *prédictif*, car on peut prédire l'état du phénomène à tout instant du temps (continu et discret, positif ou négatif) à partir de la seule connaissance de l'état initial et de l'équation.

Cette modélisation revient à considérer dans le phénomène des grandeurs immuables significatives qui seront transformées en variables prenant des valeurs dans R . C'est le cas de toutes les grandeurs physiques comme la température, la concentration d'une molécule dans une solution, la masse d'un corps ou sa vitesse. On caractérise le système par un ensemble de variables dont l'existence a un caractère de permanence et dont on précise les relations d'interrelations.

Modèles pour les phénomènes complexes

En fait, beaucoup de phénomènes étudiés aujourd'hui ne peuvent pas se ramener à cette forme équationnelle si favorable : il n'y a pas d'équation connue $g(X)$ permettant de décrire le phénomène ou bien celle-ci n'est pas soluble. De plus, les caractères de chaque état ne sont pas vraiment indépendants et ils changent dans la durée, ils ne sont pas permanents. Les conditions initiales sont vagues. Par exemple, il est impossible de définir finement le phénomène que constitue un organisme vivant et vieillissant par des équations et un état initial clair. Et pourtant le vivant, singulier et multiple, est un phénomène qui est très commun sur Terre.

Pour de tels systèmes, on doit prendre en considération des caractères organisationnels qui ont la propriété d'évoluer, de se transformer. C'est le cas par exemple du déploiement spatial d'une forêt, du

mouvement migratoire de populations, de la nervosité d'une foule qui manifeste ... Tous ces caractères sont des états organisationnels. Ils ne peuvent pas raisonnablement être décrits par des variables fixes : chaque arbre d'une forêt et ses descendants éventuels, les mouvement de chaque individu de la population dans la durée, l'état mental de chaque participant à la manifestation. Il reste alors à représenter plutôt ces caractères comme des organisations elles-mêmes, ce qu'ils sont dans la réalité du phénomène. Ces organisations seront représentées par des groupes actifs, communicants, en développement dans un espace dynamique. Ce seront des groupes d'agents définis à partir de certains générateurs.

On est alors, pour de tels phénomènes, définir un état par un certain nombre de caractères organisationnels appropriés que l'on considère comme insuffisants, en explicitant surtout leurs interrelations et leurs règles d'évolution les plus probables, et à faire évoluer les états par des transformations complexes, systématiquement locales. On s'est ainsi placé dans le domaine de la simulation informatique des phénomènes complexes au niveau organisationnel. L'évolution de la plupart des écosystèmes peut être représentée de cette façon, celle de la conscience artificielle également.

Ces systèmes sont fondés sur des entités informatiques qui sont des entités de haut niveau symbolique et cognitif, en fait des agents, qui sont implémentées sous forme de groupes d'objets instances de classes, qui sont calculées sous forme de processus sur des ordinateurs en grappes. Ils peuvent éventuellement être étudiés au niveau de leur comportement par une approche équationnelle. Cette étude est à faire et elle produira des connaissances sur les états stables de la dynamique de ces systèmes. Remarquons bien qu'on ne part pas des équations d'évolution pour modéliser le système, mais on part de sa forme calculable pour éventuellement en déduire une forme équationnelle pour le comportement. Notons également que la détermination de la forme calculable nécessite de disposer au préalable de très nombreuses connaissances, factuelles et comportementales.

Une telle approche présentera de plus l'avantage de disposer d'une mesure effective de la complexité combinatoire pour atteindre un certain état loin de l'état initial en la mesurant par une difficulté computationnelle réelle à calculer cet état à partir de l'état initial, par la complexité organisationnelle du système dans le calcul de cet état. Notons qu'une équation d'évolution a une forme immuable, c'est un signe au sens de Peirce, et qu'on ne peut lui attacher aucune notion de complexité organisationnelle.

La conception de tels systèmes est actuellement engagée dans divers travaux de recherche, et particulièrement dans le cadre des systèmes multi-agents massifs. Nous traiterons ici principalement la question du contrôle de ces systèmes, qui était jusqu'à maintenant un problème ouvert.

LES SYSTEMES PARTICULAIRES

Le premier exemple de système au comportement complexe sera pris dans la physique. Considérons un système clos formé d'un grand ensemble de particules. Chaque particule est une certaine entité matérielle élémentaire idéale. Elle est, dans le cadre de la mécanique classique, entièrement définie par sa position p et son moment $q = mv$ produit de sa masse par sa vitesse. La connaissance de la particule revient donc à celles de sa position et de son moment. Les équations du mouvement, c'est-à-dire les très classiques équations de Newton, donnent comme solution la position et le moment d'une particule à partir des conditions initiales et en tenant compte de la force à laquelle est soumise la particule. La notion centrale, en mécanique classique, est celle de

trajectoire qui définit la situation exacte de toute particule matérielle au cours du temps.

Dans les équations de calcul de trajectoire, la variable temps joue un rôle réversible. On peut ainsi prévoir la position et le moment de la particule à tout instant ultérieur et également antérieur du temps, en changeant t en $-t$. On peut donc déterminer l'état et le lieu où se trouve la particule à tout instant du futur ou du passé. On dit alors que le comportement de cette particule, donné par des équations dans lesquelles le temps est réversible, est *déterministe*.

Avec cette approche des systèmes particuliers basés sur les trajectoires, on va en fait s'intéresser à des états qui seront particulièrement stables : les états dits *d'équilibre* où les caractères du système ne changent pas même si certaines particules sont en mouvement. Pour le système, un état d'équilibre est un état qui est nécessairement atteint en partant de conditions initiales prises dans un certain domaine : si les conditions initiales changent un peu dans ce domaine, c'est toujours ce même état d'équilibre qui sera atteint. Cet état d'équilibre sera donc significatif du système. Ce cas est idéal et ne semble pas correspondre à la situation des systèmes vivants, ni même à celle des systèmes particuliers généraux.

L'espace permettant de représenter le comportement des particules physiques d'un système est l'espace des phases, dont les dimensions sont N fois les trois coordonnées classiques d'espace et une dimension définie par la quantité de mouvement, s'il y a N particules. On représente la trajectoire de l'ensemble des particules, c'est-à-dire du système, comme un point dans cet espace. Mais on peut aussi représenter dans l'espace des phases un ensemble de points dont chacun n'est plus la précision des trajectoires de toutes les particules à un instant donné, mais la probabilité de la densité des particules en ce point. On représente ainsi un nuage de points dont chacun est la probabilité de la densité de particules pour les coordonnées d'espace et de quantité de mouvement. C'est le modèle de Gibbs.

On obtient donc deux représentations de l'état des systèmes : l'une par les trajectoires individuelles des particules et l'autre par les probabilités que des particules se trouvent en un point de l'espace des phases. Et il a pu sembler évident, à une certaine époque, que ces deux représentations fournissaient la même description, qu'elles étaient en fait équivalentes. Ce n'est pas le cas pour tous les systèmes particuliers, car tous les systèmes ne peuvent pas être caractérisés comme stables.

Considérons en effet un système formé d'un grand ensemble de telles particules matérielles en sachant que celles-ci peuvent maintenant entrer en collision et que ces collisions sont *permanentes*. Ces collisions ne sont pas temporaires, mais elles caractérisent le fonctionnement du système. Les trajectoires des particules ne sont alors plus indépendantes et le problème, au regard du nombre important de particules, devient complexe car on ne peut plus mathématiquement résoudre les équations de trajectoire !

Les systèmes instables

En fait si le système est composé de particules en interaction, il est *impossible* de déterminer son comportement global à partir des seules trajectoires de ses particules. Dans le cas de particules en interaction, c'est-à-dire dont les mouvements sont corrélés, H. Poincaré a montré [Poincaré 1893] que les équations du mouvement ne sont plus intégrables, qu'elles ne peuvent pas produire de solution. Ce résultat, clairement négatif, a longtemps été ignoré car il pose un problème de fond : il est impossible de s'appuyer sur la notion de trajectoire individuelle pour décrire le comportement d'un système composé de nombreuses particules en interaction permanente (en fait plus de deux particules).

Les systèmes composés de particules en interactions permanentes sont catégorisés comme des systèmes *instables* [Prigogine 1996]. Il ne restera alors, pour définir et prédire l'état de tels systèmes, que la description probabiliste du comportement de l'ensemble des particules dans l'espace des phases, en utilisant des modèles avec des opérateurs appropriés.

Mais la distinction entre le comportement déterministe fourni par les trajectoires individuelles des particules et le comportement probabiliste au niveau global va plus loin. Ilya Prigogine [Prigogine ref. citée] a montré que pour les systèmes formés de nombreuses particules en interaction, la description probabiliste produit des états que la notion de trajectoire individuelle ne peut pas fournir. La description probabiliste, par son caractère global, contient une information additionnelle que la notion de trajectoire individuelle ne contient pas. Il a en fait montré qu'il n'y avait plus, pour les systèmes instables, équivalence entre les deux descriptions, celle individuelle basée sur les trajectoires et celle globale basée sur les probabilités, et que seule la description probabiliste permettait de représenter le caractère non déterministe du comportement de ce type de systèmes.

En fait, les systèmes instables ont un comportement qui tient compte de la flèche du temps : le temps, pour leur fonctionnement, est orienté vers le futur, il ne peut plus être considéré comme réversible et leur comportement ne peut plus être décrit par des équations dans lesquelles le temps joue un rôle symétrique.

Les systèmes instables, qui sont en fait très courants dans la réalité, ont un comportement particulier. Pour un système stable, toute fluctuation peut être considérée comme accidentelle et peu significative quant à son comportement, car le système revient rapidement et nécessairement, après un certain nombre d'oscillations, à son état d'équilibre. Le comportement et le contrôle des systèmes instables est tout à fait différent. Les fluctuations ne sont pas accidentelles, mais jouent un rôle central et tout état de stabilisation, qui est nécessairement fragile, dépend très fortement de ces fluctuations. L'état du système ne peut être prévu à partir des seules conditions initiales et il est nécessaire de tenir compte à la fois des fluctuations initiales qui l'ont déstabilisé, et de l'état organisé de celui-ci, de l'état de ses entités en interrelation et de leurs capacités de communication. Pour un système physique composé de particules en

interaction, le comportement ne sera plus déterminé par les équations individuelles des particules mais par d'autres équations dans l'espace des phases, globales et définies seulement en probabilité : le comportement n'est plus totalement contrôlable. Le problème de la prédiction de l'état futur du système est alors beaucoup plus complexe.

Les opérateurs de détermination de comportement d'un système instable

Les classiques équations du mouvement précisent les trajectoires des particules en définissant vitesses et accélérations et en reliant la force à l'accélération. La valeur centrale de cette formulation est alors l'Hamiltonien $H(p,q)$ qui représente l'énergie du système, dépendant des positions des particules notées q , et de leurs moments notés p .

Selon H. Poincaré [Poincaré op. cité], les systèmes dynamiques s'expriment avec un Hamiltonien étendu :

$$H = H_0(p) + \lambda \cdot V(q)$$

où $H_0(p)$ est un Hamiltonien bien intégrable décrivant l'énergie cinétique du système et $\lambda \cdot V(q)$ est un terme qui représente l'énergie potentielle et les interactions entre les particules.

Il a montré que les interactions ne pouvaient en général pas être enlevées des équations par changement de variables et que le système était alors non intégrable : il devenait impossible de calculer les trajectoires des particules. Cette non intégrabilité est due aux résonances entre les particules. Tout degré de liberté s'exprime mathématiquement par une fréquence. Chaque point de l'espace des phases est caractérisé par une combinaison linéaire des fréquences, qui s'annule pour certaines valeurs de ces fréquences. Le calcul des trajectoires place cette combinaison linéaire comme dénominateur dans les équations et on obtient ainsi des points dits de résonance, où la trajectoire n'est pas définie car des termes deviennent infinis : le système dynamique est alors non intégrable. Toute interaction génère des corrélations qui se développent par transitivité, avec d'autres particules, en créant des couplages et en entraînant un flux de corrélations. Ces couplages complexes, mettant ainsi en jeu de nombreuses particules, sont instables, car ils se modifient par association et transformation de couplages locaux. Le système a alors un comportement fluctuant, avec des variations d'organisation correspondant à de nombreuses bifurcations dans son état global et dues aux modifications des couplages.

La description classique représente les caractères des particules par des variables : la connaissance des particules revient à poser des équations sur des variables dont les valeurs représentent directement les états observables. C'est une vision simple et simplificatrice de la réalité. Il s'avère en fait nécessaire de médiatiser cette posture d'interprétation directe en introduisant la notion d'opérateur. Un opérateur exprime le

comportement d'un système à partir d'un certain changement d'état. Certaines de ses valeurs appelées valeurs propres correspondent aux caractères effectivement observés.

L'approche statistique du comportement d'un système particulière consiste à poser une distribution de probabilité sur le système entier $\rho(p, q, t)$ tenant compte des états probables de toutes les particules qui le composent. L'opérateur d'évolution du comportement du système est l'opérateur de Liouville et l'équation d'évolution du système est alors :



dite équation de Liouville et dont la solution formelle est $\rho(t) = \rho_0 e^{(-iL)t}$. La notion de trajectoire n'est alors plus primitive mais déduite de la solution de l'équation de transformation utilisant cet opérateur.

Il s'agit d'un opérateur dit hermitique, c'est-à-dire fournissant des valeurs propres réelles dans l'espace de Hilbert où il prend ses solutions. Cette formulation produit donc un comportement déterministe pour le système et I. Prigogine a proposé [in Prigogine op. citée], en étendant l'espace de Hilbert, d'associer à chaque valeur propre un terme oscillant complexe de la forme :

$$L_n = \omega_n - i \gamma_n$$

permettant de rompre la symétrie temporelle de l'évolution du système. Ainsi, pour $t > 0$ (futur) la contribution de la probabilité diminue alors que pour $t < 0$ (passé) elle augmente : la connaissance du passé est plus grande que celle de l'avenir.

I. Prigogine a développé un modèle basé sur le couplage persistant des particules et non plus sur leurs trajectoires et a défini une représentation probabiliste des systèmes loin de l'équilibre, une dynamique intégrant la thermodynamique pour les systèmes instables. Il a introduit une approche par opérateurs en mécanique classique, comme c'est le cas en mécanique quantique. Rappelons que la mécanique quantique est basée sur la notion de fonction d'onde associée aux particules et sur l'absence de notion de trajectoire.

Les systèmes instables semblent en fait s'auto-organiser à partir de bifurcations multiples définissant des changements d'ordre dans leur organisation. Leur comportement passe par de multiples bifurcations montrant une césure soit spatiale, soit temporelle, dans leur évolution comportementale. Leur comportement n'est pas prédictible avec certitude et le but aujourd'hui, bien après Newton, ne peut être de prétendre à cette maîtrise illusoire.

Cette capacité d'auto-organisation est très exactement celle qui va caractériser les organisations d'agents massives. La voie d'étude du comportement de ces organisations ne peut pas être celle, très classique et très idéale, des systèmes informatiques dont le comportement est entièrement spécifié à l'avance, dans des variables, et qui résolvent des problèmes très précis dont on valide, toujours à l'avance, l'atteinte des solutions.

On a donc affaire aujourd'hui à deux types de systèmes informatiques :

1. les systèmes au comportement très régulier, qui résolvent très exactement des problèmes bien posés à l'avance,
2. des systèmes instables, qui s'auto-organisent par rapport aux stimuli environnementaux et qui règlent leur comportement par le contrôle interne de leur organisation.

Rappelons que l'instabilité ne conduit pas nécessairement à un comportement chaotique, pour tout système et en particulier pour un système informatique. C'est un comportement où le système s'adapte de certaines façons aux stimuli environnementaux, par ses transformations et par les mouvements de ses composants. C'est tout à fait ce qui est recherché en robotique autonome sociale par exemple.

Mais il reste à trouver le moyen de définir et contrôler le comportement global de tels systèmes informatiques. Si l'approche objet permet un contrôle total, elle ne permet de réaliser que des systèmes au comportement régulier. Il sera donc nécessaire de trouver un nouveau moyen pour le contrôle des systèmes multi-agents massifs.

L'APPROCHE OBJET : UN PROCESSUS TRES CONTROLE DE CONSTRUCTION D'UN SYSTEME

On peut considérer qu'il y a trois voies pour construire un système :

3. la voie fonctionnelle considère le système comme composé de fonctions, et donc de variables, en interaction. Il s'agit de trouver ces fonctions, de les représenter et de les mettre en relation,
4. la voie de l'objet qui considère le système comme composé d'objets encapsulant données et comportement. Il s'agit de trouver ces objets, qui seront permanents et de décrire leurs relations (leurs liens), qui seront fixées. Les objets s'activent alors automatiquement, par envois de messages qui déclenchent des méthodes,
5. la troisième voie sera celle de l'agent par laquelle on considère le système comme composé de nombreux agents autonomes opérant sur un monde d'entités qui ne sont pas des agents mais des objets du substrat et dont le comportement coopératif, négocié, évolutif et les actions communes permettent de doter le comportement du système de caractères d'autonomie et d'adaptativité.

Il s'agit en fait de trois étapes successives dans l'histoire de la construction des systèmes.

L'approche objet et le Génie Logiciel

L'approche la plus commune aujourd'hui pour construire un logiciel complexe que l'on veut entièrement contrôler, de sa conception à son exploitation, est l'approche objet. C'est une démarche de construction conduisant des spécifications du système à sa réalisation et à sa validation. On y précise les entités de base permanentes, les objets, et le système en sera l'agrégation. Il assurera leur mise en communication précise, bien réglée et bien synchronisée. Notons bien que nous ne considérons pas des objets actifs, c'est-à-dire des objets mobiles associés à des processus.

Cette approche n'est pas neutre. Elle se situe dans le cadre particulier de la résolution de problèmes bien posés et elle place la description architecturale du système à un niveau de granularité assez bas, très près de l'opérationnalité, qui évite systématiquement de traiter les systèmes non simplement décomposables, comme le sont par exemple les systèmes adaptatifs [Cardon 2000].

Le centre d'intérêt du Génie Logiciel se situe dans la programmation à grande échelle [Booch 1994]. Le but est clairement de rationaliser les développements d'applications conduisant à des codes de très grande taille réalisés par des équipes bien hiérarchisées. La façon de concevoir le système sera concordante avec les caractères du système produit : rationalité et contrôle. A partir d'un problème bien posé, mais considéré comme très compliqué car sa solution se ramène à la mise en relation de très nombreux éléments, on entame une démarche de conception en s'appuyant sur la définition de chaque objet, l'ensemble composant le système par agrégations simples [Cardon - Dabancourt 2001].

Le Génie Logiciel, dans l'approche objet, permet de définir clairement, dans une étape d'analyse, les éléments du système et leurs relations, pour pouvoir développer aisément plus tard, dans l'étape de codage, les programmes et sous-programmes en se référant toujours à ces éléments structurels parfaitement définis et permanents et dont les relations ont été bien précisées une fois pour toutes. En fait, les communications entre les objets, les envois de messages déclenchant l'activation des méthodes, sont réglés à l'avance et le graphe des communications entre les classes est fixé : les classes définies et les objets instanciés, le système ne peut que répondre aux messages et activer ses méthodes, selon un ordre prédéfini de séquençement que les diagrammes dynamiques ont bien réglé.

Objets et conception objet des systèmes

Le concept de base, et qui sera gardé de façon permanente tout au long des différentes phases de réalisation d'un système dans l'approche objet, 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 [Rumbaught 1997].

Un objet est donc une entité qui existe dans le temps et l'espace du système informatique en se comportant de façon essentiellement réactive. Sa réaction aux sollicitations qu'il reconnaît est fixée, et il se comporte de manière contractuelle [Meyer 1987]. C'est un élément de conception, de programmation et d'action répondant avec justesse et fiabilité à des sollicitations prévues à l'avance.

Objet [Rumbaught op. cité]

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. C'est donc une entité qui a une identité permanente, un état et un comportement, à la fois précis et stables.

L'objet a un double rôle : d'une part il doit *représenter* comme un signe représente quelque chose à propos du réel ou du système en construction [Peirce 1984], et d'autre part il doit permettre la réalisation commode, c'est-à-dire la conception et le codage, en s'insérant dans les bons modules. Ce double rôle est très ambitieux, car il revient à unifier par une seule catégorie d'entités totalement définies à la fois la chose abstraite ayant la fonction organisationnelle de base dans le système, et également l'entité très concrète et opérationnelle qui sera l'élément du système programmé. L'enjeu est de passer de la première de ces catégories, le concept énoncé, à l'autre, l'objet, le plus raisonnablement et naturellement possible, en contrôlant rationnellement les démarches des équipes qui conçoivent et réalisent ensemble le système.

L'objet est perçu, dans le système composé d'objets, comme une entité particulière multiface dont la trajectoire est totalement définie : son comportement est fixé. Le comportement du système est alors facilement exprimable : il est donné par l'ensemble des comportements de tous les objets que l'on peut considérer un à un. Et cela s'explique à l'avance dans les célèbres diagrammes de classes, de déploiement et dynamiques de la méthode UML [Muller 1997].

Un système objet est un exemple de système dont le rôle général est permanent, dont la fonction est bien définie et ne change pas. De tels systèmes sont appelés des *systèmes fermés*. La notion de fermeture signifie qu'ils sont définis pour jouer un rôle permanent et que leurs interactions avec l'environnement ne modifie pas ce rôle mais au contraire le réalise. Son comportement est donc bien prévisible et suit ses interactions avec son environnement.

Système fermé

C'est un système dont l'architecture est globalement stable, dont le rôle est permanent et défini à la construction, dont le fonctionnement ne modifie ni ce rôle ni son architecture et dont l'état est prévisible à l'avance.

Remarquons bien que la notion de fermeture ne signifie pas l'absence de communication entre système et environnement. Elle précise simplement que le système est distinct de son environnement et qu'il échange avec ce dernier des informations ou de la matière qui sont d'une autre nature que ses propres

constituants. Ces constituants en seront informés et se mettront en action de manière fonctionnelle, en développant leur rôle.

Les limites de l'approche objet

La démarche de modélisation objet se fonde sur des propriétés fortes des systèmes que l'on construit : ces systèmes doivent être fonctionnellement bien décomposables et leur comportement doit être régulier. Ce sont avec ces propriétés que l'on détermine les composants de base du système, les objets, pour que leurs agrégations bien pensées constituent l'organisation du système global. On peut aussi, inversement, considérer d'abord le système global dont la décomposition fonctionnelle va permettre de trouver en fin de compte les objets de base. Dans les deux cas le système est la somme compositionnelle de ses éléments de base, en ce qui concerne à la fois sa structure et surtout son comportement.

Le comportement du système objet est le résultat de l'agencement totalement maîtrisé des comportements des parties (les paquetages), des sous-parties (les familles d'objets), en allant jusqu'à la maîtrise des objets. Un tel comportement est donc typiquement déterministe en ce sens qu'il produit en fonctionnant ce qu'on sait qu'il doit produire et qui a été fixé lors de sa conception.

Il est clair que cette perspective de construction hérite de la démarche technicienne de réalisation des systèmes fonctionnels et notamment de la systémique à la Forrester [Thiel 1998]. Elle est parfaitement opérante pour réaliser des systèmes aux caractères fonctionnels très précis, comme par exemple les systèmes de contrôle temps réel de matériels embarqués ou les systèmes de calcul de trajectoires et de pilotage d'engins. La puissance du paradigme objet est, dans ces domaines, indéniable.

Mais les objet deviennent des objets actifs et se libèrent de leur structurations rigides [Wooldridge – Jennings 1994], [Guessoum – Briot 1999], ce qui pose de tout autres problèmes de cohérence et de consistance dans les systèmes. On distingue le niveau conceptuel représentant le comportement de celui du codage effectif, où les entités sont différentes. La voie de l'agent se rapproche.

SYSTEMES MULTI-AGENTS MASSIFS

On s'intéresse aujourd'hui à certains systèmes qui ont des comportements non réguliers, qui doivent développer des actions originales, voire créatrices comme des robots autonomes. Les perspectives posées par l'Intelligence Artificielle Située [Steels & al. 1995] et la nouvelle Intelligence Artificielle [Meyer 1996] ne sont plus celles définies pour les systèmes réguliers, stables, dont le comportement est précisé de manière définitive lors de la conception. De tels systèmes ne sont pas des solveurs habiles de

problèmes pour une classe précise et fermée. Ce sont des systèmes qui doivent s'adapter à des environnements très variés grâce à leurs capacités de modifications structurelles et d'actions multiples originales. Ces capacités de modifications et d'action résulteront principalement de l'aptitude auto-organisatrice de leur structure interne.

Cela signifie que l'organisation des composants constituant un système de ce type est capable de reconformations assez profondes et que le système fonctionne selon un mode de clôture opérationnelle de système autopoïétique [Varela 1989]. En cela, l'organisation de ses composants ne peut être ni stable ni régulière et la recherche de liens permanents et définitivement fixés entre eux ne sera que très locale et très temporaire. La structure des composants sera seulement génératrice du comportement du système et, de plus, le système sera un peu plus que la somme de ses composants définis lors de la construction [Morin 1986].

La modélisation de tels systèmes n'entre alors plus tout à fait dans le cadre, devenu trop étroit, de l'analyse et de la conception par objet : leur niveau d'analyse et de conception se situe au-dessus de celui des objets, qui sont et restent des entités proches du codage. Il sera nécessaire d'opérer une conception au niveau comportemental, permettant la variabilité, la transformation des composants et de leurs relations, permettant surtout de mettre le système en situation d'action dans son environnement par l'émergence d'un état interne adapté à la situation courante.

Nous fonderons l'architecture de ces systèmes sur la notion d'agent et ceci dans une optique strictement multi-agent.

Les agents

Il y a, en Informatique, deux façons de voir les agents [Wooldridge - Jennings 1994]. La façon caractérisée comme "faible" considère l'agent comme une entité logicielle ou matérielle qui est :

1. autonome,
2. qui a des aptitudes sociales,
3. qui est réactive et proactive, c'est-à-dire qui est capable de redéfinir ses buts et de prendre des initiatives et de s'activer sans sollicitation externe.

L'autonomie revient à considérer l'agent comme un processus, ou un processus léger, c'est-à-dire comme une entité capable d'exécuter un ensemble d'instructions sur un processeur. Les aptitudes sociales reviennent à introduire dans son comportement la notion de complémentarité nécessaire, par participation au plan plus global d'un groupe d'agents. L'usage de ce type d'agent léger entraîne donc nécessairement l'existence de groupes d'agents, avec réalisation de buts communs. La notion de proactivité est fondamentale et revient à introduire dans l'agent la notion d'intention et de modification de ses propres buts, ce qui est une mise à la distance essentielle par rapport au comportement automatique message - méthode des objets. Ainsi caractérisé, l'agent est une entité qui étend et enrichit comportementalement la notion d'objet et d'objet actif.

La seconde façon de considérer les agents, caractérisée comme "forte", considère que l'agent a, en plus des trois caractères précédents, des formes mentales parentes de

celles des humains, comme des connaissances évaluables, des croyances, des intentions et même des émotions. C'est une approche qui tente de représenter des entités aux comportements possédant une certaine "conscience propre". L'agent est alors lui-même un système très complexe et la notion de système multi-agent se fondant sur de tels agents est, aujourd'hui encore, très difficile à réaliser informatiquement [Rao - Georgeff 1991]. Nous ne suivrons pas cette voie.

La définition d'un agent la plus communément admise, en France, et qui est très générale, est celle donnée par J. Ferber [Ferber 1995] :

Agent

"On appelle agent une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents".

Cette définition pose la notion d'agent comme une entité d'action définie à la construction d'un système et opérant dans le cadre d'un problème ouvert à résoudre.

Dans tous les cas, la structure d'un agent sera celle reproduite dans la figure 1 ci-dessous, avec des parties plus ou moins développées selon les cas :

4. module de connaissances,
5. module de communication,
6. module de comportement,
7. module d'action.

Remarquons que le comportement d'un agent est généralement donné par un automate ou un Augmented Transition Network [Thorne & al. 1968], [Bobrow - Fraser 1968] et qu'il est donc strictement rationnel et déterministe.

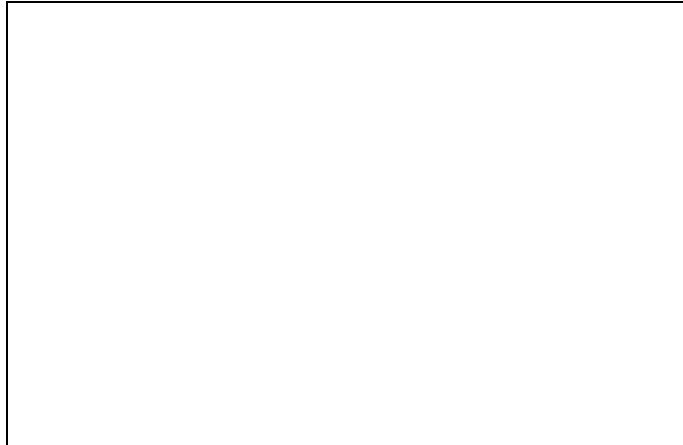


Figure 1. Structure générale d'un agent

Un *Système Multi-Agent* (SMA) est constitué d'un ensemble d'agents ou d'organisations d'agents et est situé dans un environnement composé d'objets qui ne sont pas les agents du système mais les choses du monde des agents. Ce système communique avec son environnement par l'action d'agents spécifiques dits agents d'interface. Les agents du système appréhendent les objets de leur monde ainsi que les actions des autres agents, réalisent des actions diverses et unissent leurs actions pour définir des comportements collectifs.

Le comportement effectif, visible, du SMA sera essentiellement réalisé par le comportement des agents et sera donc construit et produit de manière distribuée. Ce sont dans les agents, et essentiellement dans les agents, que seront distribués les caractères d'action du système, les effets qu'il produira sur son environnement.

L'indéterminisme et l'instabilité dans un système multi-agent massif

Il existe différentes méthodes pour construire une organisation d'agents. La plupart sont inspirées de la manière dont on construit un système réalisant toutes ses fonctionnalités posées *a priori*, comme dans le cadre du Génie Logiciel par objet où les fonctionnalités sont toutes introduites lors de l'analyse. Le système multi-agent est alors essentiellement architecturé pour satisfaire le mieux possible à ces fonctionnalités, en associant à chaque agent certaines fonctions élémentaires à réaliser. Les fonctionnalités du système sont la bonne composition de ces fonctions élémentaires.

Nous choisirons, quant à nous, une granularité à la fois plus fine en ce qui concerne les fonctionnalités et typiquement plurivoque, c'est-à-dire basée sur la redondance et la pluralité des caractères. Nous poserons que le système se conçoit en distribuant les fonctionnalités dans des ensembles d'agents globalement peu stables et non consistants : à chaque fonctionnalité précise on associe *des* groupes d'agents dont les

actions coopératives devront permettre de réaliser la fonction concernée, mais aussi son contraire, son inverse, son opposé, des fonctions proches ou similaires Ce procédé d'agentification conduit à une redondance certaine et à une grande diversité en ce qui concerne les aptitudes des agents, ce qui sera nécessaire pour permettre un comportement organisationnellement complexe et faire opérer le système strictement par émergence. Les groupes d'agents ne seront en rien fonctionnels, mais plutôt polyvalents, voire ambigus et ce seront par les communications entre agents que des groupes pourront émerger, en réifiant certaines fonctions plutôt que d'autres.

Un tel système multi-agent est donc vu comme un collectif d'agents qui a des caractères sociaux d'agrégation, de regroupement et de restructuration très forts. On pourra distinguer deux parties dans le système:

3. une partie interface composée d'agents communiquant avec l'environnement, prenant en charge l'entrée des informations venant de l'extérieur et gérant les actions sur l'environnement,
4. une partie interne avec des agents prenant des informations sur les objets de leur monde et échangeant des messages entre eux

Ces deux organisations sont nécessairement interactives et l'organisation globale, par les communications entre agents, possède des processus intégrateurs permettant la coopération et l'émergence de groupes significatifs.

Un robot sera conçu comme un SMA, une entité physique d'une société telle une fourmi sera représentée par un SMA ... Nous utilisons l'agent dans une approche strictement conceptuelle, comme composant très particulier d'un système, ce système représentant généralement un organisme existant ou simulé.

Nous posons qu'un tel système multi-agent n'aura pas un comportement déterministe. A chaque stimulus venant de l'environnement, *des* agents seront activés en filtrant ces entrées. Comme les agents sont construits de manière plurivoque, des agents semblables, proches, similaires, opposés, contraires ... seront activés pour une même entrée. Ces agents en activeront d'autres, par leurs communications, transitivement.

Tous ces agents activés, qui sont proactifs, sont des processus, ou au moins des processus légers. Ces processus auront en général une même priorité ou une priorité se répartissant dans peu de groupes de priorité. Le "scheduler" du système informatique ne pourra pas ordonner ces processus et devra choisir au hasard celui qui sera activé (dans le cas d'une machine mono-processeur). L'accès aux variables partagées, dans le cas de processus concurrents sur système distribué, subira l'exclusion en section critique ce qui conduira à satisfaire certains processus pris au hasard plutôt que d'autres, c'est-à-dire en fin de compte à activer certains agents plutôt que d'autres.

Or les activations des agents ne sont absolument pas commutatives. Elles sont contextuelles et chacune dépend des activations antérieures des agents de ses accointances. Il en résultera un fonctionnement du système, par pas d'exécution des

processus, qui ne sera pas réversible au sens informatique du terme, par les tirages au hasard de certaines options de traitement (processus choisis et accès aux variables partagées) et qui engendrera des états globaux subissant des bifurcations. Certains états de l'organisation d'agents, tout en résolvant éventuellement le problème du "dead-lock" des activations et des communications, seront très différents selon qu'une séquence d'action entre agents sera opérée avant ou après l'activité d'un certain agent.

On pourra aussi constater que pour certains stimuli très proches au niveau des informations qu'ils expriment, les comportements du système, après un certain nombre de pas de fonctionnement, seront différents : des entrées proches conduisent donc à des états éloignés. Le fonctionnement d'un tel système est alors non déterministe, sensible aux conditions initiales : il s'agit donc d'un système typiquement instable.

Nous proposerons un moyen de réduire cette instabilité, en rendant le système auto-adaptatif, par analogie avec les systèmes vivants.

Une méthode d'agentification spécifique pour les systèmes multi-agents massifs

Dans l'étape de conception d'un système multi-agent, il est nécessaire de définir d'abord les catégories de base auxquelles appartiendront les agents, pour que le système ait certaines fonctionnalités précises. Il est donc nécessaire de définir *a priori* les catégories permettant d'obtenir les caractères sur lesquels les agents pourront opérer, c'est-à-dire le monde où ils se déploient. Il est également nécessaire de préciser la limite du système, ce qui le distingue de son environnement en lui assurant la connaissance et la perception éventuelle de cet environnement. Enfin, il faut définir les moyens d'actions et les comportements possibles du système, ses fonctionnalités opératoires selon différentes situations. Nous posons que ces catégories existent sous la forme d'ontologies, de systèmes de connaissances avec renvois multiples, et qu'il sera possible de les considérer par leurs traits minimaux, sans avoir recours à des formulations complexes comme les règles ou les méta-règles des Systèmes à Base de Connaissances [Pitrat 1993].

Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de construire le système multi-agent massif à partir d'une organisation d'agents initiale dite *génératrice*, peu spécialisée, conçue de façon très redondante et plurivoque, en utilisant certaines catégories essentielles et en tenant compte systématiquement des caractères opposés et des déclinaisons des catégories. On fera l'hypothèse que de très nombreuses connaissances préalables sont disponibles sur le phénomène à représenter, comme des ontologies, des statistiques et de l'analyse des données. Il est clair qu'un tel système multi-agent est adapté au traitement de problèmes pour lesquels il existe de nombreuses catégories en définissant les caractères, les particularités de fonctionnement, et ceci pour en permettre le traitement sous forme dynamique. Ces catégories ne seront pas réductibles à une unique ontologie hiérarchique, sinon le problème pourrait être très bien traité en suivant d'autres voies plus classiques et qui ont fait leurs preuves.

Classe des problèmes massivement agentifiables

Les systèmes pour lesquels une conception par agentification massive est adéquate sont ceux se fondant sur des ontologies telles que la détermination de tout concept donne lieu à des renvois multiples conduisant, à partir de chacun, au tout, et pour lesquels tout comportement global peut être apprécié seulement par certaines projections de l'ensemble des renvois conceptuels de l'ontologie appelées émergences.

Il s'agit bien de systèmes complexes au sens organisationnel, que l'on ne maîtrise pas à tous les niveaux et dont le comportement se décrit seulement partiellement. Ainsi, les systèmes classiques que l'utilisateur souhaite entièrement contrôler ne sont pas dans cette classe.

De nombreuses méthodes d'agentification [Demazeau - Muller 1991], [Ferber - Gutknecht 1998], [Drogoul - Collinot 1998] distinguent trois niveaux d'abstraction dans un système multi-agent :

1. le niveau des agents individuels,
2. le niveau des interactions entre les agents,
3. le niveau de l'organisation du système.

Le système est construit à partir de ces trois niveaux, en les réifiant dans les agents eux-mêmes et en s'appuyant sur la notion de *rôle*. Un agent a ainsi trois rôles :

1. le rôle fonctionnel de chaque agent,
2. son rôle relationnel,
3. son rôle organisationnel.

Le système distribue ces trois rôles dans l'activité des agents, qui les tiennent selon leurs actions et après négociation avec leurs accointances, et qui définissent ainsi des groupes dans lesquels les agents ont des rôles complémentaires, bien structurés et cohérents.

Nous proposons une approche différente. Initialement, chaque entité fonctionnellement active dans le système et considérée à un niveau de grain très fin (entité fonctionnelle pour des robots, entité fonctionnelle pour un écosystème, entité sémantique pour un système de compréhension de la langue ...) sera un agent. On peut donc dire, à la suite de la position de G. Booch [Booch 1994] qui déclarait que pour concevoir un système à objet on doit considérer que toute chose reconnue est *a priori* un objet, que toute chose de caractère fonctionnel et actif dans le système à construire est *a priori* un agent, peu spécialisé et pouvant éventuellement le devenir. Ce qui ne sera pas fonctionnel, évolutif, autonome, sera un objet du monde des agents. En se référant à des fonctionnalités de grain très fin, on obtiendra ainsi beaucoup d'agents, mais de complexité structurelle faible. Nous les appellerons des **agents fondamentaux**.

Les rôles que ces agents pourront tenir, par rapport à leurs fonctionnalités, seront catégorisés et seront systématiquement représentés par des agents spécifiques (rôle de défenseur pour un système d'agents footballeurs, rôle de fuite pour un robot autonome, rôle de prédateur pour un agent réifiant un organisme vivant dans un écosystème ...). Ces agents devront communiquer entre eux, s'engendrer, s'annihiler et aussi communiquer avec les agents fondamentaux et s'associer à ces derniers pour former des groupes comportementaux significatifs. Nous les appellerons des **agents rôles**.

Les groupes comportementaux seront, dans l'organisation et par le fait de son fonctionnement même, la réunion physique d'agents fondamentaux environnés de nombreux agents rôles. Ces groupes se formeront par la collaboration, la communication et la concordance d'actions d'agents fondamentaux initialement indéterminées, très peu déterminées ou mal déterminées, sur lesquels des agents rôles ont opéré des investissements, en les déterminant, en leur donnant un sens opérationnel. Cette approche est donc parente avec les notions de flux de prégnance investissant des saillances dans la théorie de la morphogenèse de R. Thom [Thom 1972], [Cardon 2000]. Les agents rôles seront de spécificité soit locale (liés à un certain type d'agent fondamental), soit groupale (action de détermination sur des groupes d'agents), soit enfin organisationnelle (action d'agrégation et de cohésion au niveau de l'agrégation des différents groupes).

Dans la conception, à tout agent fondamental ou de rôle correspondant à un trait d'une certaine catégorie, nous associerons, liés par leurs accointances, *des* agents réifiant des catégories contraires, opposées, duales, similaires, proches ... Il sera possible de définir des proximités floues entre les catégories et donc des écarts flous entre les agents (opérant au niveau du comportement social), quant aux traits qu'ils réifient [Cardon - Durand 1998].

Nous obtenons ainsi un système comprenant de très nombreux agents, c'est-à-dire un système massivement agentifié, où l'ensemble des agents présente de très larges possibilités comportementales. Un tel système est donc opposé à un système fonctionnel dans lequel les rôles sont attribués strictement à la construction : ici, ils doivent s'investir, se transformer, se grouper pour finalement produire le comportement du système. L'avantage de cette agentification, dans laquelle les rôles sont réifiés comme agents, est double :

1. le comportement de tout agent fondamental jouant un rôle actif est explicitement, c'est-à-dire de manière visible, enveloppé d'une agrégation d'agents rôles qui ont investi son comportement, par luttes et négociations entre eux. Et ces rôles, réifiés par de multiples agents dont les états d'activités sont variables, représentent toujours *des* tendances fonctionnelles, avec des dominances, des contradictions, des lignes de force, une non-uniformité systématique, et surtout pas des fonctionnalités rigides.
2. les groupes d'agents fondamentaux sont formés à partir des intersections des amas "agent fondamental – agents rôles", c'est-à-dire avec des agents rôles communs, assurant concrètement l'agrégation. La notion de groupes d'agents est ainsi concrète et exprimée par des amas d'agents coopérant et communicant ensemble. Ces amas sont à la fois des agents fondamentaux et leurs multiples agents rôles.

Nous allons développer le système de façon *incrémentielle* et surtout non fonctionnelle, à partir de cette agentification initiale. Il s'agit d'augmenter le système alors qu'il fonctionne ou a fonctionné et a ainsi modifié son ou ses organisations d'agents. Cela conduit à une méthodologie de construction inspirée de celle proposée par J.P. Muller, dans un autre domaine [Muller 1998].

Cette organisation génératrice possède la propriété d'engendrer le comportement du système de façon minimale, partiellement fonctionnelle, plurivoque quant à son comportement et sommaire. Ces propriétés minimales sont, par exemple, pour le système comportemental d'un robot autonome [Dorigo - Colombetti 1998] :

1. appréhension spatiale et temporelle de l'espace environnant : simple vision de codes-barres, plans de circulation réduits, temps GMT,
2. besoin de recharger son énergie : simplement savoir aller à la station de recharge quand il le faut par un chemin fixe et guidé,
3. capacité à distinguer et à identifier des traits dans l'environnement : simplement analyser les traits verticaux et horizontaux définissant des zones de teintes différentes de l'arrière-plan,
4. capacité à mémoriser des faits relatifs à des phénomènes de l'environnement : capacité de mémorisation de scènes simples, sous forme de scénarios linéaires,
5. besoin d'action et de communication : tendances fondamentales élémentaires pour agir, se mouvoir de manière cohérente [Cardon – Guessoum 2000],
6. capacité à raisonner sur des représentations et à reconstruire ces représentations : aptitude à inférer sur des connaissances élémentaires et des scénarios linéaires.

Toutes les catégories retenues, sous leur forme d'ensembles de traits associés entre eux et en tenant compte des caractères fondamentaux et des rôles fonctionnels possibles avec une métrique pour estimer les écarts, sont agentifiées dans une ou des organisations initiales d'agents. On va s'efforcer ensuite de les augmenter par un processus d'agentification incrémentiel.

Les étapes de la construction du système sont les suivantes :

1 - Définition des catégories déterminantes C_d d'un système idéal de référence, par exemple le système de représentation intentionnel de l'environnement d'un robot autonome capable d'actes sociaux. L'ensemble C_d est combinatoirement complexe et n'est pas constructible élément par élément. Les catégories précisent à la fois les entités neutres, les constituants fonctionnels et les rôles qu'ils peuvent tenir, localement, en groupe, et organisationnellement.

2 - Définition d'une famille initiale F_i de catégories, correspondant à certaines des catégories précédentes, avec F_i strictement inclus dans C_d : on décide de construire le système à partir d'une réduction raisonnable de C_d . F_i est bien constructible alors que C_d ne l'est pas.

Mise en place de l'organisation d'agents initiale O_A correspondant à F_i , avec une première organisation d'agents réifiant les catégories de F_i . A chaque trait de la catégorie pris en compte, on fait correspondre un ensemble d'agents (agent fondamental et ses agents rôles associés) filtrant le trait, ses variations (interprétations), les catégories duales, contraires, opposées proches sémantiquement ... On introduit donc des degrés de liberté maximaux dans le système. On définit ainsi une première organisation réifiant tout à la fois les objets du domaine (ce qui n'est pas agent mais ressource ou chose), des agents fondamentaux et des agents rôles.

3 - L'organisation O_A constitue, en fonctionnant, un système dynamique $S = O_A \times T$. On obtient alors une application nommée *Effet* de F_i dans S :

$$Effet : \{F_i\} \rightarrow S, \quad S \text{ espace de fonctionnement du système, observable}$$

qui fait correspondre à l'espace abstrait constitué par les familles de catégories réifiées par traits dans les agents du système, un ensemble de situations observables, constitué par le comportement du système dynamique. Nous allons proposer dans la suite un moyen d'observer effectivement ce comportement avec la notion d'espace morphologique, c'est-à-dire de définir la fonction *Effet*. On remarque ainsi dans l'image $Effet(F_i)$ des permanences, des régularités et également des irrégularités, des anomalies, des dysfonctionnements. Ces observations conduisent à modifier certains agents, certaines familles d'agents, à en ajouter d'autres, à définir des familles intermédiaires entre les familles existantes, à ajouter ou à altérer des traits, à enrichir le système de nouvelles catégories ou bien à en enlever, via les agents.

En fait, tout ajout d'un agent altère O_A dans son entier, par le jeu des communications entre les accointances des agents. La famille courante F_c (initialement F_c est F_i) des catégories réifiées dans des agents est le résultat de ces modifications :

$$\begin{aligned} F_c &\leftarrow (F_c \text{ modifié par reconstruction}) \\ O_A &\leftarrow (O_A \text{ selon la modification de } F_c), \text{ le signe } \leftarrow \text{ signifiant "devient"} \end{aligned}$$

4 - On peut définir dans le comportement des agents de l'organisation O_A des ensembles évitables, c'est-à-dire réduire le degré organisationnel du système, ou au contraire libérer des contraintes, en jouant sur des indicateurs des groupes d'agents, les réseaux d'accointances et sur les structures de décision des agents. On peut introduire de la génétique sexuée dans les familles F_c [Cardon 2000], [Cardon – Vacher 2000].

$$F_c \leftarrow (F_c \text{ modifié par altération locale et génétique des agents de } O_A)$$

5 - La construction du système dynamique part donc d'un état initial précis, constitué à partir des catégories F_i . On développe le système par modifications - insertions successives d'agents, en réifiant ainsi de nouvelles catégories, avec modification du degré de liberté organisationnelle de O_A . Les agents sont introduits pendant le fonctionnement du système.

6 - On compare le système d'agents O_A , défini par sa famille courante de catégories F_c , avec le système de référence, défini lui à partir de l'ensemble général de catégories C_d . S'il n'y a pas bonne adéquation, on retourne à l'étape 3. Sinon, le système est considéré comme adéquat à son référent et l'agentification est achevée, pour le concepteur, mais les agents évolueront par eux-mêmes.

Notons que les modifications se font après des pas de fonctionnement du système, en introduisant ainsi un nouvel élément de non régularité : l'agentification dépendra des moments d'insertions et de l'ordre des insertions. C'est un procédé de construction où le concepteur adapte et façonne le système en tenant compte de son fonctionnement. Il est clair que le fonctionnement altère l'organisation courante, par création de nouveaux agents de manière interne au système (clonage ou reproduction) et par altération des agents. L'utilisateur améliore, dans une posture d'enseignement par insertion d'agents, le comportement du système. Les insertions s'apparentent à de l'apprentissage comportemental non directif et de caractère constructif.

Ainsi, par cette méthode, il est possible de tester, à partir d'une organisation génératrice possédant les caractères estimés minimaux, si celle-ci est régulièrement augmentable, par ajouts successifs, en conservant la cohérence du système.

Le point important est alors le contrôle d'une telle organisation d'agents.

ANALYSE DU COMPORTEMENT D'UNE ORGANISATION MASSIVE D'AGENTS : LA QUESTION DU CONTROLE

Il nous faut maintenant tenter de déterminer les caractères du comportement d'une organisation massive d'agents. Le problème sera soluble au niveau calculable car les agents sont des entités logicielles actives. Il sera ainsi possible, à la fois au niveau conceptuel et au niveau effectif, de suivre les organisations d'agents par un moyen de suivi des calculs en cours. Notons qu'il est impossible de réaliser une telle observation avec les particules d'un système particulière sans altération du système. Notre proposition est donc semblable à l'utilisation de champs de contrôle en physique. Elle sera calculable au-dessus de l'organisation d'agents, en l'observant sans la modifier, sauf si on le souhaite et nous le souhaiterons pour aller vers l'auto-adaptativité.

La caractérisation d'une organisation d'agents

Les agents que nous avons considérés jusqu'à maintenant sont assez simples et n'ont que trois grands caractères :

- 1- Ce sont des entités sociales. Les agents communiquent entre eux en utilisant un langage de communication bien déterminé, précis, non ambigu et simple. Ils échangent des connaissances, mais avec des caractères ontologiques et relatifs à l'acte de langage lui-même entièrement définis à l'avance.
- 2- Ce sont des entités réactives, qui ont une perception de leur environnement, de l'état de l'environnement et des modifications de cet état les conduisant à adopter un certain comportement, c'est-à-dire à engager certaines actions

prédéfinies. Ils sont construits pour engager ces actions dans un délai raisonnable, cohérent avec la dynamique de l'environnement.

- 3- Ce sont des entités proactives, c'est-à-dire qui peuvent engager des actions sans y être nécessairement conduits par des sollicitations externes explicites. Ils ont donc un comportement doté d'une certaine autonomie de décision et d'action.

De tels agents sont fondamentalement rationnels. Ils se comportent, au niveau individuel, strictement comme leur structure interne le leur permet. Leur comportement est donc en ce sens parfaitement déterministe. Ils peuvent par cela être parfaitement spécifiés. Mais le fait qu'ils sont très nombreux, proactifs, représentés chacun par un processus, que leur degré de liberté comportementale est relativement grand, qu'ils peuvent se modifier et générer d'autres agents conduit à considérer leur organisation comme un système complexe dont le comportement global n'est pas représentable facilement et dont la prédiction fine semble fort délicate.

Nous pouvons affiner les trois caractères généraux qui définissent les agents en énonçant les propriétés qu'ils doivent nécessairement posséder. Ces propriétés sont plus précises que les caractères généraux. Ce sont celles énoncées par Krogh [Krogh 1995], auxquelles nous ajoutons (point 6) la notion de dépendance. Un agent possède les six propriétés suivantes :

1. il est auto-centré, c'est-à-dire qu'il a des buts propres (réactivité et pro-activité),
2. il est auto-motivé (pro-activité),
3. il est interagissant (socialité),
4. il est hétérogène, c'est-à-dire formé de parties non homogènes (réactivité, pro-activité et socialité)
5. il est persistant (socialité),
6. il est dépendant de certains autres (socialité).

Le problème central est alors, en partant de l'activité individuelle de chaque agent, de définir l'activité de *l'ensemble* des agents, c'est-à-dire de préciser la signification et le comportement au niveau global de toute l'organisation d'agents. Nous avons vu que cette organisation, si elle était massive, formait un système instable et même non déterministe. Et une approche statistique du comportement semble délicate car les agents sont des éléments cognitifs et évolutifs qui sont très corrélés. Il est difficile dans ce cas de définir des probabilités sur un comportement moyen.

Le problème central

Les deux problèmes fondamentaux dans la manipulation d'un vaste ensemble d'agents est la représentation et la maîtrise du comportement de l'organisation des agents considérée comme un tout. C'est le problème du contrôle.

Le comportement de chaque agent est fourni par son module de comportement qui est en général un automate (ou bien un ATN). Initialement, son module de connaissances dispose de certaines connaissances prédéfinies et ses buts sont précisés à la construction. L'agent est dans un certain état, il agit sur les objets de son monde et peut envoyer un message à d'autres agents. La réception d'un message peut faire

changer les connaissances de l'agent récepteur (par modification structurelle et réécriture de code dans son système de connaissances par exemple), peut altérer son ATN (par changement des états et / ou des franchissements et donc la structure de son ATN) et même faire changer ses protocoles de communication. Ces changements peuvent se baser sur des choix au hasard, en utilisant une fonction aléatoire dans le système hôte où l'agent est processé.

L'espace morphologique, le correspondant de l'espace des phases pour les SMA

Nous allons représenter le comportement d'un ensemble d'agents de manière générale, indépendante des problèmes que l'organisation résout et donc en-dehors de la sémantique contenue dans le système. Cette sémantique sera ajoutée par la suite à la représentation, pour l'augmenter.

Nous posons qu'une forme est un élément de R^n muni d'une métrique euclidienne. Un espace dynamique est le produit d'un espace topologique métrique par le temps, produisant des transitions entre l'état courant et l'état suivant. Remarquons que les agents considérés étant des entités rationnelles simples, il est possible de leur associer une notion précise d'état, c'est-à-dire de décrire précisément leurs caractères dans un vecteur.

Etat d'un agent

L'état d'un agent est l'ensemble des caractères significatifs qui permettent de décrire entièrement sa situation courante dans l'organisation d'agents à chaque instant, cet état étant un élément de R^n .

On souhaite en effet ramener chacun de ces caractères à un élément de R , ce qui est possible car, rappelons-le, un agent est rationnel et déterministe. Ainsi, l'état d'un agent sera un point de R^n s'il y a n caractères qui le définissent. Tout le problème est de déterminer ces caractères indépendamment de la sémantique.

Carte d'activité [Lesage 2000]

Une carte d'activité d'une organisation d'agents est une représentation de l'évolution temporelle de l'ensemble des caractères significatifs de l'état de chaque agent.

Pour utiliser la notion de forme, c'est-à-dire pour représenter une carte d'activité par des formes géométriques évoluant dans le temps, il va être nécessaire de représenter chaque agent par un vecteur. Cherchons quels sont les caractères significatifs du comportement de chaque agent. Remarquons qu'un objet n'a pas de tels caractères, car il est permanent et ne subit aucune d'évolution structurelle : tout au plus peut-on définir le nombre de fois que chacune de ses méthodes a été déclenchée.

Les caractères intrinsèques d'un agent peuvent être définis à partir de trois catégories qui sont les suivantes [Cf. Fig. 2] :

- 1- l'apparence de l'agent vue de l'extérieur, c'est-à-dire pour les autres agents. Cette catégorie caractérise la situation de l'agent par rapport à son environnement,
- 2- l'apparence interne de l'agent vis-à-vis de l'atteinte de ses buts. Il s'agit de son état par rapport aux buts qu'il doit atteindre ou encore par rapport aux fonctions qu'il doit nécessairement assurer,
- 3- l'état de l'agent au niveau de son fonctionnement propre, c'est-à-dire de sa dynamique interne. C'est la mesure de la qualité de son organisation et la variation de celle-ci dans le temps.

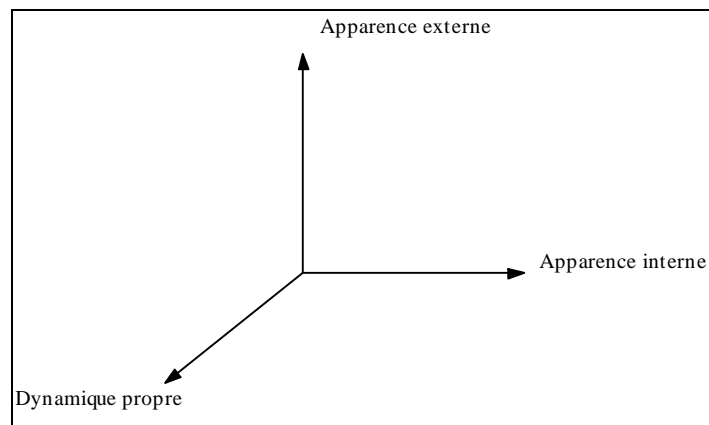


Figure 2. Les trois catégories de caractères d'un agent

Nous allons, en tenant compte de ces trois caractères de catégorisation proposer des dimensions pour l'espace de représentation.

1- Le premier caractère de l'agent est son *apparence externe* pour son environnement immédiat c'est-à-dire sa propre situation d'acteur par rapport aux autres agents et à son environnement. On retient les notions de :

7. **Suprématie** : c'est la mesure du fait que l'agent se situe ou non en position de force par rapport aux agents reconnus par ses accointances, qu'il a ou non de nombreux alliés et que ses ennemis sont ou non puissants.
8. **Indépendance** : c'est la mesure de l'autonomie de l'agent dans ses actions, précisant s'il lui est nécessaire ou non de trouver des alliés pour atteindre ses buts, si ses actions sont soumises par rapport aux actions d'autres agents, si sa structure de connaissance est incluse dans celles d'autres agents.
9. **Persistance** : c'est la mesure de la longévité de l'agent, de sa durée de vie qui peut être éventuellement très brève ou bien fort longue.

2- Le second caractère est son *aspect interne*, c'est-à-dire son état structurel par rapport aux fonctions qui lui sont assignées. On retient les notions de :

1. **Facilité** : c'est la mesure du fait que l'agent a atteint son état courant en rencontrant plus ou moins de difficultés, de résistances. Par exemple, si son comportement est représenté par un ATN, ce caractère mesure la facilité de franchissement des

transitions, les retours. Cette indication précise également le soutien, ou la résistance, rencontrés par l'agent vis à vis des autres agents pour atteindre ses buts.

2. **Vélocité** : c'est la vitesse prise par l'agent pour atteindre les buts qu'il s'est lui-même assigné ou qui lui ont été donnés. C'est par exemple la vitesse de franchissement des états de son automate comportemental lorsque l'agent en possède un.

3- Le troisième caractère concerne son *état organisationnel interne*, c'est-à-dire son fonctionnement propre entendu comme un processus d'échange d'informations entre ses modules qui forment sa structure. On retient les notions suivantes :

1. **Intensité du flux d'activation interne** : c'est la mesure de la quantité d'informations échangées entre ses composants internes lui permettant d'aboutir à une activation visible de l'extérieur par les groupes auxquels il appartient.
2. **Complexification** : c'est la mesure de sa transformation structurelle engendrée par certains dysfonctionnements ou certaines situations difficiles ayant nécessité de transformer certains éléments de sa structure. Cette mesure détermine si son évolution structurelle est une simplification ou une complexification.
3. **Fréquence communicationnelle** : c'est la mesure, en dehors de toute sémantique, de la relation communicationnelle entre l'agent et les autres agents, représentant en fait une mesure de son couplage dans l'organisation.
4. **Ecart organisationnel** : c'est une évaluation prenant en compte l'opérationnalité de la structure de l'agent et qui lui a permis de réaliser certaines actions sociales le conduisant à poser lui-même une appréciation de la distance entre son propre état et l'état global de son environnement, tel qu'il se le représente (il n'y a pas de superviseur dans le système !). C'est l'appréciation de l'adéquation plus ou moins bonne de sa mise en situation dans son monde. Ce caractère est fondamental et précise la relation entre l'agent, compris comme une entité autonome, et l'organisation, composée de tous les agents, c'est-à-dire entre chaque partie et le tout [Morin op. cité].

Chacun de ces caractères peut se représenter par une mesure au sens d'une métrique dans R. Il est nécessaire de considérer que le système multi-agent, comme nous l'avons déjà noté, est immergé dans son environnement : il est en communication continue avec son environnement. Il échange donc de l'information avec celui-ci et cette action est réalisée par les agents d'interface. Nous devons donc ajouter un dernier caractère typique du fait que le système est ouvert, en important et exportant de l'information. Nous définirons ainsi un caractère mesurant l'intensité de ce transport d'information, qui représente la quantité et le débit des informations échangées avec l'environnement. Cette mesure sera le **transport d'information**. Notons que cette mesure qui apparaît comme située au niveau du système, est assurée normalement par les agents d'interfaces, mais qui communiquent évidemment avec les autres agents au sujet de cette information externe. Elle précise donc l'implication de tout agent dans l'environnement du système [Cf. Fig. 3].

Aspect externe de l'agent	Suprématie
	Indépendance
	Persistance
Aspect interne de l'agent	Facilité
	Vélocité
Etat organisationnel de l'agent	Intensité du flux interne d'activation
	Complexification
	Fréquence communicationnelle
	Ecart organisationnel
Ouverture du système	Transport d'information

Figure 3. Les dix caractères d'aspect du comportement d'un agent

Ces dix caractères, groupés en trois catégories générales, peuvent tous être représentés dans R^{10} et permettent ainsi d'associer à chaque agent ce que l'on appellera son **vecteur d'aspect**. La structure de tout agent sera augmentée, simplement, pour pouvoir produire, à tout instant, ces dix indications. Nous appellerons *dimension organisationnelle* la dimension de l'espace morphologique (ici 9).

Espace morphologique

C'est le sous-espace de R^{10} représentant vectoriellement les caractères d'activité de tous les agents selon les notions de suprématie, d'indépendance, de persistance, de facilité, de vélocité, d'intensité du flux interne, de complexification, d'écart organisationnel, de fréquence communicationnelle et de transport d'information.

Cela signifie qu'un agent dont ces dix caractères fondamentaux sont donnés est parfaitement défini quant à son comportement apparent dans son milieu, dans l'organisation, c'est-à-dire indépendamment du domaine d'application où il est opérationnel.

On pourrait aussi représenter l'état du système dans un espace $R^{10.N}$ s'il y a N agents, comme un point particulier dans un "espace des phases" pour agents. Nous préférons utiliser R^{10} comme espace de description du comportement des agents, ce qui est plus conforme à nos objectifs. Nous nous intéresserons ainsi à la forme du nuage de points représentant l'état comportemental des agents, ainsi qu'à la déformation de ce nuage. D'autre part, le nombre d'agents varie au cours du fonctionnement et il est souhaitable de conserver une dimension permanente à l'espace de représentation.

Hypothèse centrale

L'espace morphologique joue, pour une organisation d'agents, le rôle de l'espace des phases d'un système formé de particules en interaction.

On peut aussi utiliser une forme réduite de l'espace morphologique, en ne prenant en compte que les trois dimensions d'espace correspondant aux trois catégories générales

: aspect externe, aspect interne et organisation propre. On obtient alors un espace morphologique dit réduit où ne sont représentés que les traits généraux des agents. On peut même employer des projection de R^{10} dans R^k , avec $k < 10$, et ne s'intéresser qu'à certains aspects particuliers des agents.

Il est bien évident que certains types d'agents, et en particulier les agents lourds comme les agents de type BDI [Rao 1996], ont des capacités particulières donnant de l'importance à certains de ces caractères, comme l'écart organisationnel. Mais nous posons que tout agent, quel qu'il soit, peut, au moins de manière sommaire, fournir une mesure de tous ces caractères.

La carte d'activité d'une organisation d'agents sera alors un nuage de points dans R^{10} correspondant aux dix caractères typiques du comportement des agents. Leurs caractères typiques sont exprimés à partir de leur seule structure et au vu de leurs seules actions. Il nous est maintenant possible de préciser la notion de représentation d'une organisation d'agents : la notion de *paysage d'agents*.

Paysage d'agents

| *Un paysage d'agents est une expression géométrique d'une carte d'activité.*

Cette représentation s'appuie sur les caractères essentiellement géométriques du nuage de points, en utilisant éventuellement des notions de topologie algébrique, c'est-à-dire de complexes simpliciaux [Giavitto 1998]. Mais elle sera en fait réalisée par une organisation d'agents spécifique.

Les éléments géométriques que nous allons considérer sont des éléments du système dynamique $R^{10} \times T$ [Thom 1972], qui mesurent l'importance des comportements des agents et des groupes d'agents, pendant une certaine durée. La conformation d'une forme dynamique, lorsqu'elle est représentée par un polyèdre dans l'espace morphologique, le fait qu'elle a, par exemple, des parties saillantes, des ravins ou des plateaux, des elongations et des parties denses ou encore des discontinuités, permet de représenter assez fidèlement ce que les comportements ont produits, la manière dont des activations d'agents ont conduit à un certain comportement global apparent du système. Nous allons utiliser, pour décrire ces concepts, des agents particuliers dits *agents de morphologie*.

L'organisation des agents de morphologie assurant la représentation de l'organisation aspectuelle

Nous allons donc manipuler deux organisations d'agents : l'organisation des agents qui définissent, par leurs actions en groupe, les fonctionnalités du système, et une seconde représentant l'activation de ces agents dans les termes de l'espace morphologique. Nous appellerons la première organisation *l'organisation aspectuelle*, qui donne les aspects des fonctionnalités et de l'opérationnalité du système et qui sera formée d'agents dits aspectuels et la seconde *l'organisation morphologique*, qui exprime la forme de la première et qui sera formée d'agents dits de morphologie [Cf. Fig 4].

Espace morphologique réifié

| *La réification de l'espace morphologique, sous-espace de R^{10} , correspond à la définition d'une organisation d'agents qui en exprime dynamiquement tous les caractères, l'organisation des agents de morphologie.*

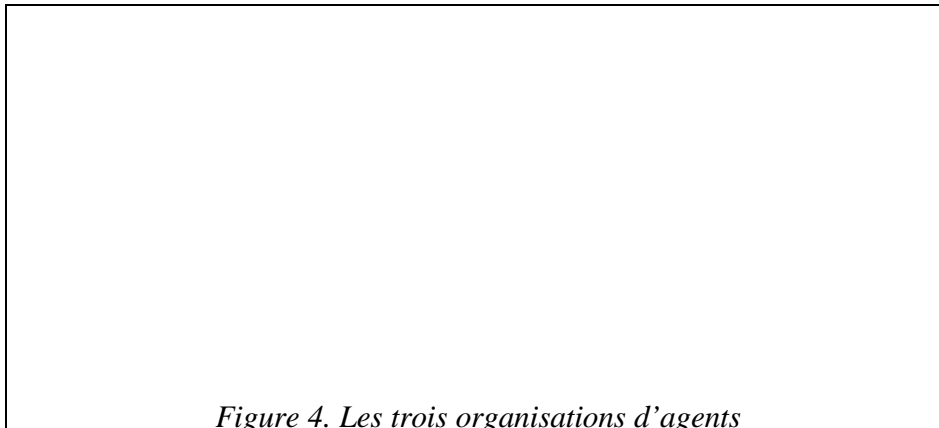


Figure 4. Les trois organisations d'agents

Il s'avère en effet nécessaire de représenter l'activation des agents aspectuels par une organisation d'agents plutôt que d'opérer sur les points de l'espace métrique de morphologie, pour les deux raisons suivantes :

1. La notion de point, ou de particule ponctuelle, dans l'espace morphologique n'est pas adaptée aux caractères de notre étude. Elle est d'un tout autre genre que le concept d'agent et se place dans un cadre typiquement équationnel. Nous ne cherchons pas ici à produire un opérateur de changement d'état pour une organisation d'agents, mais à suivre en temps réel les changements de cette organisation, au niveau strictement calculable. Nous lui préférons donc celle de bassins d'attraction dynamiques, variant dans le temps, dans laquelle des points proches sont absorbés par le même bassin d'attraction, et ceci pendant que le système fonctionne. Ainsi, l'espace morphologique sera formé d'organisations d'agents réifiant des bassins d'attraction et exprimant, selon leur profondeur et selon la variation de cette profondeur, la densité d'agents aspectuels dans la région considérée de l'espace morphologique.
2. Les indications géométriques apparaissant dans l'espace morphologique devront pouvoir être utilisées pour réagir immédiatement avec l'organisation aspectuelle, et seuls des agents peuvent interagir avec d'autres agents. Nous souhaitons en fait coupler fortement les agents aspectuels et ceux représentant leurs caractères, les agents de morphologie, pour rendre le système auto-contrôlable.

Un agent de morphologie aura pour fonction de représenter, selon son type et son rôle, les activations locales, les modifications et les mouvements des agents aspectuels selon les dix caractères de l'espace morphologique [Cf. Fig. 5].

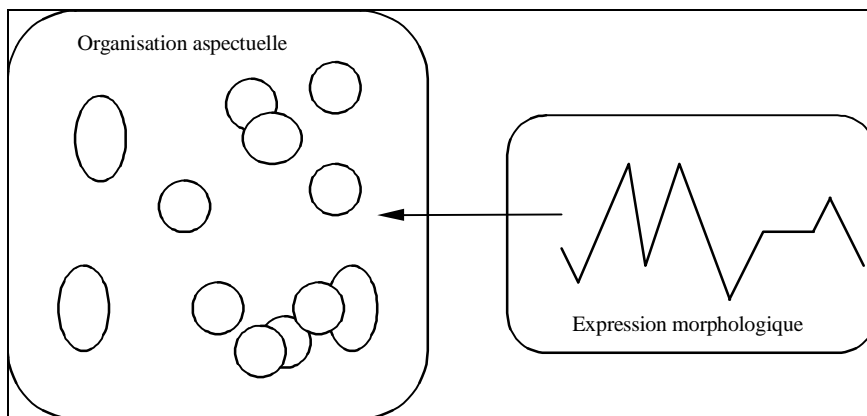


Figure 5. L'action des agents de morphologie produisant une représentation de l'organisation aspectuelle

Structurellement, un agent de morphologie est un agent simple, dont le comportement est un automate à quatre états [Cf. Fig. 6], pour reprendre les quatre états de la décision de L. Sfez [Sfez 1992] et en suivant ce que nous avons déjà utilisé par ailleurs [Cardon - Durand 1997]. Ces quatre états sont :

- initialisation : l'agent de morphologie entre en activité,
- délibération : l'agent cherche dans ses accointances des alliés pour atteindre ses buts
- décision : l'agent tente de maîtriser ses opposants pour se renforcer,
- action : l'agent peut agir, ayant des alliés et ayant mis à l'écart ses plus forts opposants. Son action revient essentiellement à localiser des agents aspectuels dans un certain puits de potentiel de R^{10} qu'il représente et dont il fournit une conformation (profondeur, largeur, nombre et densité d'aspectuels contenus dans le puits).

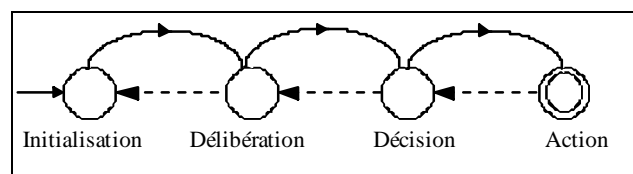


Figure 6. Structure de l'agent de morphologie

L'agent de morphologie agit en prenant des informations essentiellement dans le comportement des agents aspectuels, par les mesures des dix caractères fondamentaux de ces agents. Il place en fait tout agent aspectuel dans une boule significative de R^{10} . Ce processus est techniquement complexe, car il lie des agents aspectuels à un agent de morphologie considéré comme un puits de potentiel variable, via des agents de pré-morphologie qui scrutent les caractères de chaque agent aspectuel et le dirigent vers un agent de morphologie qui est créé pour cela, ou bien qui est renforcé. Un agent de morphologie renforcé a tendance à absorber ses voisins moins forts et un agent de morphologie faible à tendance à s'associer avec des agents comparables et proches pour former un agent de morphologie fort [Lesage 2000].

Les agents de morphologie vont réaliser "*in-line*" une analyse comportementale de l'organisation des agents aspectuels. Ils opèrent selon des buts strictement rationnels, tentent de dégager les formes typiques de l'ensemble des caractères exprimés par le paysage des agents aspectuels, en se rassemblant en groupes (dans des groupes de puits de potentiels), c'est-à-dire en constituant des *chréodes* [Jorion 1989], [Cardon 2000]. Une chréode est une agrégation d'agents de morphologie structurée et significative. Ce sont des amas d'agents de morphologie proches, pour une certaine métrique simple de

l'espace morphologique, évaluée par une mesure interne à l'agent en estimant la proximité avec ses accointances.

Les chréodes sont des émergences réifiées sous forme d'ensembles d'agents de morphologie (des groupes de puits attirant des agents aspectuels), ensembles dotés de significations géométriques (densité, forme, évolution) sur les agents de morphologie. Elles se représentent par de petits polyèdres particuliers dont la forme même a une signification pertinente pour représenter la façon dont les agents aspectuels se groupent selon leur comportement [Giavitto op. cité]. Le paysage des agents de morphologie (un paysage sur un paysage !) admet différentes lectures qui seront effectuées par une troisième organisation d'agents.

Caractères des chréodes

Les organisations d'agents aspectuels et de morphologie sont en interaction permanente. Les chréodes, exhibées par les agents de morphologie, vont pouvoir influencer sur l'activité des agents de morphologie, en activant par exemple plus fortement ceux qui sont conformes à ce qui apparaît dans les chréodes et en rendant éventuellement récessifs ceux qui sont isolés. En interprétant organisationnellement ces actions, on peut dire que le système est doté d'un mécanisme de formation de traits permanents, de penchants dans son organisation même, indépendamment des caractères sémantiques des agents aspectuels. Il s'agit bien de tendances organisationnelles, strictement internes et ne dépendant que du comportement de l'organisation de morphologie.

Une chréode est formée d'un ensemble d'agents de morphologie proches, selon la métrique de l'espace morphologique. Elle a la forme d'un polyèdre. Chaque point de ce polyèdre est un agent de morphologie singulier qui représente un certain groupe d'agents aspectuels qui, eux, ont une signification, une sémantique quant au domaine d'application du système. On peut retrouver cette sémantique dans la chréode, par la prise en compte des traits que les agents aspectuels réifient.

Interprétation d'une chréode

L'interprétation d'une chréode est la prise en compte à la fois de la sémantique des agents aspectuels qui la composent et des caractères de sa forme géométrique et de l'évolution de celle-ci.

La question est de donner une signification à la chréode, en tenant compte de sa forme géométrique et de la sémantique des agents aspectuels qu'elle identifie. On peut ainsi caractériser les chréodes par leur aspect centré (axes de symétries), allongé, partitionné, avec ou sans point d'articulation, plat, déployé, régulier ou non... et porter ces caractères dans l'ensemble des traits sémantiques de ses agents aspectuels. Ces caractères révèlent la façon dont les traits sémantiques s'expriment, comment ils sont organisés entre eux, comment ils se complètent ou s'opposent, se renforcent ou s'inhibent. Et l'analyse la plus intéressante sera le suivi de la déformation des chréodes dans le temps, exprimant la façon dont le système dégage ses traits à partir de ses agents, comment il fait émerger de la signification dans son organisation.

Agents d'évocation et auto-adaptativité

Le système dans son entier, dans le mouvement communicationnel de ses agents, va faire se dégager dans l'organisation morphologique certaines chréodes, à partir des activations aspectuelles. L'analyse de la morphologie du paysage des agents aspectuels, et particulièrement des chréodes, produit une image des forces organisationnelles actives à chaque instant dans le système. Elle fournit son *état*

organisationnel. Il s'agit bien de produire ici des caractères définissant précisément l'état du système, de la même façon qu'un opérateur comme celui de Liouville fournit l'état d'un système particulière à tout moment du temps. La connaissance de cet état permet de connaître ce vers quoi tend le système, ce qu'est effectivement son action évolutive globale. Cette connaissance n'est pas directe, les agents ne sont pas analysés un par un. Elle n'est pas non plus statistique, mais elle est géométrique et globale et effectuée en temps réel, pendant le fonctionnement de l'organisation aspectuelle.

Et une troisième organisation d'agents, après les agents aspectuels et ceux de morphologie, va prendre en considération l'état du paysage des agents de morphologie pour réaliser une analyse de la morphologie du système en interprétant sémantiquement les chréodes [Cf. Fig. 7] Il s'agit de représenter le sens de l'activation de l'organisation des agents aspectuels, à partir de ses caractères d'aspect exprimés par les agents de morphologie, dans les chréodes. Cette organisation d'agents, les **agents d'évocation**, va fournir une interprétation de ce qui a été exprimé par les informations géométriques et sémantiques venant du paysage des agents de morphologie, au-dessus du paysage des agents aspectuels qui détiennent la sémantique des actions.

Les agents d'évocation, qui ont une structure semblable à celle des agents aspectuels, par leur caractère cognitif, vont représenter la signification de l'activation des organisations d'agents, interprétant l'activité des agents aspectuels d'interface, le comportement des agents aspectuels, et l'activité d'observation morphologique par les agents de morphologie.

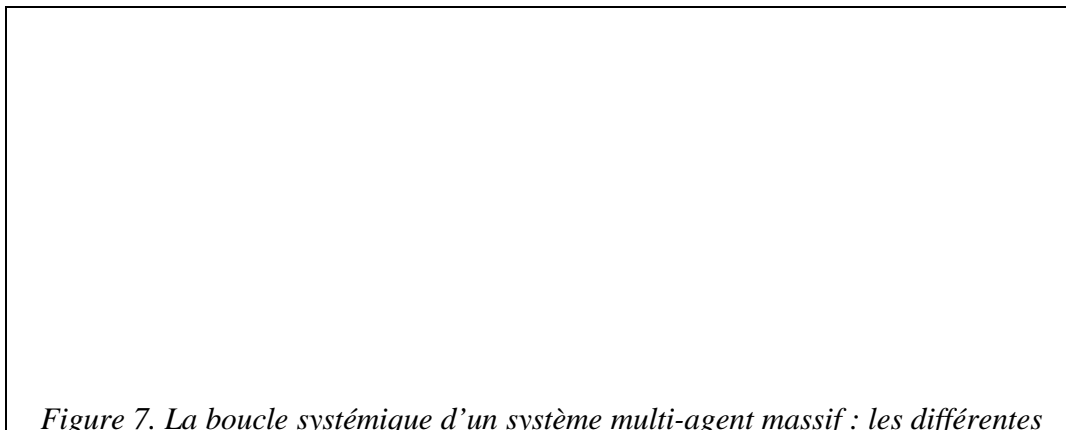


Figure 7. La boucle systémique d'un système multi-agent massif : les différentes organisations d'agents

Et l'organisation des agents d'évocation va en fait permettre de faire beaucoup plus que cette analyse, parce que le système est un système calculable que l'on peut organiser comme on le souhaite. Elle va permettre de réaliser un contrôle de l'organisation des agents aspectuels par l'organisation des agents d'évocation, en utilisant l'analyse morphologique. Le système va pouvoir tenir compte de la signification de sa morphologie, l'appréhender, ne serait-ce que pour la mémoriser organisationnellement, c'est-à-dire en tenir compte *implicitement* dans ses activations futures, dans ses engagements futurs. Le système peut fonctionner comme une **mémoire organisationnelle**.

Les agents d'évocation pourront ainsi agir sur la cohérence globale des activations aspectuelles. Ils pourront effectuer des choix et prendre des décisions quant au comportement global des organisations aspectuelles et de morphologie, en tenant compte de leurs actions passées, de leurs tendances, en retenant des stratégies d'inhibition d'action pour certains agents d'interface, aspectuels ou de morphologie, en contrôlant ainsi la ligne générale de génération des émergences organisationnelles réalisées dans le système, à tous les niveaux. Remarquons que ces actions stratégiques quant à l'évolution de l'organisation du système seront *indirectes* par rapport au comportement de chaque agent,

permettant de constituer un système à émergence de sens organisationnel avec ses caractères intrinsèques de non-stabilité et d'apprentissage par déformation structurelle régulière [Cardon 2000]. La boucle systémique est maintenant bouclée et le système se contrôle par auto-adaptativité.

Système auto-adaptatif

C'est un système composé de trois organisations d'éléments : une première organisation très plastique constituée d'éléments proactifs, qui engendre les fonctionnalités élémentaires du système, une seconde organisation qui exprime les caractères géométriques des actions réorganisationnelles de la précédente et enfin une troisième qui évalue le comportement organisationnel et sémantique de la première via la seconde et qui peut, par cette analyse, influencer continûment le comportement du système.

Il est bien clair que tout organisme vivant peut se représenter selon cette caractérisation, les deux dernières organisations effectuant l'autocontrôle et la régulation des mouvements effectués dans la première. Il est bien évident également que seules des organisations d'agents massives sont adéquates à la représentation informatique de tels systèmes.

Enfin, l'action des agents d'évocation, par le fait qu'elle altère les organisations d'agents aspectuels, réalise à tout instant, de façon continue, un certain contrôle et une certaine forme de mémorisation du comportement du système. Cette action par bouclage systémique permet de contrôler la stabilité du système, pour l'engager dans le cycle sans fin de production d'états conformes à ses capacités de réorganisation et adéquat à sa mise en situation dans son environnement. Le fonctionnement du système se ramène bien à une succession continue d'états émergents auto-contrôlés.

La richesse des agents d'interface et des agents aspectuels entraîne la complexité plus ou moins grande de toutes les autres organisations d'agents. Le système peut ainsi générer une émergence organisationnelle élémentaire : la signification organisationnelle de la forme saillante exhibée. Il peut aussi générer une émergence beaucoup plus fine : par exemple l'émergence de phrases à partir d'intentions exprimant des tendances langagières.

ENTROPIE ET EQUATION DE TRAJECTOIRE

Un système multi-agent massif a le comportement d'un système instable. Nous nous intéressons aux notions d'entropie et de trajectoire pour un tel système. Nous allons nous inspirer du cas des systèmes dits *ouverts* [von Bertalanffy 1973]. La notion de système ouvert provient des recherches de von Bertalanffy et présente une alternative à la notion de système fermé que nous avons introduite dans le cas des systèmes à objet. Un système ouvert fonctionne en relation continue avec son environnement et est le siège de processus internes irréversibles.

Système ouvert

Un système ouvert est un système formé de très nombreux éléments polymorphes en inter-relations constantes, qui se maintient dans un flux entrant et sortant continu, qui est le site d'une génération et d'une destruction de ses composants, qui ne connaît pas, tant qu'il fonctionne, d'équilibre, mais qui est maintenu dans certains états stables.

La notion de système ouvert permet de définir à la fois une notion particulière d'entropie pour des systèmes qui se dirigent vers l'ordre et une équation comportementale.

Entropie

Le second principe de la thermodynamique précise qu'un système clos se dirige toujours vers des états d'ordre de moins en moins élevé, c'est-à-dire vers le désordre de plus grande probabilité. L'entropie est la mesure de cette évolution thermodynamique. L'entropie d'un système clos est donc toujours croissante ou nulle. La célèbre équation de Clausius, définissant l'entropie S et traduisant ce principe, est :

$$dS \geq 0$$

Un système ouvert, par contre, ne peut pas satisfaire à un tel principe. Son évolution lui permet en effet d'atteindre des états d'ordre plus élevé et de moindre probabilité. I. Prigogine [Prigogine 1982] a défini une nouvelle notion d'entropie pour ces systèmes, avec deux sortes d'entropies :

$$\begin{aligned} dS &= d_e S + d_i S \\ d_e S &\leq 0 \text{ ou } d_e S \geq 0 \\ d_i S &\geq 0 \end{aligned}$$

où $d_e S$ est la variation d'entropie venant de l'extérieur, par apport d'énergie et d'information dans le système, et $d_i S$ est la variation d'entropie interne, par l'activation des processus internes irréversibles. L'entropie externe peut être négative, lorsque l'apport externe revient à créer de l'ordre dans le système. L'entropie interne est elle, classiquement, toujours positive ou nulle.

Il est bien évident qu'un système multi-agent massif, composé de processus concurrents multiples, prend aussi des informations dans son environnement, pour les transformer en connaissances dans les agents, pour transformer ceux-ci et améliorer le fonctionnement général. L'entropie externe sera la mesure de ces apports informationnels transformés en connaissances, c'est-à-dire en code. L'entropie interne par contre mesurera la dégradation du fonctionnement des agents, le fait des traitements des processus entraînant de l'indéterminisme, le fait de la reproduction et du clonage plus ou moins bons des agents. Ainsi, le système pourra-t-il s'organiser vers un ordre croissant, au sens des connaissances qu'il manipule, en utilisant au mieux l'apport d'informations externes. Il satisfait donc à la notion d'entropie "à la Prigogine".

Equation de trajectoire : une réduction par rapport à l'analyse morphologique

La notion d'équation décrivant la trajectoire générale d'un système multi-agent massif sera une interprétation de l'équation de von Bertalanffy pour les systèmes ouverts [von Bertalanffy op. cité].

Il s'agit de mettre en relation dans une équation d'évolution temporelle ce que le système produit avec ce qui permet ou inhibe cette production. Il s'agit d'un système multi-agent, et ce qu'il produit peut être considéré comme de la connaissance plus ou moins activée. Cette connaissance sera distribuée sous diverses formes dans les agents et servira de fondement à leurs activations. Elle sera produite comme une émergence, donc apparaîtra sous la forme de caractères distingués et construits par les organisations d'agent, et ceci par rapport à d'autres connaissances mises temporairement en sommeil.

Nommons K_i le $i^{\text{ème}}$ type de connaissance que le système peut produire. Rappelons que l'agentification a été réalisée à partir d'ontologies, que les connaissances sont dans le système en nombre fini et que toute connaissance admet des qualifications, des renvois vers d'autres connaissances.

Dans le fonctionnement du système multi-agent massif, on s'intéresse donc à l'émergence d'une connaissance notée K_i , soit :

qui représente la quantité de K_i exprimée pendant le fonctionnement

Ce qui facilite et inhibe cette émergence sera représenté par deux caractères :

3. le mouvement de génération de cette connaissance, révélé par l'action des agents, son transport par activation dans les agents,
4. le taux de production de cette connaissance par rapport à ce qui l'inhibe ou la permet en s'en distinguant.

On définit T_i comme étant le transport de la connaissance K_i , c'est-à-dire ce qui concerne le mouvement de déplacement de cette connaissance dans le système par activation des agents. Il s'agit bien d'un mouvement, car des agents prenant en compte K_i sont activés et ces activations, par les communications entre eux, entraînent la manipulation de K_i dans d'autres agents. Ainsi, K_i est activée de façon distribuée et dynamique, comme un transport de matière dans un système physique.

On retiendra, en se basant sur les caractères d'aspect externes des agents, que le transport T_i est en fait une fonction dépendant de la fréquence communicationnelle des agents, de l'écart organisationnel et des trois caractères d'aspect externe des agents : suprématie, indépendance, persistance.

On définit le taux de production P_i de la connaissance K_i comme la quantité de connaissance K_i manipulée dans les activations des agents. Il s'agit d'un concept exprimant la génération effective de la connaissance à partir des systèmes de connaissances internes aux agents. A partir d'informations externes, K_i est activée dans certains agents et le mouvement organisationnel du système permet d'autres générations de K_i .

On retiendra que ce concept de taux de production est une fonction qui ne prend en compte que les caractères d'aspects internes des agents : facilité, vélocité, intensité du flux interne, complexification.

On obtient ainsi l'équation suivante de production d'une connaissance K_i par émergence, en fonction de T_i et de P_i , dite *équation d'évolution* du système multi-agent :



pour la $i^{\text{ème}}$ connaissance manipulée

C'est une *équation d'état* exprimant la variation de quantité d'une connaissance par rapport à des valeurs de transport T_i et de taux de production P_i . Cette équation est semblable à l'équation de von Bertalanffy pour les systèmes ouverts. Elle dénote une connaissance précise, la $i^{\text{ème}}$, en représentant ce qui conduit à son éventuelle émergence singulière. Le système multi-agent massif se représente alors par autant d'équations qu'il y a de connaissances manipulables dans le système, et en remarquant que ces connaissances ne sont pas indépendantes. L'équation d'état caractérise ainsi un système multi-agent comme un système ouvert, se stabilisant *loin de l'équilibre* sur des états non stables et où l'organisation globale influe sur les comportements locaux des agents.

Validité des équations d'état

Remarquons que ces équations d'état peuvent difficilement exprimer des états stables singuliers et des émergences. Une connaissance est toujours liée à d'autres et n'a pas de signification propre, en elle-même. La notion d'arrière plan de J. Searle est pertinente [Searle 1969]. Ceci montre bien la limite d'une approche équationnelle. Seule l'analyse morphologique permet de représenter la connaissance manipulée sous son aspect organisationnel.

L'organisation morphologique, analysée par l'organisation d'évocation, est bien la *réalisation calculable* d'un opérateur du type de celui de Liouville décrivant l'évolution de l'organisation aspectuelle, en exprimant les modifications de cette dernière et ses tendances organisationnelles et sémantiques. La différence entre cette détermination calculable par agents, en temps réel, du comportement d'une organisation massive et une équation d'état qui pose l'existence d'un comportement est typique de la différence entre informatique et mathématique, entre calculable effectif et formalisation existentielle.

Formes dégradées de l'équation d'état

L'équation d'état admet deux cas limites, où l'on retrouve le comportement des systèmes plus classiques.

Lorsque le transport T_i est nul, lorsque l'activité communicationnelle des agents, au sens de transport de cette connaissance, est inexistante, le fonctionnement du système s'apparente à celui d'un réseau neuronal. Les agents n'ont plus de pouvoir génératif de la connaissance K_i et sont réduits à des neurones ou à des composants fonctionnels réactifs isolés.

Lorsque le taux de production P_i est nul, le système n'est plus générateur de connaissances, les agents ne jouent plus le rôle de générateur de connaissances mais sont simplement des activateurs fonctionnels de ces connaissances. Il y a toujours communication entre les agents, mais ceux-ci ne génèrent pas, par leur pro-action, de comportements novateurs capables de produire de nouvelles connaissances ou de nouveaux aspects de cette connaissance. Il n'y a plus de caractère novateur dans le système et celui-ci se ramène alors à un système à objet.

UNE APPLICATION : UN SYSTEME DE GESTION DE CRISES

La conception d'un système contenant de très nombreux agents et basé sur le principe de l'analyse morphologique d'un paysage d'agents a été réalisée par deux doctorants, Stéphane Durand et Franck Lesage [Durand 1999], [Lesage 2000] pour une application dans le domaine de la gestion des situations d'urgences et de crises.

Les systèmes gérant les phénomènes à fort degré de gravité, comme les situations d'urgence ou les crises industrielles, doivent permettre de structurer et de représenter la connaissance générée par les acteurs décisionnels à propos de la situation en cours d'évolution, par échange d'informations et d'avis.

L'échange d'informations et de connaissances dites objectives sur l'évolution d'une situation d'urgence est fondamental pour la gestion de celle-ci, mais il s'avère insuffisant [Shrivastava 1994]. Il est nécessaire de prendre également en compte la perception de la situation qu'ont les décideurs eux-mêmes [Borodzicz & al. 1994], [Toft & al. 1994]. Et ces représentations de la situation observée apparaissent toujours comme altérées par rapport à celles qui sont prises dans l'environnement habituel, sous la pression des événements, modifiant la perception objective des faits et biaisant ainsi les prises de décision. Les caractères de ces représentations sensibles doivent être détectés et analysés au plus tôt, et leur connaissance doit être propagée comme une connaissance significative pour éviter les ambiguïtés, les incompréhensions, les contresens entre les décideurs, c'est-à-dire pour éviter la "crise dans la crise" [STEP 1994].

L'architecture du Système d'Information et de Communication (les SIC) que nous avons proposée [Cf. Fig. 8] a permis d'exprimer deux catégories de connaissances. Une architecture classique permet l'accès et l'échange de données factuelles, les données objectives, sur la situation, par manipulation de bases de données multiples. Une autre architecture, s'appuyant sur la précédente, permet d'exprimer la perception du phénomène par les acteurs, c'est-à-dire leur appréciation subjective de la situation. Elle permet de générer automatiquement la synthèse de ces appréciations. Le système doit donc permettre des accès simultanés facilitant les prises de décision à plusieurs niveaux de responsabilités [Sfez 1992], c'est-à-dire incluant les intentions des acteurs et des groupes d'acteurs. Pour cela, il doit s'adapter aux différents types de connaissances échangées et se comporter comme une entité décisionnelle autonome capable d'appréhender, à partir des connaissances échangées entre les acteurs, la représentation *globale* qu'il est raisonnable de se faire de la situation courante.

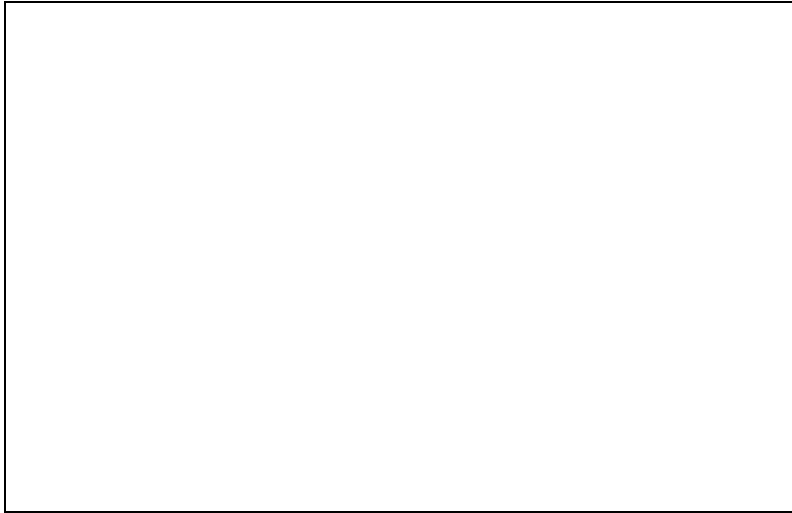


Figure 8.

Organisation du SIC de gestion de crise.

Nous sommes ainsi lacés dans le domaine des Systèmes d'Information et de Communication complexes [Cardon 1996], c'est-à-dire gérant des situations dont l'évolution n'est pas facilement planifiable à l'avance et qui ont à construire effectivement un état de la situation, qui est à augmenter et modifier dynamiquement pendant l'usage du système. Pour représenter le lien entre le phénomène à décrire, structurer et gérer, la catastrophe industrielle ou naturelle en cours, et le système qui informe et fournit de l'aide à la décision sur le phénomène et des connaissances sur ce que pensent les différents acteurs, nous insérons dans le SIC un système d'interprétation de la situation perçue par les acteurs. Ce sera un système d'interprétation artificielle basé sur le discours entre les acteurs.

Une approche centrée sur le phénomène perçu par les acteurs

L'approche basée sur la perception du phénomène par les acteurs est différente d'une approche classique centrée sur les données. En effet, cette dernière essaie de planifier, de prévoir, d'organiser la situation en se basant exclusivement sur des plans prédéfinis afin d'inhiber objectivement l'émergence de la crise vue comme situation non référencée. L'approche phénoménologique, quant à elle, prend en compte le comportement des acteurs et la façon dont la *situation de référence*, ce qu'ils voient à propos de la situation, a été générée explicitement par ceux-ci. Elle structure continuellement le domaine du discours interprété et, après avoir pris en compte les caractères subjectifs des négociations, il est possible de planifier des actions coopératives nouvelles et de prendre des décisions collectives opportunes. De cette manière, le système doit s'adapter au phénomène courant et aux perceptions courantes qu'en ont les acteurs. Il doit tenir compte à la fois des

caractères des représentations mentales que les acteurs expriment grâce à des actes de paroles [Searle 69] et de la génération des processus de décisions. C'est un système adaptatif.

Les Systèmes d'Information et de Communication

Nous représentons dans la figure ci-dessous [Cf. Fig. 9] les six niveaux de modélisation des Systèmes d'Information de Communication Distribués, qui reprennent les niveaux d'organisation des systèmes dits complexes [Lapierre 92].

- 1- Le monde physique, les entités objectives.
- 2- L'espace de développement des entités objectives.
- 3- Le mouvement, les organisations et la planification.
- 4- La communication des Informations.**
- 5- Les valeurs, Symboles, sens du phénomène et intentions.
- 6- Les règles du jeu social, les relations de pouvoir, l'émergence du sens global du phénomène.

Figure 9. Les six niveaux d'organisation d'un SIC.

Les trois premiers niveaux appartiennent au domaine des Systèmes d'Information classiques, le quatrième permet l'organisation dynamique des trois précédents en prenant en compte la communication. Les niveaux 5 et 6 appartiennent au domaine social, psychologique et culturel. Ces deux niveaux ne peuvent pas être représentés par des structures strictement définies a priori et qui utiliseraient des composants élémentaires fixés. En effet, l'importance et le type de catégories sociales et psychologiques que ces niveaux représentent dépendent de la situation elle-même et de son appréciation par ses acteurs. C'est également pour cela qu'ils ne peuvent être a priori décomposés en sous-systèmes fixes.

Le système sera ainsi formé de deux grandes composantes :

4. La composante de communication : à ce niveau, nous représentons les acteurs physiques, les médias de communication et les interfaces usuelles [Kieras & al. 85]. Chaque acteur dispose d'une interface lui permettant de prendre des informations concernant sa fonction opératoire ou sa mission. Elle doit permettre des requêtes sur les serveurs d'information (SGBD et SIG) et l'échange d'information multimédia entre acteurs [Brodie & al 1992].
5. La composante d'interprétation des messages échangés par les acteurs : cette composante permet l'expression des jugements exprimés explicitement par les acteurs sur la situation courante lors de leurs communications. Grâce à son interface, chaque acteur peut délivrer ses informations et connaissances sur la situation et également

délivrer ses opinions et ses jugements sur les caractères de la situation ou à propos des autres acteurs avec lesquels il communique. Ces énoncés expriment en fait la vision du monde des acteurs. Chaque point de vue et chaque jugement est pris en compte dans l'ensemble des actes de communication, semblables à des actes de paroles [Searle 69]. Cette composante doit interpréter les appréciations des acteurs à partir de leurs communications et en faire automatiquement la synthèse.

Ontologie des connaissances : les catégories fondamentales du langage de communication

Le système d'interprétation des messages échangés entre les professionnels, doit représenter le sens de la situation à gérer coopérativement, c'est-à-dire représenter la structure et l'organisation de la perception de cette situation, au fur et à mesure qu'elle évolue et telle que les acteurs se la représentent. Pour cela, il est nécessaire de catégoriser les messages puis de définir une forme standard pour ceux-ci. Nous retenons cinq types d'énoncés :

10. le type "fait affirmé",
11. le type "question posée",
12. le type "jugement",
13. le type "ordre donné",
14. le type "action commentée".

Chaque message est composé d'un ou de plusieurs énoncés référant à ces cinq types. Le contenu cognitif des messages classés en énoncés typés est décomposé en catégories cognitives relatives au domaine des situations d'urgence. Nous faisons l'hypothèse que les informations échangées prennent place dans les quatre catégories cognitives suivantes :

5. les connaissances spatiales,
6. les connaissances temporelles,
7. les connaissances organisationnelles,
8. les connaissances de perception subjective de la situation.

Ces catégories se déclinent toutes selon divers traits sémantiques typiques [Jackendoff 1983]. La dernière catégorie apparaît ici comme fondamentale car elle traite des opinions propres à chaque acteur, qui peuvent être parfois mal comprises ou mal ressenties par les autres.

Cette catégorisation du discours permet de structurer les messages en énoncés appartenant à certains des cinq types, chaque énoncé étant constitué de divers traits sémantiques relatifs aux quatre catégories précédemment définies. A chaque trait sémantique, il sera possible d'attacher une estimation de son importance, sur une échelle subjective informée par l'acteur qui génère le message. Le langage de communication est donc contraint, ce qui correspond bien au caractère très technique du problème traité.

La forme des messages : les données communicationnelles

Chaque communication effectuée par un acteur est composée d'un énoncé à caractère objectif et de différentes qualifications exprimant la pragmatique de l'interprétation de l'événement ayant conduit à l'envoi du message. Les constituants langagiers appartiennent aux catégories précédemment définies. Cette forme communicationnelle, étendant le message à des éléments de sa pragmatique, constitue ce que nous nommons une *donnée communicationnelle* et est inspirée de la sémiotique triadique de Peirce [Peirce 1984], [Cardon 1997], [Durand 1999], [Cf. Fig. 10].

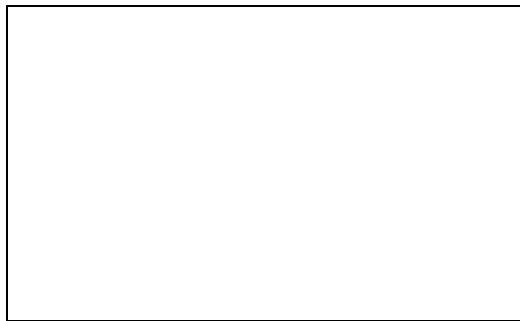


Figure 10. La donnée communicationnelle

Une donnée communicationnelle est composée d'une liste de triplets, structurable en arborescences, chaque triplet étant composé des entités suivantes :

3. *l'objet* courant évoqué,
4. les *qualifications* de l'objet évoqué,
5. *l'intensité* des qualifications.

Le premier caractère, l'objet, se représente par des signes typiques qui dénotent un certain fait énoncé (incendie, lieu, date, cause...). Le second précise l'interprétation de l'acteur sur ce qu'il évoque (jugement d'importance, affirmation de désastre..) et précise l'avis, le jugement de l'auteur du message, en enrichissant l'objet de la communication par des qualifications contextuelles [Evaert-Desmet 1990]. Le troisième caractère précise l'importance portée aux qualifications par l'émetteur du message, les valeurs étant subjectives.

Un objet, dans la communication, constitue un caractère cognitif et précise, pour l'opérateur, ce sur quoi porte son attention. Il est explicitement dénoté, à partir de listes d'icônes, de mots usuels choisis dans un lexique prédéfini (mais augmentable). Cela constitue la forme objective de ce qui est communiqué. Ce caractère se décline selon les traits sémantiques des trois premières catégories cognitives précédemment définies, qui sont ses particularisations. Ces traits sémantiques sont semblables aux catégories

sémantiques dites fondamentales utilisées pour la représentation du réel par le langage humain [Jackendoff 1983], [Cordier 1994].

Le second caractère cognitif composant la donnée communicationnelle précise la qualité et les aspects subjectifs du contexte de l'énonciation. Il se décline en nombreux traits sémantiques typiques de la catégorie perception de la situation ("doute, incrédulité, méfiance, défiance...").

A chaque trait sémantique du caractère précédent peut être associé une mesure qui en précise l'intensité et qui est représentée sur une échelle subjective ("importance négligeable, doute important, méfiance très forte...").

Considérons par exemple le message suivant, communiqué par un sous-préfet d'une région du sud-ouest de la France, un dimanche de début des vacances scolaires de printemps, alors que la circulation routière est particulièrement intense “ *Le sous-préfet ordonne de prendre en compte immédiatement des risques de pluies verglassantes importantes sur le département, car la situation nivo-météo dans le département voisin est préoccupante et peut conduire à une telle éventualité*”. Ce message est interprété, sous forme de donnée communicationnelle, par le schéma suivant :

- *précisions des justifications: vagues*
- *texte: le texte avec sa date précise d'émission*
- *envoyeur: sous-préfet*
- *receveur: tous les services de protection civile des départements de la région*
- *type: ordre énoncé sur situation pouvant être grave*
- *sujet: risque de pluies verglassantes fortes*
- *qualification du sujet: jugement sur situation = important, intensité du jugement = très forte.*
- *espace de la situation à risque: espace de la région*
- *précisions spatiales: vagues*
- *date de prise en compte du risque: dans les heures à venir*
- *précisions temporelles du risque: vagues*
- *fonction opératoire: ordre admissible car ce sont les prérogatives d'un sous-préfet*
- *justification de l'ordre: cause explicitée*

En l'absence de système d'interprétation, le message sera envoyé sous forme téléphonique à tous les services intéressés, à charge pour eux de le redéployer : SAMU, Pompiers, Mairies, services de voirie des communes, services de gestion des autoroutes... Et dans ce cas, à cause de la date particulière, il n'y aura pas d'accusé de réception dans la journée d'émission, où le temps restera d'ailleurs serin, avec un trafic routier intense. Le verglas tombera dans la nuit, très fortement et paralysera tout le nord du département : autoroutes bloquées, routes nationales et secondaires bloquées, secours paralysés sur place... L'objet du système est d'envoyer un tel message aux différents destinataires avec des interprétations personnalisées en termes de risques évalués pour l'émetteur et tous les récepteurs, et d'interpréter la situation courante lors des échanges ou des absences d'échanges entre les acteurs et de diffuser ces interprétations.

Système d'interprétation du sens des messages échangés : les organisations d'agents

Les données communicationnelles sont les connaissances explicites concernant une situation en cours de structuration. Ce sont des connaissances partielles, vagues, très contingentes du moment, du lieu et de l'opérateur qui les énonce, devant conduire, de manière incrémentielle, à la représentation globale et juste de la situation. Il est nécessaire, pour conserver la dynamique et la complexité de ce type de données, de disposer d'un *système d'interprétation* adaptatif des messages. Le médium de communication va donc remplir une fonction d'interprétation des données communicationnelles, en s'adaptant dynamiquement à leurs différents caractères cognitifs.



Figure 11. Les quatre organisations d'agents du processus d'interprétation

Pour cela, les caractères des données communicationnelles vont essentiellement être représentés par des agents réifiant les divers traits sémantiques, pour les augmenter automatiquement en introduisant des éléments de la pragmatique du discours et pour conserver le caractère d'action des données communicationnelles.

La structure du médium de communication est représentée par un ensemble de quatre organisations d'agents enveloppant en quelque sorte toute génération de donnée communicationnelle, pour l'interpréter. Ces organisations d'agents ont pour fonction de dégager le sens de l'ensemble des données communicationnelles et d'en produire des lectures contextuelles : synthèses, évaluations, positionnements, pertinences, intérêts, valeurs... Il s'agit donc, pour le système d'interprétation, de comprendre le sens des informations échangées et relatives à une situation décrite par parties, en tenant compte des plans préétablis, des données historiques et des connaissances sur les opérateurs eux-mêmes [Cf. Fig. 11].

La notion de comportement motivé pour un système d'agents

Tout processus d'interprétation, semblable à l'interprétation réalisée par l'esprit humain est fondé sur la représentation de la motivation de ce qui déclenche le processus d'interprétation, partant de l'objet d'attention pour en produire la désignation par ce que l'on nomme, en sémiotique, le signe [Peirce 1984]. Usuellement, en se limitant à un agent cognitif motivé, on introduit un niveau motivationnel en le munissant d'une structure particulière qui agit comme une fonction exprimant la volonté à effectuer sa tâche [McFarland & al. 1993]. Cette fonction de volonté est quantitativement mesurable, ce qui permet de valuer l'état d'avancement de la tâche de l'agent. Nous sommes dans un cadre strictement rationnel et symbolique, où la volonté et la motivation sont de fait des fonctions mesurables. Ces fonctions s'implémentent éventuellement sous forme de variables dites "essentielles", décrivant des domaines numériques non limités mais possédant un point attractif, la valeur nulle [Ashby 1960]. L'agent possède un ensemble fini de motivations bien dénotées, données a priori, et un système de régulation opère des choix parmi les motivations candidates. Ces motivations peuvent être hiérarchisées en différents besoins [Tzafestas 1995]. Le besoin fondamental de l'agent est de remplir sa tâche et ses besoins secondaires sont de permettre cette réalisation. L'agent doit donc avoir un comportement qui tend vers le besoin minimal, pour la valeur nulle des variables essentielles, dans lequel l'agent est satisfait et sa tâche accomplie.

Si l'agent n'a qu'une tâche à réaliser et que sa volonté est essentiellement de la remplir, il a plutôt un comportement d'automate et aucun caractère de génération de motivations nouvelles ne peut lui être attribué. Mais dans le cas où cet agent doit se fixer de lui-même des tâches non triviales selon la situation qu'il perçoit et conçoit, il doit opérer des activités cognitives semblables aux motivations d'un sujet humain [Nutin 1991] :

9. il doit se soucier de certains signes expressifs de son contexte,
10. il doit les concevoir comme des représentations lisibles et compréhensibles pour lui,
11. il doit élaborer des plans adaptés,
12. il doit enfin agir,
13. il doit ensuite évaluer la différence entre ses évaluations passées et les transformations opérées, pour analyser le sens de son action.

Pour ce cas plus complexe de motivation, l'accent est mis sur un point qui nous paraît central : avant de résoudre un problème bien posé et de définir des buts, l'entité qui interprète une chose du réel par un acte motivé doit générer un *souci* sur son environnement et sur elle-même [Riceour 1990]. Il ne s'agit pas du repérage d'une forme attendue du contexte, mais du fait que l'entité doit se situer d'elle-même dans son environnement pour concevoir la présence de cette forme, en s'identifiant comme un sujet qui conçoit son placement dans son monde. En fait, dans le comportement de l'entité qui réalise l'interprétation motivée, nous considérons comme centrale la génération de *sa* situation propre, conçue comme un positionnement continu dans son environnement.

Pouvoir se soucier d'une chose, d'un fait, d'une idée, à n'importe quel moment, est l'action première d'une entité effectivement motivée, à partir de laquelle va pouvoir se déployer

son processus de conception, de décision, d'action et d'évaluation de toute action. Eluder la question du *souci* revient de fait à supprimer la raison de toute motivation, à ignorer ce qui rend nécessaire l'action de l'entité. Ne pas considérer le souci ramène le comportement de l'agent à l'élection de choix mécaniques pour la résolution de problèmes, ce qui a été et est bien étudié, mais occulte le fait que l'entité puisse agir pour elle, pour être elle-même comme un sujet.

Nous concevons le système de production des motivations, c'est-à-dire du souci et de l'intentionnalité, comme devant être basé sur des *organisations d'agents* et non sur la structure d'un seul agent, en représentant cette production comme une reconfiguration d'un très grand ensemble d'agents que nous nommons des *paysages d'agents*. Nous nous plaçons donc à mi-chemin entre une démarche de type neuronale et structurelle et une démarche de type sémantique et symbolique, avec la notion de paysage reconformant constitué d'agents. Dans notre cas, l'ensemble des organisations d'agents se composera de quatre organisations réalisant ensemble le processus d'interprétation des données communicationnelles.

Les agents aspectuels

Les données communicationnelles, qualifiant tout message énoncé par les opérateurs, sont vagues, imprécises, insuffisantes pour caractériser un comportement rigoureux ou encore un jugement global précis : elles dépendent fortement de l'état mental courant de l'acteur. Elles seront représentées, pour correspondre à ces caractères fragmentaires, incomplets et dynamiques par des agents légers appelés *agents aspectuels*. Chaque agent aspectuel réifie une catégorie cognitive ou un trait sémantique relatif au discours sur la situation. Son action 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 de l'état des autres agents aspectuels actifs réifiant d'autres catégories cognitives. Ces agents seront effectivement très nombreux dans le système, plusieurs milliers par acteur.

Via l'interface de chaque acteur, toute donnée communicationnelle est sémantiquement interprétée par les agents aspectuels. Ceux-ci représentent, par leurs états et leur nombre, à la fois les caractères, c'est-à-dire les traits sémantiques et les liaisons sémantiques entre traits, ainsi que sa situation sémantique par rapport aux connaissances courantes dans le SIC, dans les relations entre cette donnée communicationnelle et toutes celles émises par les différents acteurs. L'action des agents aspectuels sur les bases de connaissances (les plans, les historiques, les scénarios..) va augmenter la connaissance des données communicationnelles.

Pour le même exemple, la donnée communicationnelle donne naissance, outre les agents liés strictement aux traits sémantiques, aux agents aspectuels suivants :

5. *agents de type ordre majeur* : ils correspondent à la catégorisation de l'ordre donné par le sous-préfet,

6. *agents en dualité avec ceux du type ordre majeur : agents d'attente d'accusé de réception des destinataires, d'intérêt, d'intensité d'attente,*
7. *agents de type action commentée : lancement d'opération motivée déclinée selon les précisions de l'ordre du sous-préfet,*
8. *agents de précision spatio-temporelle de l'opération : divers agents sur le cadre général de l'opération,*
9. *agent de type jugement affirmé : risque de pluie verglassante,*
10. *agent de type jugement de valeur : agent de certitude sur le danger, de force du danger,*
11. *agent de type doute : génération d'un agent de doute sur l'action engagée car la date et le lieu sont vagues (communications avec les agents spatio-temporels),*
12. *agent de type doute : génération d'un agent de doute sur la réussite du plan, car absence d'accusé de réception de l'ordre.*

L'interprétation de la situation, à ce niveau, permet d'informer l'émetteur du message de la faible chance de sa bonne prise en compte et d'être ainsi très attentif au suivi de l'action. Chaque récepteur du message aura non seulement le texte du message, mais sa demande d'engagement dans une action contrôlée hiérarchiquement. Il pourra ainsi répondre en émettant des doutes sur la justesse de la prévision.

L'action de l'organisation des agents aspectuels est, au niveau du processus d'interprétation, un processus de préconception [Nutin 1991], c'est-à-dire de génération d'une conception partielle de la situation à l'aide des connaissances dynamiques particulières portant sur les données communicationnelles (les catégories et sous-catégories instanciées). Ce caractère de localité de la compréhension des messages signifie que le sens organisationnel de l'ensemble des données communicationnelles, le sens effectif de la situation dans son entier, n'est pas encore dégagé à ce niveau, puisque les notions de besoin ou de but global ne sont pas encore prises en compte.

Le comportement d'un agent aspectuel est modélisé par un automate à quatre états appelé macro-automate [Cardon 1996]. Les quatre états [Cf. Fig. 6] sont : l'initialisation, la délibération, la décision et l'action. Ils correspondent au schéma de la décision linéaire [Sfez 1992] :

3. Dans le premier état, l'agent se réveille en filtrant un trait sémantique ou en étant éveillé par un autre agent. Il essaie de déterminer si la quantité et la force des traits qu'il réifie est suffisante pour que son processus soit initialisé.
4. Dans le second état, l'agent tente de déterminer si son contexte lui est favorable ou non. Pour cela, il va demander aux autres agents aspectuels amis (par ses accointances) des informations sur leur état. Selon celles-ci, l'agent passera dans l'état suivant ou reviendra en arrière, à l'état d'initialisation.
5. Dans le troisième état, l'agent va tenter d'imposer son point de vue aux autres agents aspectuels non alliés (à ses ennemis selon ses accointances) et va essayer d'infecter les agents opposés. Il agit sur le graphe de ces agents aspectuels ou génère des clones. Ces clones seront considérés comme des agents aspectuels nouveaux dans le système.

L'agent aspectuel peut éliminer certains agents faibles opposés ou au contraire en renforcer certains autres afin d'atteindre son but : se trouver dans l'état d'action.

6. Lorsqu'un agent réussit sa lutte contre ses ennemis, il passe dans l'état d'action. Dans cet état, il agit sur le macro-automate des autres agents opposés, en tentant de les altérer. Lorsqu'un agent aspectuel est dans cet état, on peut dire que la catégorie sémantique qu'il représente caractérise un point de vue significatif, pertinent de l'organisation d'agents liée à un acteur.

Chaque état d'un agent aspectuel est implémenté par un réseau de transition augmenté (Augmented Transition Network) permettant de filtrer les traits sémantiques du message courant analysé, en analysant lexicalement et sémantiquement les données communicationnelles. Lorsqu'un agent aspectuel appréhende une partie de message, il calcule la proximité entre la catégorie liée à certains traits sémantiques du message et sa propre catégorie. Selon cette proximité et en tenant compte de la valeur d'intensité du message, une transition sera franchie ou non. La proximité sémantique de la catégorie de l'agent par rapport à toutes les autres catégories est donnée sous forme matricielle, par une matrice de proximité sémantique. Une certaine structure représente dans l'automate le contexte de développement des états (si le passage à l'état suivant a été difficile, rapide, laborieux...), ce qui constitue la mesure des caractères organisationnels de l'agent.

Un paysage d'agents est, par définition, l'ensemble, considéré comme géométriquement représenté, des agents en relation de communication, soit :

1. l'ensemble des réifications, sous forme d'agents, des traits sémantiques contenus dans les messages reçus et émis par chaque opérateur,
2. l'ensemble des relations entre ces agents, représentant les proximités sémantiques des catégories réifiées par les agents,
3. toutes les structures permettant de classier ces agents selon des caractères géométriques typiques et déterminant, par cela, les caractères généraux des états et relations de l'ensemble des agents considéré comme une organisation.

Un tel paysage d'agents a, selon nous, la même signification et le même caractère dynamique que la représentation mentale d'une chose réelle observée par un humain [Cardon 1999]. Celui-ci, par son observation, perçoit des caractères du paysage et en conçoit une certaine représentation mentale : il en extrait des caractères, en élimine d'autres, en lie certains, en abstrait, en agrège, en sépare, tout en restant insensible à de nombreuses formes. Les structures dégagées dans le réel observé ont une correspondance dynamique avec celles de la représentation dans l'esprit de l'observateur. Les données communicationnelles constituées de textes, de schémas, d'images et de sons, considérés comme formant l'extérieur du système, ont une représentation dynamique dans le système d'agents.

Un paysage d'agents se représente graphiquement, dans le système, par des projections spécifiques selon des caractères organisationnels que nous avons définis précédemment. A chaque message envoyé ou reçu, les agents aspectuels agissent, pour leur compte et en tenant compte d'agents proches les renforçant ou bien lointains les inhibant, selon les

proximités sémantiques, et altèrent le paysage d'agents, en représentant par l'état courant de ce paysage, la mémoire dynamique de toutes les catégories et traits sémantiques des messages émis.

Les agents de morphologie

Le paysage des agents aspectuels constitue, pour le système d'interprétation, une pré-conception du sens des données communicationnelles. Un second système d'agents va, en opérant sur le paysage des agents aspectuels, en dégager les formes géométriques typiques, selon les dix caractères d'aspect d'un agent.

Les *agents de morphologie* sont basés sur les dimensions de l'espace organisationnel indiquant leurs caractéristiques. Les formes repérées dans la morphologie du paysage d'agents aspectuels représentent les façons de lire les caractères *générateurs* de la structure du paysage d'agents. Cette distinction de certaines formes représente l'intention du système d'interprétation à prendre en considération certains éléments géométriques, qui correspondent sémantiquement à des ruptures de sens, à des points de vue divergents, à des points de vue singuliers dans l'ensemble des données communicationnelles. Ces formes sont distinguées par les agents de morphologie, qui exhibent l'activité organisationnelle des agents aspectuels. Leur action est donc un mécanisme de génération des tendances à "faire sens" pour le paysage d'agents aspectuels. Ces agents seront relativement peu nombreux : quelques centaines par acteur.

Pour l'exemple déjà mentionné, des agents de morphologie s'activant sur le paysage des agents aspectuels seront :

- *agents de morphologie de singularité : repérage des agents de type maximum et minimum de tout caractère. Un maximum singulier est un agent aspectuel réifiant l'entité sous-préfet, qui n'a pas de majorant, et un autre sera le caractère fort du risque, qui est le caractère subjectif le plus important du paysage courant,*
- *agents de morphologie de contradictions : opposition agent de situation engagée - agent de doute sur la réalisation de la situation,*
- *agents de morphologie de concordances : concordance de caractères entre les agents spatiaux et temporels qui dénotent un caractère flou,*
- *agents de morphologie de non situabilité d'une forme : ce type d'agent de morphologie repère un agent aspectuel qui dénote un caractère définitivement vague. Ici, il s'agit du lieu où porte le risque et du moment où le phénomène verglas va intervenir : ils sont inconnus.*

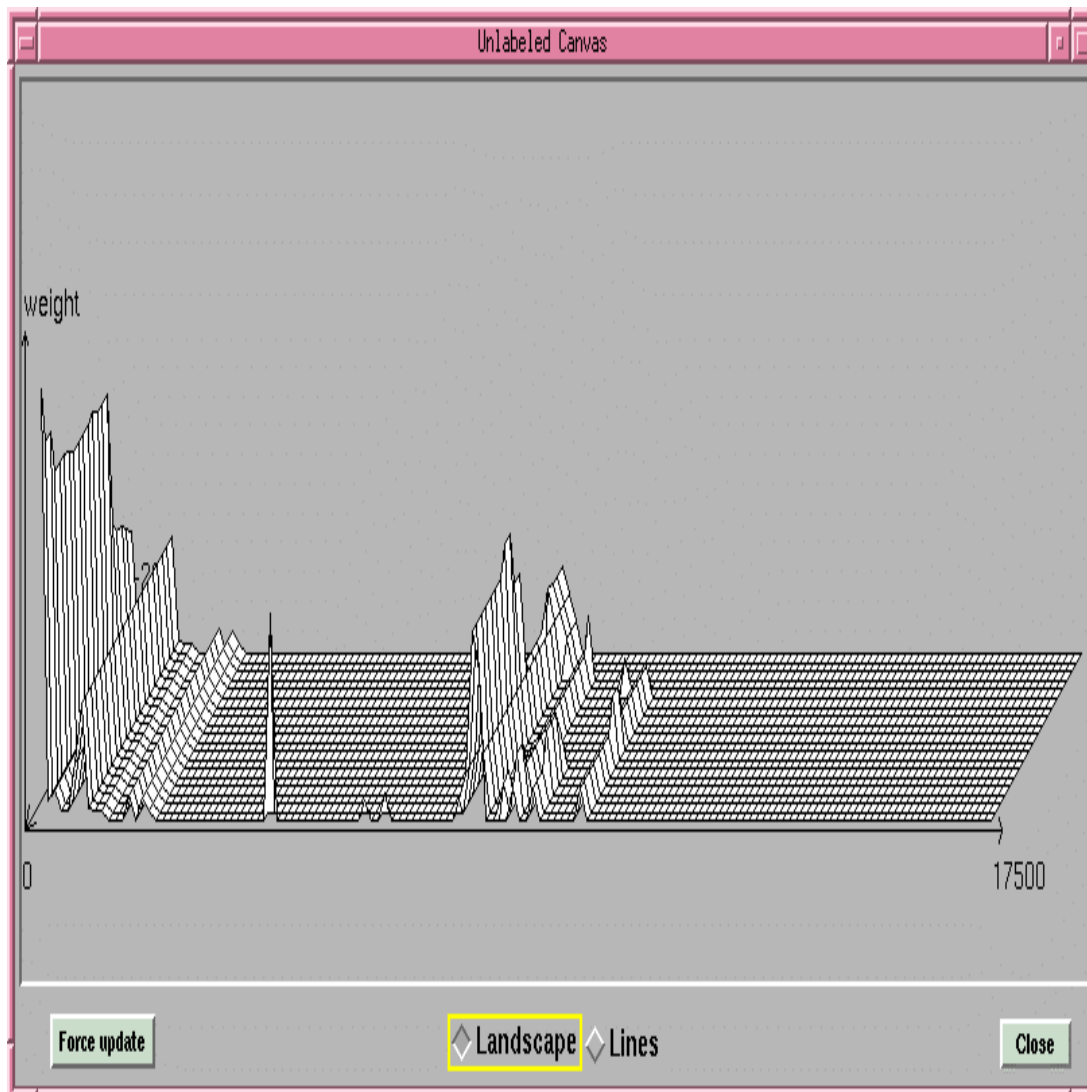


Figure 12. Paysage morphologique d'une organisation d'agents

Les agents aspectuels dégagent des caractères particuliers et ponctuels. Les agents de morphologie doivent tenter de dégager des formes générales *a priori* pertinentes dans le paysage des agents aspectuels selon les dimensions de l'espace morphologique. Pour réaliser cette extraction d'un caractère géométrique plus général que celui distingué par les agents de morphologie, ceux-ci vont devoir se grouper, s'associer, pour former des *chréodes* [Jorion 1989]. Une chréode est l'agrégation d'un groupe d'agents de morphologie proches selon les dimensions de l'espace morphologique, agrégation significative d'une forme géométrique devant conduire à la génération de la signification [Cf. Fig. 12]. C'est, dans le processus d'interprétation artificiel que nous construisons, l'expression d'une motivation possible par l'expression d'une forme, d'une prise en considération de certains caractères géométriques du comportement des agents aspectuels, donc du sens des faits communiqués.

Une chréode est formée d'agents de morphologie agrégés selon une distance dans l'espace morphologique. Dans l'exemple simple que nous avons présenté, les chréodes sont des groupes d'agents de morphologie instanciés selon quatre types : singularités, contradictions, concordances, non situabilité. Dans ces groupes qui se constituent, les agents de morphologie se renforcent pour donner plus d'importance à leur action de distinction de forme, de la même façon que le souci d'un observateur humain conduit son observation par focalisation d'un point de vue plutôt que par une lecture neutre et objective du réel environnant dans son entier.

Remarquons que si le paysage d'agents aspectuels constitue une forme de préconception de la situation exprimée par les données communicationnelles, les agents de morphologie ont comme rôle de faire émerger certains des traits saillants de ce paysage, de révéler ce qui va constituer certains aspects déclenchant du sens de lecture de ce paysage. Il s'agit bien d'un processus de *motivation artificiel* avant raisonnement (première partie du processus de motivation), où le système doit poser des normes, définir des seuils, dégager des traits géométriques, des différences et des similitudes, pour ensuite pouvoir procéder à une élaboration rationnelle bien conçue. Cette partie a été particulièrement étudiée dans le système que nous avons développé.

Les agents d'analyse

Une troisième organisation d'agents va prendre en considération les chréodes pour produire une analyse à partir de ces particularités, pour former une perception sémantique globale du paysage des agents aspectuels sous-jacents et donc de la situation d'urgence caractérisée à partir des données communicationnelles [Cf. Fig. 11].

Ces agents, appelés *agents d'analyse*, vont fournir les caractères significatifs au niveau sémantique à partir du paysage des agents aspectuels. Ils vont construire les traits généraux et significatifs des communications, les corrélations entre éléments factuels, les inadéquations aux plans d'action, les divergences dans les perceptions des décideurs à propos de la situation qu'ils gèrent. Principalement, ils vont utiliser l'ensemble des chréodes pour apprécier effectivement la situation représentée par les dialogues entre les acteurs, en la situant dans l'espace et le temps du phénomène : ils vont générer des analyses pour comprendre la situation dans son évolution, en se référant à des connaissances et scénarios de référence (des bases de cas). Ils vont proposer des évolutions probables de la situation exprimée par l'ensemble des données communicationnelles, en utilisant les bases de connaissances formées des plans préétablis, les données historiques (les études de cas semblables), les scénarios typiques (les cas d'école étudiés en simulation) et en générant des hypothèses [Lesage 2000]. Ces agents opèrent selon des buts rationnels, à partir des chréodes et en analysant les agents aspectuels sous-jacents. Ils constituent une organisation d'agents de faible cardinalité, quelques centaines par acteur, et qui se fonde sur des bases de connaissances locales et spécifiques, qui s'agrègent pour générer le sens général de la situation. Cela correspond bien à la cinquième partie du processus de motivation. Ces agents, qui reprennent les

grandes catégories de l'ontologie, ont un sous-système de connaissance basé sur les catégories suivantes :

Système de connaissance des agents d'Analyse

- Catégorie portée
- Catégorie génération
- Catégorie détails de constitution
- Catégorie contexte
- Catégorie évolution

Ces agents d'analyse sont activés à partir de la forme des chréodes, et opèrent comme de petits systèmes à base de connaissances concurrents. Ce procédé se ramène donc à celui utilisé dans un système expert distribué, dans lequel l'action des règles sur les faits serait remplacée par celle d'agents concurrents et communicants sur des structures augmentables et adaptatives que sont les agents d'analyse. De la même façon, les méta-règles opérant sur la sélection des règles sont remplacées par l'action de certains agents d'analyses à partir des chréodes.

Par exemple, un agent d'analyse de type "action", catégorisant un élément de la situation correspondant à un engagement effectif mené sur le terrain, a la structure produite comme en Figure 13 où sont précisées les catégories et les actions de prise d'information de l'agent d'analyse.

Catégories	Actions
portée <i>personne, groupe, institution, région</i>	catégoriser
génération <i>ordre donné, décision prise, observation faite</i>	tester l'unicité, la pertinence
détails de composition : <i>état, information chronologie sur et sous-domaines</i>	tester la sûreté, détecter les parties floues, faire des prospectives en s'appuyant sur les données historiques
contexte <i>de développement, de création</i>	augmenter la connaissance par analogies
évolution <i>temporelle et spatiale, connue, prévue, supposée</i>	réaliser des déductions et des inductions en utilisant les bases de connaissances

Figure 13. Catégories d'action d'un agent d'analyse de type action.

Dans l'exemple, les agents d'analyse activés par les chréodes seront de cinq types :

- *agents d'analyse producteurs d'histogrammes factuels : représentations interactives des traits sémantiques pertinents des données communicationnelles, selon différents points de vue proposés par les chréodes,*
- *agents d'analyse producteurs de statistiques : représentations de l'évolution des informations qualifiées, selon des thèmes proposés par les chréodes,*
- *agents d'analyse de jugement de la situation perçue par les acteurs : ce sont des agents analysant la cohérence de la perception de la situation par les acteurs eux-mêmes, en utilisant les connaissances disponibles dans la mémoire du système. Ces agents opèrent comme des systèmes à base de connaissances et génèrent des hypothèses plausibles pour établir la structure de la situation,*
- *agents d'analyse factuels, situationnels : ils produisent le placement de la situation dans un plan général d'action spatio-temporel et génèrent une évaluation organisationnelle de la gestion du phénomène,*
- *agents d'interprétation de la situation : ce sont les agents d'analyse les plus généraux, représentant en fait les formes typiques du paysage des agents d'analyse eux-mêmes. Ils correspondent aux agents de morphologie vus précédemment, mais à un méta-niveau. Ils interprètent la situation globale comme étant sous contrôle ou dévalant vers la crise.*

L'interprétation de la situation revient donc initialement à *placer* l'action dans son contexte : départ migratoire de vacances, jour férié, pas de cas météorologiques semblables connus pour une telle date en cette région ... et de faire un bilan précis des risques encourus, de fournir un schéma de l'évolution de la situation en cas du changement probable de certains paramètres dès les premières communications.

Les agents d'analyse ont donc comme objectif de déterminer le sens général de la situation perçue et décrite par ses acteurs dans les données communicationnelles, en utilisant une représentation dynamique de ces données communicationnelles et des agents aspectuels extracteurs de traits sémantiques. L'organisation d'agents d'analyse ainsi formée dégage un nombre réduit d'agents, contrairement à l'organisation aspectuelle dont le cardinal est très élevé, et qui construit les traits typiques de la situation. Les caractères de cette organisation sont donc simples : elle s'appuie, par les liens dynamiques de chaque agent d'analyse, sur les agents aspectuels et les chréodes qui constituent son substrat. Cette organisation représente, par émergence, *le* sens global de la situation, avec ses traits principaux étayés par les éléments pouvant les justifier et dégagés du substrat

Cependant, le système ainsi présenté ne réalise qu'un processus linéaire de génération du sens global de la situation, en conservant, il est vrai, les différents points de vue des acteurs, mais sans opérer selon un souci propre au système lui-même. Une dernière organisation d'agents, fondamentale, va doter le système d'un réel souci comportemental.

Les agents décisionnels

Les trois organisations d'agents, aspectuels, de morphologie et d'analyse, que nous appellerons *agents de situation*, réalisent un processus linéaire de représentation de l'interprétation de la situation proposée par les données communicationnelles. Le système doit, pour opérer effectivement un processus d'interprétation, effectuer de manière autonome des choix interprétatifs. Le mécanisme de choix ne peut pas être localisé dans les agents de situation, qui n'ont pas en eux capacité de décision, mais doit être représenté par l'action d'une organisation d'agents spécifique qui réalisera les choix d'action interprétative au niveau de la morphologie des organisations des agents de situation : ce seront les *agents décisionnels*. Cette organisation correspond en quelque sorte à l'introduction de patrons décisionnels dans le système [Bens & al. 1996]. Ces agents vont opérer des actions à bas et haut niveau, en agissant à la fois sur certains agents de situations et sur leur organisation. Cette particularité de produire leur action à deux niveaux, à deux échelles de représentation, constitue l'originalité de ces agents.

Les agents décisionnels vont pouvoir opérer sur les chréodes pour réaliser un choix de sélection sur les agents d'analyse à activer. Ils vont altérer certaines chréodes, en mettre en sommeil ou en amplifier d'autres, à la seule considération des divers paysages d'agents et de leur propre état. Ils vont également opérer sur les agents d'analyse, en altérant leur activation et ainsi en sélectionnant les inférences à approfondir. Ils vont également agir sur les agents aspectuels en altérant leurs états. Ils vont agir de manière *globale*, en opérant des décisions par inhibition de certains développements d'agrégations ou renforcement de certains autres et en considérant les trois organisations des agents de situation dans leur ensemble.

Les agents décisionnels permettent la cohérence d'action des trois organisations d'agents, en bouclant le processus d'interprétation. Ils agissent selon l'habitude acquise par le système, en prenant en compte des catégories différentes de connaissances ainsi mises en relation. Ce processus, délicat à stabiliser au niveau de l'implémentation, est le caractère typique qui permet de représenter, dans le système, le souci d'engendrer un certain processus d'interprétation plutôt qu'un autre. La décision d'interprétation prise par l'ensemble des organisations est ici encore une émergence, qui fait agir les agents d'analyse *sur* les chréodes, via les agents décisionnels, comme des patrons décisionnels.

Il y a un seul type très classique d'agent décisionnel, dont le comportement est encore représenté par un macro-automate à quatre états et l'action de ces agents est conduite selon quatre principes :

1. il existe une bonne adéquation entre les agents d'analyse et les agents aspectuels. Le système a bien fonctionné linéairement et, selon un principe de moindre énergie, il perdure dans le choix de ses chréodes courantes. Il informe les acteurs d'une situation contrôlée,
2. le système choisit d'activer les agents d'analyse les plus habituels, les plus conformes aux plans usuels et modifie les chréodes et les agents de morphologie dans ce sens. Le système a le souci de la normalité. Notons que sa fonction d'apprentissage, par renforcement des chréodes usuelles, va dans cette direction,

3. le système opère par bascule binaire sur la récession ou la promotion de certains agents de morphologie. Il génère des prises d'attention originales. Il peut aussi développer les agents d'analyse de sa propre morphologie, pour juger de la pertinence de ses analyses ou les modifier. Il exhibe des attitudes non standards, des positions singulières,
4. le système est conduit par des prégnances venant des agents aspectuels et des agents d'analyse, qui inhibent certains agents décisionnels [Cardon 1999]. Dans ce cas, le système est engagé par ce qu'il produit et ce qui le conduit à produire.

Dans l'exemple que nous suivons, un agent décisionnel opérant selon le second principe peut conduire les agents d'analyse à conclure à une situation définitivement sous contrôle puisque le sous-préfet la commande, et à la faute des opérateurs secondaires lorsque la situation dégénérera. Mais si un agent décisionnel opère prioritairement sur les chréodes selon le troisième principe, le système pourra être amené à considérer principalement l'inadéquation entre le lancement de l'opération et sa mise en œuvre, et chercher systématiquement les contradictions, les apories, la crise dans la crise, en négligeant les caractères hiérarchiques de la conduite de l'opération.

Ainsi, le processus d'interprétation produit par bouclage des agents décisionnels sur les autres organisations d'agents, conduit à un système qui produit une analyse plus ou moins partielle de la situation, non strictement rationnelle, et conduite par des *préoccupations* propres au système. Nous développons ainsi un système réaliste, en ce sens que son processus de décision opère sur des composantes abstraites de sa réalité, les morphologies d'agents, et pas simplement sur des entités prédéfinies, les catégories de connaissance des agents. Nous pouvons alors étudier la mutation, au sens génétique, de ces agents décisionnels, ce qui doit conférer au système d'interprétation certains caractères propres à une conscience artificielle [Weyrauch 1995], [Cardon 1999].

L'implémentation

Le système a été implémenté selon le paradigme agent, dans le langage Distributed-SmalltalkTM dans deux thèses de doctorat [Durand 1999], [Lesage 2000], en utilisant une plate-forme multiagent dédiée construite sur Smalltalk.

Dans le système, tout agent est considéré comme léger [Wooldridge op. cité]. Il est réifié par une instance de la classe " Agent " ou une de ses descendantes. Les différents types d'agents que l'on peut rencontrer sont situables dans une hiérarchie d'héritage à partir de la classe de base " Agent ", le premier niveau d'héritage étant représenté par les trois types d'agents les plus génériques : "Agent réactif ", "Agent cognitif " et "Agent hybride" [Cf. Fig. 14]. Un agent encapsule un processus non-préhemptible. Ce processus est créé en même temps que l'agent et consiste en une boucle sans fin qui appelle une méthode chargée d'effectuer les tâches de l'agent. Ce processus peut-être dans trois états : terminé, inactif (par défaut lors de la création) ou actif. Cependant l'état de l'agent est différent et subordonné au précédent état : la boucle d'activité ne peut-être effectuée même si l'agent

est actif. C'est un état interne à l'agent qui peut être consulté par d'autres agents, contrairement à l'état du processus qui lui, est "étranger" aux autres agents. Le système a permis de développer des organisations à plusieurs milliers d'agents par acteur.

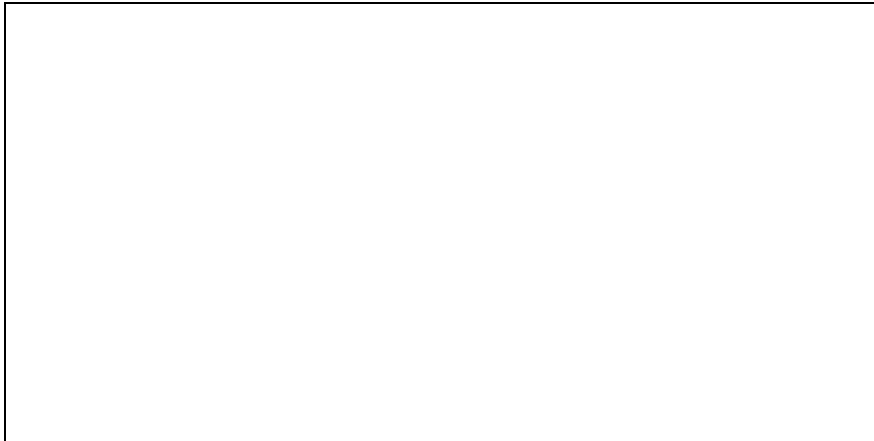


Figure 14. Exemple de hiérarchie d'agents

La plate-forme est intégrée dans l'environnement VisualWorks et s'appuie sur la notion d'objet "proxy" qui permet d'envoyer tout message sur l'O.R.B. du "middleware" Corba.

Ce système est actuellement réécrit en Java, en utilisant la plate-forme MadKit [Gutknecht 2000] et en utilisant la mobilité des objets sous Corba avec OrBakus pour assurer la mobilité des agents [Duvallat & al. 1999].

CONCLUSION

Nous avons présenté les systèmes multi-agents massifs comme des systèmes logiciels instables, dont le comportement développe des caractères émergents. Ces systèmes sont évolutifs, ils sont faits pour apprendre et pour s'adapter. Leur conception ne relève pas de la démarche usuelle produisant des spécifications complètes et une validation ferme. Ce ne sont pas des solveurs classiques de problèmes, mais des systèmes fonctionnant dans un temps orienté, dans celui de leur développement régulier.

Les intentions à la réorganisation, dans un tel système, utilisent les lois du non-équilibre des organisations d'agents aspectuels et sont réalisées par l'habitude acquise par le système à fonctionner comme il fonctionne usuellement. Le fonctionnement même altère des agents, en crée de nouveaux par clonage ou par reproduction. Mais des tendances se dessinent, qui sont les lignes d'habitude du comportement des organisations d'agents, selon le contrôle opéré par les agents d'évocation sur les agents aspectuels et qui engagent le système à générer tel état plutôt que tel autre. Ainsi, le système à des intentions implicites à s'engager dans certaines voies d'émergence, et déploie éventuellement ces intentions sous forme explicite, par exemple comportementale ou langagière. Un tel système *est* une mémoire organisationnelle qui opère par apprentissage implicite continu en s'auto-contrôlant. Il est auto-adaptatif par nature, ne pouvant pas ne pas l'être de par son fonctionnement même.

Le nombre des agents n'est pas fixe, ils ne sont pas stables, les communications entre eux sont variables, le fonctionnement est à la fois sensible aux conditions initiales et non déterministe. Il semble donc absolument vain de vouloir spécifier et contrôler *a priori* un tel système dans son entier, comme le Génie Logiciel nous apprend à le faire pour tous les systèmes informatiques. Il est nécessaire de chercher une autre voie de conception et l'agentification incrémentielle par apprentissage que nous proposons en est une.

Un tel système n'est plus un système que l'on entend comme achevé après sa construction, conçu et livré pour un usage technique à ses utilisateurs : c'est un artefact logiciel de système vivant.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ashby 1960] Ashby W.R., *Design for a brain: the origin of adaptive behavior*, Chapman & Hall, London, 1960.
- [Axelrod 1997] Axelrod R., *The complexity of Cooperation: Agent-based Model of Competition and Cooperation*, Princeton University Press, 1997.
- [Bens & al. 1996] G.S. Berns, T.S. Sejnowski, *How the basal ganglia make decisions*, in Damasio et al. *Neurobiology of Decision Making*, Springer, 1996.
- [Bertalanffy 1973], von Bertalanffy L., *Théorie générale des systèmes*, Bordas, Paris, 1973.
- [Bobrow - Fraser 1968] Bobrow D.G., Fraser J.B., *An augmented state transition network analysis procedure*, Proc. Int. Joint Conf. on AI, I, 557, 1969.
- [Booch 1994] Booch G., *Analyse et Conception orientées objet*, Addison Wesley, 1994.
- [Borodzicz & al. 1993] Borodzicz E., Aragonés J., Pidgeon N., *Risk communication in crisis: meaning and culture in emergency response organizations*, European Conference on Technology & Experience in Safety Analysis and Risk Management, Rome, 1993.
- [Brodie & al. 1992] Brodie M., Ceri S., *On Intelligent and Co-operative Information Systems: a workshop summary*, Int. Journal of Intelligent and Co-operative Information Systems, Vol. 1, No 2., p. 249-289, 1992.
- [Brooks 1999] Brooks, R., *Cambrian Intelligence, the Early History of the New AI*, The MIT Press, 1999.
- [Cardon - Dabancourt 2001], Cardon A., Dabancourt C., *Initiation à l'algorithmique objet*, Eyrolles, Paris, 2001.
- [Cardon - Durand 1997] Cardon A., Durand S., *A Model of Crisis Management System Including Mental Representations*, AAAI Spring Symposium, Stanford University, Californie, USA, 23-26 mars 1997.
- [Cardon - Durand 1997] Cardon A., Durand S., *A Model of Crisis Management System Including Mental Representations*, AAAI Spring Symposium, Communication publiée dans les actes, Stanford University, Californie, USA, 23-26 mars 1997.
- [Cardon - Guessoum 2000] Cardon A., Guessoum Z., *Systèmes multi-agents adaptatifs*, 8eme Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, p. 100, 116, ed. Hermès, Saint-Jean-la-Vêtre, France, 2-5 octobre 2000.

- [Cardon - Vacher 2000] Cardon A. , Vacher J.P., Galinho T., *Genetic Algorithm using Multi-Objective in a Multi-Agent System*, *Robotic and Autonomous Systems*, 33 (2-3) (2000) p. 179-190, Elsevier, 2000.
- [Cardon 1996] Cardon A., *Le caractère fondamental des systèmes finalisés : la complexité profonde*, Troisième Congrès Européen de Systémique, p. 951-956, Rome, 1996.
- [Cardon 1997] Cardon A., *A Multi-agent Model for Co-operative Communications in Crisis Management System: the Act of Communication*, 7th European-Japanese Conference on Information Modelling and Knowledge Bases, p. 111-123, Toulouse, 27-30 Mai 1997.
- [Cardon 1999] Cardon A., *Conscience artificielle et systèmes adaptatifs*, Eyrolles, Paris, 1999.
- [Clergue 1997] Clergue G., *L'apprentissage de la complexité*, Hermès, Paris, 1997.
- [Cohen 1995] Cohen D., *Simulating Organizations, Computational Models of Institutions and Groups*, AAAI Press, The MIT Press, California, USA, 1995.
- [Cordier 1994] Cordier F., *Représentations cognitives et langage*, Armand Colin, 1994.
- [Davis 1982] Davis R., *Report on the Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, in SIGART Nexletter, n° 80, pp- 13, 23, 1982.
- [Demazeau - Muller 1991] Demazeau Y., Muller J.P., *Decentralised AI 2*, North-Holland, 1991.
- [Dorigo & Colombetti 1998] Dorigo M., Colombetti. *Robot Shaping. An experiment in behavior engineering*, Intelligent Robotics and Autonomous Agents series, vol. 2. MIT Press, 1998.
- [Drogoul - Collinot 1998] Drogoul A., Collinot A., *Applying an Agent-Oriented Methodology to the Design of Artificial Organisations: a case study in Robotic Soccer*, *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, 1, (1), 1998.
- [Durand 1999] Durand S., *Représentation de points de vue multiples dans la couche communicationnelle d'un Système d'Information et de Communication*, Thèse d'Université, Université du Havre, décembre 1999.
- [Duvallet & al. 1999] Duvallet C., Sadeg B., Cardon A., *Real-time in multi-agents systems*, Proc CAINE'99, p. 212-215, Atlanta, USA, 1999.
- [Evaert-Desmedt 1990] Evaert-Desmedt, *Le processus interprétatif*, P. Mardaga, 1990.
- [Ferber – Gutknecht 1998] Ferber J., Gutknecht O., *A meta-model for the design and analysis of organizations in multi-agents systems*, Proc. of the 3rd International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS'98, p.128 – 135, IEEE Computer Society, 1998.
- [Ferber 1995] Ferber J. , *Les systèmes multi-agents*, InterEdition, Paris, 1995.
- [Giavitto 1998] Giavitto J.-L., *Dossier d'habilitation à diriger des recherches*, LRI URA CNRS 410, Université de Paris-Sud, Orsay, 1998.
- [Guessoum - Briot 1999] Guessoum Z. and Briot J.P., *From Active Objects to Autonomous Agents*, *IEEE Concurrency*. 7(3): 68-76, November 1999.
- [Gutknecht & al. 2000] Gutknecht O., Ferber J., Michel F., *La plate-forme Madkit et l'outil de conception Sedit*, Proc. JFIAD'2000, p. 281-284, ed. Hermès, 2000.
- [Jackendoff 1983] Jackendoff R., *Semantics and Cognition*, Cambridge, M.I.T. Press, 1983.
- [Jorion 1989] Jorion P., *Principes des systèmes intelligents*, Masson, 1989.
- [Kieras & al. 1985] Kieras D., Polson P.G., *An approach to the formal analysis of user complexity*, *Int. J. of Man-Machine Studies*, 22, p. 365-394, 1985.

- [Krogh 1995] Krogh Christen, *The Rights of Agents*, in Intelligent Agents II, IJCAI'95 Workshop (ATAL), p. 1 - 16, Springer Berlin, 1995.
- [Kuokka & Harada 1995] Kuokka D., Harada L., *On using KQML for matchmaking*, Proc. of First International Conference on Multiagent Systems, Menlo Park, CA., AAAI Press, USA, 1995.
- [Lapierre 1992] Lapierre J. W., *L'analyse des systèmes*, Syros, 1992.
- [LeMoigne 1990] Le Moigne J.-L., *La Modélisation des Systèmes Complexes*, Dunod, Paris 1990.
- [Lenat & al. 1990] Lenat D., Guha R.V., *Building Large Knowledge-Based Systems, Representation and Inference in the Cyc Project*. Addison Wesley Publishing Co. , 1990.
- [Lesage 2000] Lesage F., *Interprétation adaptative du discours dans une situation multiparticipants : modélisation par agents*. Thèse de l'Université du Havre, Décembre 2000.
- [McFarland 1993] McFarland D., Bösser T., *Intelligent behavior in animals and robots*, MIT Press, Cambridge, 1993.
- [Meyer 1996] Meyer J.-A., *Artificial Life and the Animat Approach to Artificial Intelligence*, in Boden (Ed.), *Artificial Intelligence*, Academic Press, 1996.
- [Morin 1986] Morin E., *La méthode, Tome 3 : La connaissance de la connaissance*, Essais, Seuil, 1986.
- [Müller 1997] Müller P.A., *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles Paris, 1997.
- [Muller 1998] Muller J.P., *Vers une méthodologie de conception de systèmes multiagents de résolution de problèmes par émergence*, in JFIADSM'98, Hermes, 1998.
- [Nutin 1991] Nutin J. *Théorie de la motivation humaine*, PUF 1991.
- [Peirce 1984] Peirce C.S., *Textes anticartésiens*, Philosophie de l'esprit, Aubier, 1984.
- [Pitrat 1993] Pitrat J., *L'Intelligence Artificielle : au-delà de l'intelligence humaine*, in "Le cerveau : la machine-pensée", DRT, D. de Béchillon, L'harmattan, 1993.
- [Poincaré 1893] Poincaré H., *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Gauthier Villars Paris, 1893.
- [Prigogine 1982] Prigogine I., *Physique, temps et devenir*, Masson, Paris, 1982.
- [Prigogine 1996] Prigogine I., *La fin des certitudes*, Ed. Odile Jacob Paris, 1996.
- [Rao - Georgeff 1991] Rao A.S., Georgeff H.P., *Modeling Agents within a BDI-Architecture*, in R. Fikes and E. Sandevll eds. Proc. Of the 2rd International Conf. On Principles of Knowledge Representation and Reasoning KR'91, p. 473-484, Cambridge Mass, Morgan Kaufmann, 1991.
- [Rao 1996] Rao A.S., *Decision Procedures for Propositional linear-time Belief-Desir-Intention Logics*, in Intelligent Agents II, Wooldridge, Müller, Tambe eds., Springer 1996.
- [Ricoeur 1990] Ricoeur P., *Soi-même comme un autre*, Seuil, 1990.
- [Searle 1969] Searle J. R., *Speechs Acts*, Cambridge University Press, 1969.
- [Searle 1992] Searle J.R., *La redécouverte de l'esprit*, NRF Essais, Gallimard, 1992.
- [Sfez 1992] Sfez L., *Critique de la décision*, Presses de la fondation nationale des sciences politiques, 1992.
- [Shrivastava & al. 1994] Shrivastava P., *Technological and organisational roots of industrial crisis: lessons from Exxon Valdez and Bhopal*, Technological Forecasting and Social Change, n°45, p. 237-253, 1994.
- [Steels & al. 1995] Steels L., Brooks R., *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence, Building Embodied Situated Agents*, Lawrence Erlbaum Associates, 1995.

- [Step 1994] STEP, *Peut-on modifier les processus mentaux de représentation et de décision en situation d'urgence*, Final Report, Contrat CEE STEP 90-0094, 1994.
- [Thom 1972] Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, W. A. Benjamin, INC, Reading, Massachusetts, USA, 1972.
- [Thorne & al. 1968] Thorne J., Bratley P., Dewar H., The syntactic analysis on English by machine, in D. Michie, *Machine Intelligence*, vol. 3, NY Elsevier, 1968.
- [Toft & al. 1994] Toft B., Reynolds S., *Learning from Disaster: a Management Approach*, Butterworth-Heineman, Oxford, 1994.
- [Tzafestas 1995] Tzafestas E., *Vers une systémique des agents autonomes: des cellules, des motivations et des perturbations*, Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1995.
- [Varela 1989] Varela F., *Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant*, Seuil, Paris, 1989.
- [Weyhrauch 1995] Weyhrauch R., *Building Conscious Artifact*, in "Consciousness, Distinction and Reflexion", Bibliopolis, 1995.
- [Wooldridge - Jennings 1994] Wooldridge M., Jennings N.R., *Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey*; Lectures Notes in A.I., 890, Springer Verlag.