



Conception de systèmes adaptatifs à fonctionnalité émergente: la théorie des AMAS

Jean-Pierre Georgé, Marie-Pierre Gleizes, Pierre Glize

► To cite this version:

Jean-Pierre Georgé, Marie-Pierre Gleizes, Pierre Glize. Conception de systèmes adaptatifs à fonctionnalité émergente: la théorie des AMAS. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série RIA : Revue d'Intelligence Artificielle*, 2003, 17 (4/2003), pp.591-626. hal-03818129

HAL Id: hal-03818129

<https://hal.science/hal-03818129>

Submitted on 19 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception de systèmes adaptatifs à fonctionnalité émergente : la théorie Amas

Jean-Pierre Georgé, Marie-Pierre Gleizes, Pierre Glize

IRIT Université Paul Sabatier,
118, Route de Narbonne,
31062 TOULOUSE Cedex, France
{george, gleizes, glize}@irit.fr

RESUME. Dans cet article, nous nous efforçons de présenter, de la façon la plus complète possible, une approche pour la conception de systèmes adaptatifs complexes, basée sur les systèmes multi-agents adaptatifs et l'émergence. Pour cela, nous décrivons tout d'abord la théorie des Amas (Adaptive Multi-Agent Systems). Cette théorie donne des critères locaux de conception des agents qui permet l'émergence d'une organisation au sein du système et donc également l'émergence de sa fonction globale. Puis, nous étudions une application en e-éducation utilisant cette théorie à travers son fonctionnement technique et des expérimentations qui sont ensuite discutées. D'autres applications (prévision de crues, e-commerce, routage téléphonique) sont également décrites, illustrant d'autres domaines où la théorie a été également appliquée avec succès. Finalement, nous caractérisons les phénomènes d'émergence dans ces applications et positionnons notre théorie par rapport à d'autres.

ABSTRACT. In this paper, we present, in an as complete as possible way, an approach for the design of complex adaptive systems, based on adaptive multi-agent systems and emergence. For this, in the first place, we introduce the Amas theory (Adaptive Multi-Agent Systems). This theory gives local agent design criteria so as to enable the emergence of an organization within the system and thus, of the global function of the system. Then, we describe an application in e-education built using this theory by explaining its technical working and some experiments, which are thereafter discussed. Other applications (flood prediction, e-commerce, telephonic routing) are also described, illustrating other domains where the theory has also been successfully applied. Finally, we characterize the emergent phenomena in these applications, and position our theory in relation with others.

MOTS-CLÉS : Systèmes complexes adaptatifs, apprentissage, systèmes multi-agents, émergence.
KEYWORDS : Complex adaptive systems, learning, multi-agent systems, emergence.

1. Introduction

L'objet de cet article est de présenter, de la façon la plus complète possible, une théorie guidant la réalisation de systèmes complexes adaptatifs, i.e. capables, grâce à un apprentissage, de répondre aux contraintes d'un environnement en constante évolution. Pour cela, nous prenons pour base le concept d'émergence et comme moyen technique les systèmes multi-agents adaptatifs par auto-organisation.

La résolution de problèmes avec les Amas s'articule ainsi autour de trois notions essentielles déjà énoncées : apprentissage, auto-organisation et émergence. Il y a apprentissage car le processus de résolution est incomplètement spécifié : au cours de son activité le système doit progresser à partir d'observations sur l'environnement. Cet apprentissage se réalise par un processus d'auto-organisation (coopérative pour les Amas) entre ses parties constituantes (que nous nommons agents). La solution obtenue est émergente (cf les paragraphes 1.2 et 1.3) car, ni la spécification initiale des systèmes ni son algorithme d'apprentissage n'ont à connaître ce qui devra être appris.

Dans la suite de l'introduction, nous exposons les motivations de notre démarche qui consiste à utiliser l'émergence dans les systèmes multi-agents comme moyen pour pallier les limitations des techniques actuelles. La deuxième partie explicite la théorie des Amas qui a guidé la conception des agents ainsi que la partie technique de l'application présentée dans la partie suivante. Cette application concerne la recherche et la mise en relation de sources d'information. Nous en présentons les aspects techniques ainsi que des résultats expérimentaux qui sont ensuite discutés. La quatrième partie donne un panorama de diverses applications réalisées, tandis que la cinquième partie positionne la technologie des Amas. Nous finissons bien sûr par une conclusion et des perspectives.

1.1 *Les limites de la conception humaine*

La puissance croissante des ordinateurs permet de traiter des applications de plus en plus complexes, complexité provenant des nombreuses entités en interaction qui sont autonomes, hétérogènes, évolutives. De plus, les nombreuses possibilités de connexions entre les différents matériels impliquent une prise en compte d'environnements dynamiques et de systèmes ouverts et hétérogènes. Des théories formelles permettent de représenter et de raisonner sur le temps, l'espace, et la dynamique d'un monde évolutif. Mais dans certaines situations, l'on peut aussi considérer que de telles spécifications sont inutiles, voire impossibles :

- L'environnement du système est dynamique, rendant inopérant l'énumération exhaustive des situations que le système rencontrera.

- Le système est ouvert¹ et donc dynamique car constitué d'un nombre variable de composants.
- La tâche à réaliser par le système est tellement complexe que nous ne pouvons pas garantir une conception parfaite.
- La manière de réaliser la tâche assignée au système est difficile, voire impossible, à appréhender dans sa globalité par le concepteur.

Que des systèmes artificiels puissent faire face à des situations réellement imprévues implique un axe de recherche aboutissant à une méthode de conception de systèmes différente de l'approche globale descendante traditionnelle fondée sur des modèles du monde.

1.2 Des phénomènes émergents

Le concept d'émergence et d'auto-organisation se retrouve dès la Grèce antique dans des écrits de Thalès et Anaximandre pour expliquer certains phénomènes que l'on n'arrive pas à décomposer.

En physique et chimie, les interactions entre des éléments simples donnent naissance à des structures complexes dotées de propriétés totalement nouvelles. En biologie, de nombreux systèmes naturels composés d'individus autonomes exhibent des aptitudes à effectuer des tâches qualifiées de complexes sans contrôle global. De plus, ils peuvent s'adapter à leur milieu soit pour y survivre, soit pour améliorer le fonctionnement du collectif. C'est le cas des colonies d'insectes sociaux tels que les termites, les fourmis [BON 97]. Le fonctionnement du système immunitaire est lui aussi représentatif du fonctionnement d'un système complexe composé d'un ensemble d'agents autonomes.

Des phénomènes non supervisés issus de l'activité d'un grand nombre d'individus s'observent aussi dans les activités humaines. Un phénomène très surprenant chez l'homme est celui de l'apparition de la conscience. *“La conscience est une propriété du cerveau de niveau supérieur ou émergente au sens tout à fait banal de "niveau supérieur" ou d'“émergent”...”* [SEA 95].

¹ La définition usuelle des systèmes ouverts porte sur la notion d'échange d'information avec l'environnement. C'est le sens indiqué par Hewitt [HEW 91] : *« Distributed Artificial Intelligence (henceforth called DAI) deals with issues of large-scale Open Systems (i.e. systems which are always subject to unanticipated outcomes in their operation and which can receive new information from outside themselves at any time) »*. Une autre signification, qui s'est surtout développée avec les systèmes multi-agents [COS 96], est celle de changement fonctionnel du système dû à l'entrée et la sortie libres de composants (ici des agents). C'est cette seconde acception que nous considérons dans la suite du texte.

1.3 L'émergence : objet d'études

Il faut attendre le milieu du XIX^e siècle pour voir apparaître un mouvement de pensée autour du concept de l'émergence [McL 97]. Ses débuts sont surtout caractérisés par la distinction que fait G. H. Lewes entre résultant et émergent : pour le résultant la séquence d'étapes qui produisent un phénomène est traçable, alors que ce n'est pas le cas pour l'émergent [LEW 75]. L'émergence ne se réduit ni à la somme ni à la différence des forces co-opérantes [KIM 00]. Les propriétés inter-reliées, communes qui permettent d'identifier un phénomène comme émergent sont :

- L'observation d'un phénomène ostensible (qui s'impose à l'observateur) et radicalement nouveau au niveau global ou macro, irréductible à des propriétés associées à des composants du micro niveau. *"D'une part, l'émergence présuppose qu'il y a apparition de nouveauté – propriétés, structures, formes ou fonctions –, et d'autre part, elle implique qu'il est impossible de décrire, d'expliquer ou de prédire ces nouveaux phénomènes en termes physiques à partir des conditions de base définies aux niveaux inférieurs"* [VIJ 97].
- La cohérence et la corrélation du phénomène (il a une identité propre mais liée fortement aux parties qui le produisent). *"L'émergence fait référence à l'apparition durant le processus d'auto-organisation dans un système complexe de structures ou de schémas ("patterns") ou de propriétés nouvelles et cohérentes"* [GOL 99].
- L'observation d'une dynamique particulière (le phénomène n'est pas prédonné, il y a "auto-maintien" du phénomène). Langton [LAN 90] définit l'émergence en termes de relation de feedback entre les niveaux dans un système dynamique. Les micro-dynamiques locales causent les macro-dynamiques et les macro-dynamiques globales contraignent les locales.

Depuis près de quinze ans, tout un champ de recherche s'est peu à peu créé autour de l'émergence afin d'en exploiter les caractéristiques si particulières au sein de systèmes informatiques [HOL 97]. *"Emergent Computation"* [FOR 90] est le terme employé en général pour désigner cet axe dans lequel se situent nos travaux. Nous pouvons résumer en quatre conditions l'existence d'une théorie de l'émergence :

1. Se situer dans le domaine de la théorie des systèmes,
2. Porter sur les parties du système,
3. Ne dépendre ni de la finalité du système ni de son environnement,
4. Etre indépendante du support sur lequel elle pourrait se matérialiser (biologique, technologique, ...).

1.4 Les systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents (SMA) sont des systèmes basés sur la distribution des connaissances et des contrôles répartis sur un ensemble d'entités appelées agents. Métaphore de l'organisation sociale, un système multi-agent est vu comme une société d'**agents autonomes** en interdépendance avec d'autres [WOO 02].

Autonomie, répartition des tâches, interactions, coordination sont autant de concepts inhérents au domaine des agents.

"Un agent est une entité virtuelle ou réelle qui est capable d'agir sur son environnement, qui possède des moyens de perception et de représentation partielle de son environnement, qui est capable de communiquer avec d'autres agents et qui est autonome dans sa prise de décision" [FER 95]. Son comportement autonome est la conséquence de ses observations, de ses compétences et des interactions avec les autres agents. Ainsi, selon l'application, des agents pourront créer d'autres agents, assisteront un utilisateur (agent assistant), se déplaceront dans un réseau (agent mobile), pourront faire de l'apprentissage, coordonneront les actions d'autres agents, détecteront des pannes, etc...

Une raison relativement consensuelle dans la communauté agent et multi-agent pour laquelle les SMA seraient concernés par l'émergence est donnée par Pfeifer : *"One of the main motivations to employ autonomous agents is the idea of emergence. Autonomous agents, by definition, behave in the real world without human intervention. One of the fascinating features of autonomous agents is that they exhibit so-called emergent behaviours, that is, behaviours not programmed into the agents by the designers"* [PFE 01]. Doter les agents d'un comportement autonome (et sans coder la fonction du collectif dans l'agent) peut effectivement entraîner un comportement collectif émergent. Mais l'autonomie des agents seule ne garantit pas un fonctionnement acceptable du système dans son ensemble car il y a peu de chances que le comportement émergent du collectif converge vers une activité désirée. Or, ce que nous cherchons à faire en tant que concepteur de systèmes ce sont des systèmes qui réalisent une fonction ou une activité donnée. C'est ainsi qu'une définition 'computationnelle' de l'émergence comprend deux parties, l'une définit ce que l'on veut faire émerger et l'autre la condition dans laquelle il y a émergence :

Objet - Un système informatique a pour finalité de réaliser une fonction adéquate à ce que l'on attend du système. C'est cette fonction, pouvant évoluer au cours du temps, que nous voulons faire émerger.

Condition - Cette fonction est émergente si le codage du système ne dépend aucunement de la connaissance de cette fonction. Ce codage doit contenir des mécanismes permettant l'adaptation du système au cours de ses échanges avec l'environnement afin de tendre à tout instant vers la fonction adéquate.

Nous nous intéressons plus particulièrement aux systèmes multi-agents adaptatifs. Au sein de ces systèmes, l'organisation des agents n'est pas fixe mais se transforme suivant les besoins du système et sa confrontation à l'environnement. Cette modification des interactions entre agents est appelée auto-organisation. Tout l'intérêt de ces systèmes se trouve dans l'émergence de structures organisationnelles adéquates à la tâche du système, ceci étant produit par les interactions entre les agents. Nous allons donc présenter une façon de construire et manipuler les systèmes multi-agents adaptatifs : la théorie des Amas.

2. La théorie des Amas (Adaptive Multi-Agent Systems)

Par principe, la finalité émergente d'un système connaissable discernable du système lui-même, son seul critère devra être de nature strictement locale (relativement à l'activité des parties qui le composent). Dans cette partie, nous apportons en premier lieu la justification théorique de l'interdépendance qui peut exister entre un comportement local coopératif et l'adéquation fonctionnelle de la fonction globale collective. Nous montrons ensuite comment cette théorie peut s'appliquer aux systèmes multi-agents adaptatifs.

2.1 Théorème de l'adéquation fonctionnelle

L'adéquation fonctionnelle d'un système est un jugement effectué par un observateur sur la pertinence de son activité dans l'environnement.

Théorème. *Pour tout système fonctionnellement adéquat, il existe au moins un système à milieu intérieur coopératif qui réalise une fonction équivalente dans le même environnement.*

La démonstration de ce théorème [CAM 98] se déduit de l'application de l'axiome² et des quatre lemmes présentés dans le tableau suivant par des opérations de surjection et d'inclusion d'ensembles.

Axiome et Lemmes	Explications
Un système fonctionnellement adéquat n'a aucune activité antinomique sur son environnement.	La véracité de cette assertion ne peut pas être prouvée, car il faudrait un observateur extérieur à l'activité de tous les systèmes évoluant dans un certain univers physique, tout en n'interagissant aucunement avec celui-ci afin de ne pas le perturber.
Tout système coopératif est fonctionnellement adéquat.	La démonstration s'appuie sur l'axiome précédent, car par définition un système coopératif n'a pas d'activité antinomique.
Pour tout système S fonctionnellement adéquat, il existe au moins un système coopératif S* qui soit fonctionnellement adéquat dans le même environnement.	La démonstration consiste en une expérience de pensée de déconstruction du système S pour en construire un nouveau S*. Elle est réalisée en quatre étapes : définir un algorithme de construction d'un système coopératif, montrer que cet algorithme se termine, montrer que le système coopératif obtenu est équivalent au système initial

² Cet axiome joue un rôle similaire, pour la classe des systèmes fonctionnellement adéquats, à la thèse de Church pour les fonctions effectivement calculables.

	pour l'environnement, montrer que le nouveau système est fonctionnellement adéquat.
Tout système à milieu intérieur coopératif est un système coopératif.	Le milieu intérieur correspond aux parties du système ainsi qu'aux supports physiques nécessaires à leurs échanges. Un système à milieu intérieur coopératif possède des échanges coopératifs avec son environnement, car ceux-ci sont un sous-ensemble des échanges que réalisent ses parties.
Pour tout système coopératif, il existe au moins un système à milieu intérieur coopératif avec une fonction équivalente dans le même environnement.	La méthode est identique à celle du lemme 2. La particularité réside dans l'objet de la construction qui est maintenant chaque partie du système.

Tableau 1 – *Récapitulatif du théorème de l'adéquation fonctionnelle*

Ce résultat permet de ne s'intéresser qu'à des systèmes très particuliers (à milieu intérieur coopératifs) pour obtenir des systèmes fonctionnellement adéquats dans un environnement donné. Ils possèdent plusieurs propriétés permettant de situer cette théorie dans les théories de l'émergence :

- Que l'application matérielle de cette théorie s'incarne ou non par des agents, elle se situe dans le cadre de la théorie des systèmes.
- Un système coopératif dans l'environnement est fonctionnellement adéquat, ce qui lui évite de connaître la fonction globale qu'il doit réaliser pour s'adapter.
- Même si un système n'a pas de but, il peut agir pertinemment dans son milieu. En fonction de ses perceptions de l'environnement, des représentations qu'il en possède et de ses compétences, il agira au mieux pour que son comportement soit coopératif.
- La notion de rétroaction n'est pas contraignante dans cette théorie car le système doit seulement juger si les changements s'opérant dans le milieu sont coopératifs de son point de vue sans savoir si ces changements sont dépendants de ses propres actions passées.

En conséquence, cette théorie vérifie les conditions que nous avons énoncées dans le §1.3 et qui la positionne comme une théorie de l'émergence. A la définition 'computationnelle' de l'émergence posée dans le §1.4, nous pouvons aussi ajouter un troisième volet qui précise la technologie Amas et dont nous montrons dans la suite du chapitre qu'elle se situe bien dans le champ des agents et multi-agents :

Méthode - Dans la technologie des Amas, pour changer la fonction il suffit de changer l'organisation des composants du système. Ces mécanismes sont spécifiés par des règles locales régissant l'auto-organisation entre les composants et ne dépendant pas de la connaissance de la fonction collective.

2.2 Adapter le système par ses parties

Spécifier un modèle a priori pour un système qui aura à faire face à des imprévus, c'est contraindre (peut être inopportunément) l'espace des possibles. Depuis Bertalanffy, de nombreux auteurs ont étudié des "systèmes de divers ordres qui ne peuvent s'appréhender par l'étude de leurs parties prises isolément." [BER 93], [ROS 75], [HAK 78], [MAT 80].

Un moyen d'apprendre pour un système S consiste à transformer sa fonction actuelle f_s de manière autonome (donc par auto-organisation) afin de s'adapter à l'environnement, considéré comme une contrainte qui lui est donnée (cf. figure 1). Chaque partie P_i d'un système S réalise une fonction partielle fp_i de la fonction globale f_s . f_s est le résultat de la combinaison -notée par l'opérateur " $\oplus$ "- des fonctions partielles fp_i (les flèches dirigées vers le haut dans la figure 1). La combinaison étant déterminée par l'organisation courante des parties, il s'ensuit que $f_s = fp_1 \oplus fp_2 \oplus \dots \oplus fp_n$. Comme généralement $fp_1 \oplus fp_2 \neq fp_2 \oplus fp_1$, transformer l'organisation (les doubles flèches courbées dans la figure 1) conduit à changer la combinaison des fonctions partielles et donc à modifier la fonction globale f_s , devenant par là même un moyen d'adapter le système à l'environnement.

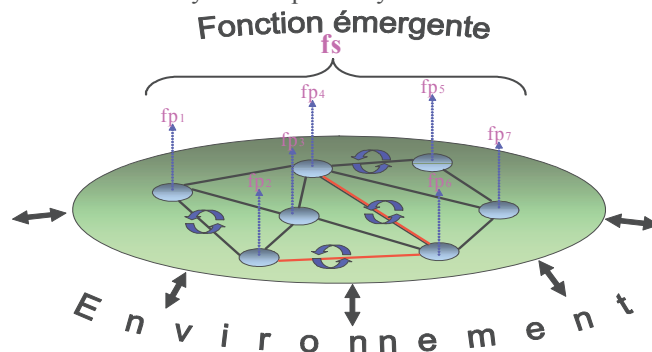


Figure 1. Adaptation par auto-organisation d'un système en interaction dynamique

Pour un système multi-agent, la mise en œuvre de cette adaptation implique que le concepteur ne s'intéresse qu'à l'agent (la partie P_i dans la figure 1) et lui donne les moyens de décider de manière autonome de changer ses liens avec les autres agents pour tendre vers une organisation coopérative. Ainsi, en fonction des interactions qu'a le système multi-agent avec son environnement (les doubles flèches extérieures au système dans la figure 1), l'organisation entre ses agents émerge et constitue une réponse pour faire face aux imprévus.

2.3 Les composantes d'un agent Amas

En elle-même, l'organisation qui émerge est une organisation observable non prédéfinie par le concepteur du système. Mais ce qui nous intéresse le plus c'est l'émergence de la fonction du système qui est produite par l'organisation entre les

agents à un instant donné. Pour réaliser cela, les agents sont programmés pour être en situation coopérative avec les autres agents du système. Cela se traduit par le fait qu'à tout instant, un agent reçoit les informations pertinentes pour réaliser sa fonction et qu'il transmet des informations utiles à d'autres.

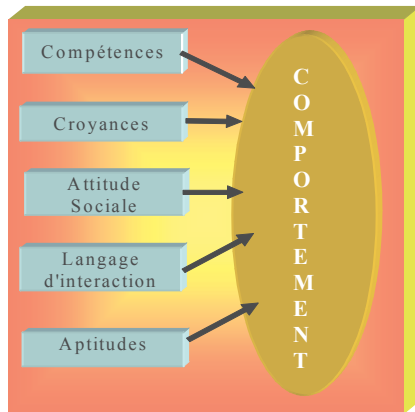


Figure 2. Composantes d'un agent

Un agent va pouvoir localement décider s'il est en situation coopérative. En effet, par rapport aux croyances qu'il a sur lui-même, il peut localement déterminer si ce qu'il reçoit est compréhensible et si ce qu'il reçoit lui permet de réaliser une action. De la même manière, en fonction de ses perceptions, il pourra juger localement si ses actions ont été utiles. D'une manière générale, cinq parties sont indispensables à un agent coopératif pour qu'un comportement collectif cohérent puisse être observé à partir de l'agrégation de comportements individuels.

1. Les compétences sont des connaissances d'un domaine particulier qui permettent à l'agent de réaliser la fonction partielle qui lui est assignée. Aucune contrainte technique n'est imposée pour le développement (système de production, méthode objet,...).
2. La représentation de lui-même, des autres agents et de l'environnement confère à l'agent une croyance sur ce que l'agent sait de lui-même, des autres et de son environnement. Les croyances peuvent être implicites ou explicites.
3. L'attitude sociale appelée la coopération permet de définir des critères locaux qui vont permettre à l'agent de décider de son comportement et de se réorganiser avec les autres agents c'est-à-dire modifier ses liens avec les autres agents. Elle est au cœur de la théorie.
4. Les agents ont un langage d'interaction qui leur permet de communiquer soit directement par envoi de messages soit indirectement par l'environnement (cf. figure 2).
5. Les aptitudes sont les capacités qu'un agent possède pour raisonner sur ses représentations et sa connaissance.

2.4 Les situations de non coopération

L'organisation d'un système est décrite par les liens d'interaction entre agents. Dans notre approche, un agent autonome considère qu'il a trouvé la bonne place au sein de l'organisation s'il interagit coopérativement avec autrui ; dans le cas contraire, il agira pour chercher une place plus adaptée. A chaque instant son comportement coopératif (de son point de vue) est guidé par ses compétences et croyances

courantes. Les conditions de non coopération conduisant au processus de réorganisation dérivent immédiatement de la définition de la coopération idéale :

$$\text{Non coopération} = \neg C1 \vee \neg C2 \vee \neg C3$$

- ¬C1 : Un signal perçu est incompris ou possède de multiples interprétations (ambiguïté). Dans ce cas, un agent coopératif ne va pas ignorer le signal car il le considère nécessaire à l'activité du système. Il va donc tenter de le transmettre à d'autres agents qu'il estime plus compétents ou bien se faire aider par autrui afin de lever les ambiguïtés.
- ¬C2 : L'information reçue est déjà connue ou n'a aucune conséquence logique. L'agent coopératif ne peut pas tirer profit de cette information pour transformer le monde, il va donc chercher d'autres agents qui pourraient en bénéficier.
- ¬C3 : Compte tenu de ses croyances courantes, l'agent considère que la transformation de l'environnement qu'il peut opérer n'est pas bénéfique à autrui. Cette situation englobe les notions de conflit et de concurrence qui sont fréquemment étudiées dans le domaine. Par exemple, un conflit de résultat peut survenir si l'agent aboutit à une conclusion opposée à celle d'un autre. Une concurrence est détectée si l'agent aboutit à des conclusions identiques à celles d'un autre.

Quand le système est plongé dans un environnement dynamique, de nombreuses situations imprévues du point de vue local d'un agent peuvent survenir, compte tenu de la fonction qu'il sait réaliser. Cette notion d'imprévu est définie par rapport à la fonction habituelle de l'agent. Sa capacité à répondre à cette situation imprévu, reconnue comme une situation non coopérative à ce moment, peut être considérée comme un traitement d'exception en programmation classique. A ces moments-là, un observateur du système peut assister à un processus interne de recomposition des fonctions partielles par la modification des relations entre les agents. Cette recomposition amène une transformation de la fonction globale du système tendant à supprimer les situations imprévues.

Ainsi, un agent réalise en permanence sa fonction partielle, mais il doit aussi agir simultanément sur l'organisation interne du système s'il détecte les situations de non coopération précédemment énoncées. La conception d'un système multi-agent coopératif consiste ainsi en la définition pour chaque composant - les agents - pris isolément de tous les états non coopératifs et les activités associées pour les supprimer (voir annexe 1).

3. Exemple d'application en e-Education

Les formateurs à l'information documentaire possèdent des compétences, un capital de savoirs et de savoir-faire qui sont incomplètement valorisés. Forsic facilite cette valorisation par la création d'une base de compétences professionnelle et pédagogique des formateurs, la gestion collective de ces compétences, ainsi que des ressources pédagogiques [LIN 00]. Ce système permet de connaître les besoins de formation à satisfaire, trouver les gens compétents capables d'apporter des solutions

à ces demandes, les ressources disponibles et pertinentes pouvant servir de support à ces formations (supports de cours, références bibliographiques, extraits d'ouvrages et revues).

Il ne s'agit pas seulement de faire un inventaire descriptif comme dans un système d'information, mais surtout de mobiliser les connaissances pour faire face à un problème de formation : nous parlons dès lors d'un système de compétences qui sont des connaissances en action. Pour satisfaire ces besoins, Forsic est bâti sur plusieurs technologies de l'information et de la communication :

- SEE-K et UMAP de la société Trivium™ -destinés au Knowledge Management- pour recueillir, stocker, traiter et cartographier les compétences. La philosophie qui sous-tend cette logique est celle développée par P. Lévy et M. Authier dans "Les arbres de connaissances" [AUT 93].
- Un modèle de l'enseignant pour la création de ressources pédagogiques personnalisées. C'est un document virtuel généré à partir d'une composition de fragments de contenus (texte, image ou son) en utilisant des scripts et des programmes et en définissant des liens vers d'autres documents.
- Les systèmes multi-agents adaptatifs pour prendre en compte la dynamique du domaine. Le logiciel développé dans cette partie de Forsic utilise la théorie des Amas et nous ne présentons dans cet article que des résultats issus de son fonctionnement.

3.1 L'objectif des Amas dans Forsic

L'application considérée porte sur la recherche de formateurs et de sources d'informations pertinentes à partir de descriptions textuelles de ces compétences. Mais ces compétences sont aussi fortement dynamiques :

- Les technologies documentaires évoluent constamment induisant des nouveaux contenus de formation, les informations ne sont plus valides, de nouveaux services sont offerts.
- Les besoins des apprenants sont aussi changeants car un même individu n'a pas besoin ultérieurement de la même formation (sauf exception).
- Les représentations que se forgent les formateurs sur leurs compétences ne sont pas toujours similaires à celles qu'en ont leurs apprenants. Un système de compétences complet doit être capable d'intégrer ces multiples points de vue.

Il est donc nécessaire que les connaissances mémorisées évoluent de manière automatique et en cours de fonctionnement sans demander une grande participation de l'utilisateur humain. Le système est vide au départ et se constitue au cours du fonctionnement, en se créant graduellement sa propre ontologie du domaine. De plus, le système à concevoir ne s'appuie pas sur une analyse sémantique des descriptions car en tant que concepteur on ne peut pas faire d'hypothèses sur cette sémantique : langue inconnue et domaine inconnu au début de la conception. On ne connaît ni le type de requête qui va être formulée (vague, précise, par mots-clés, par phrases...), ni le type d'informations à stocker par l'entité informatique.

Le système réalisé doit faire en sorte que l'organisation de l'ensemble des termes employés dans les descriptions textuelles soit proche de l'optimal pour donner des réponses pertinentes aux requêtes sur cette connaissance. Pour cela, nous avons conçu un système multi-agent adaptatif dont la finalité est de modéliser la sémantique du domaine par organisation émergente ; c'est ainsi que nous l'appelons : réseau sémantique (RS).

3.2 *L'architecture du réseau sémantique de Forsic*

Selon la méthodologie Adelfe, méthode de conception d'un système auto-organisateur par coopération [BER 02], il faut effectuer plusieurs étapes pour en spécifier totalement l'architecture :

1. En premier lieu, il est nécessaire d'identifier les échanges du système avec son environnement : environnement constitué par l'ensemble des utilisateurs de Forsic. Il perçoit des signaux dont il connaît a priori la structure mais pas le contenu : des connaissances qu'il va apprendre, des requêtes auxquelles il va répondre, des évaluations de pertinence quant à ses réponses de la part de l'utilisateur. Ce retour n'est pas une rétroaction au sens habituel des systèmes artificiels, car le réseau ne peut l'associer en aucune manière à une de ses actions antérieures pour deux raisons : le délai entre action et feed-back est totalement imprévisible et ce feed-back n'est pas distinguable des autres signaux reçus. En sortie le système fournit et classe les formateurs et sources documentaires qui répondent le mieux à la requête.
2. En second lieu, il est nécessaire de connaître toutes les parties qui composent le système. Les agents composant un RS ont des fonctions individuelles suffisantes pour obtenir le comportement collectif souhaité, en ayant des agents bien organisés. Les spécifications nous ont permis d'aboutir à un RS constitué de trois types d'agent (cf. figure 3). L'agent Interface est unique et son rôle consiste à initier l'activation du réseau et à collecter les réponses. C'est le seul agent existant à l'initialisation du réseau. Les agents de type Formateur (en nombre variable) qui représentent les experts du domaine. Les agents de type Terme encapsulent tous les termes des descriptions apprises par un RS. Ainsi, chaque mot n'a qu'un agent terme qui le représente, même s'il est présent dans plusieurs descriptions au cours du temps.
3. Ensuite identifier les fonctions partielles que réalisent chacune de ces parties en pensant que l'ensemble de leurs fonctions individuelles doit permettre d'obtenir par émergence le comportement collectif souhaité. Cette fonction, identique pour tous les agents, est une sommation seuillée (on dit que l'agent est "actif" s'il a reçu suffisamment de messages pour dépasser son seuil d'activation, "réveillé" si le nombre de messages est insuffisant et "passif" s'il n'a pas reçu de message). Toutes les situations non coopératives associées à leurs fonctions doivent être analysées et les réponses associées doivent être déterminées afin de les résorber.
4. En quatrième lieu, il faut gérer leurs influences (les flèches dans la figure 3) afin de transformer l'organisation pour en créer une plus adaptée aux sollicitations de l'environnement. L'interaction entre agents Terme s'effectue par messages dont le

contenu porte sur le résultat de l'activité ou l'information d'une situation non coopérative vers autrui.

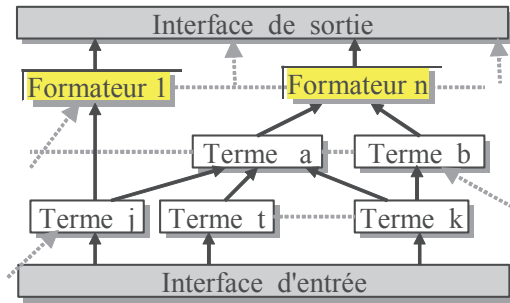


Figure 3. Organisation du RS.

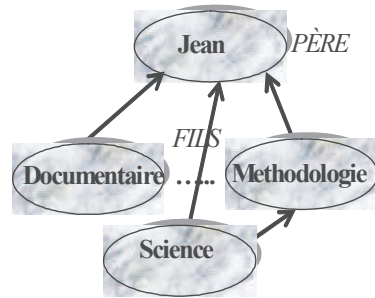


Figure 4. Relations 'père-Fils'.

3.3 Les règles d'auto-organisation du RS

L'apprentissage au sein d'un Amas est uniquement réalisé par auto-organisation. Pour détailler ce processus, nous employons les notations suivantes :

- D est la Description textuelle associée à la situation d'apprentissage et est constituée de termes qui sont (ou seront) encapsulés dans des agents du Réseau Sémantique.
- T_i et T_j sont deux agents, tels que T_j est le fils de T_i .
- $\omega(T_i, T_j)$ est l'influence (le poids) représentant la force de leur lien.
- $\Delta\omega$ est l'incrément standard appliqué pour ajuster une influence.
- $\Sigma\omega(T_j, \text{Fils})$ est la somme de toutes les influences des fils actifs de T_j .
- Threshold est le seuil d'activation standard d'un agent.

L'agent Interface est à l'origine de l'activation directe d'un agent Terme lorsque le terme que représente cet agent est présent dans D contenu dans un message ayant la syntaxe suivante : <Formateur ! Description>. La réorganisation est issue de l'étude exhaustive et locale à chaque agent de tous les cas de non coopération qui peuvent survenir (voir §2.4). Compte tenu de la fonction d'un agent Terme (une simple sommation d'influences), seulement deux situations non coopératives peuvent être localement détectées par l'agent T_j :

- 1) Incompétence. Le terme T_j n'est pas présent dans D mais T_i est réveillé et est ainsi considéré comme 'inconnu' par son père T_j . Cette situation est définie dans la formule : $[T_i \in D \wedge T_j \notin D \wedge \Sigma\omega(T_j, \text{Fils}) > 0]$. Dans cette situation, T_j ne devrait pas être un fils de T_i et devrait au contraire être un terme plus spécifique du domaine et par conséquent monter dans l'organisation. Dans ce cas, l'ajustement de l'influence est : $\omega(T_i, T_j) = \omega(T_i, T_j) + \Delta\omega$.
- 2) Inutilité. Les termes T_i et T_j sont présents dans D. Dans cette situation, donnée par la formule $[T_i \in D \wedge T_j \in D]$, T_j est inutile pour l'activation de T_i . La diminution de la force des liens devrait favoriser leur séparation si cette

situation apparaît fréquemment. L'ajustement correspondant de l'influence est :
 $\omega(T_i, T_j) = \omega(T_i, T_j) - \Delta\omega$.

Cet ajustement -qui résulte d'une instanciation du comportement de l'agent générique défini dans l'annexe1- permet aux agents de modifier leurs influences et donc conduire à modifier l'organisation du RS :

- Un agent monte dans l'organisation lorsque le poids sur le lien avec le père est supérieur à la valeur absolue du seuil d'activation, l'agent remonte dans l'organisation hiérarchique locale.
- Un agent descend dans l'organisation lorsque le poids sur le lien avec le père est nul, l'agent descend dans l'organisation s'il n'est pas au dernier niveau.

Il en résulte une nouvelle organisation qui peut être observée (voir §3.4) et qui permet au système d'améliorer ses réponses au cours du temps, donc une nouvelle fonction émerge. L'architecture et le fonctionnement que nous venons de spécifier ne suffisent pas pour déterminer les propriétés du réseau. Cela est d'autant plus vrai pour un système auto-organisateur par coopération dont les hypothèses initiales sont minimales laissant alors une large plage de comportements possibles.

3.4 Résultats expérimentaux

L'exemple que nous prenons est constitué de 13 formateurs qui sont des personnes physiques décrivant leurs compétences en utilisant des formes textuelles libres. Le corpus comprend 300 phrases environ correspondant à une terminologie de 531 termes plus ou moins spécifiques au domaine, par exemple "*Mise en place d'un programme d'enseignement de la méthodologie documentaire en 1er cycle essentiellement en adéquation avec la discipline de l'étudiant*". Lorsque les termes sont très spécifiques, c'est un élément de compétence très pointu qui concerne donc un nombre réduit de formateurs, qui seront par conséquent directement indexés par elles. A l'inverse un terme très générique et peu déterminant va aiguiller vers un nombre important de sous-secteurs un peu moins génériques ; eux-mêmes conduisant plus ou moins directement aux termes très spécialisés que nous avons vu précédemment.

Nous devrions donc aboutir à une forme d'organisation hiérarchique de termes comme peuvent l'être les thésaurus. Mais cela n'est pas suffisant car des termes spécifiques dans un contexte peuvent être génériques dans d'autres. Cela devrait ainsi conduire à une organisation peu nettement structurée, voire à des bouclages conduisant à certaines sous-structures en réseau (et non plus en graphe) exprimant la non-linéarité des relations entre certaines parties. Ce corpus restreint de descriptions et d'une dizaine d'exemples de requêtes (voir annexe 2) nous permettra d'observer assez finement l'évolution du RS et de son comportement.

3.4.1. Auto-organisation

Le résultat du processus d'auto-organisation doit aboutir à l'émergence d'une organisation entre les termes usités d'un domaine ; c'est une observation simple à faire dans le système. Tout terme nouveau est considéré comme spécifique car il n'a jamais été rencontré auparavant. En conséquence, il est directement rattaché au service dont la compétence est décrite. Mais s'il est beaucoup plus courant, il aura tendance à descendre dans l'organisation. Inversement, un terme a pu être fréquemment employé à un moment donné, mais ensuite devenir plutôt spécifique et il remontera dans l'organisation.

Dans le RS, nous avons sélectionné un échantillon représentatif de 8 termes parmi les 531 termes employés dans les descriptions textuelles des compétences de 13 formateurs en recherche documentaire. Pour chacun d'eux nous avons analysé leur position au sein de l'organisation émergeant de l'apprentissage. Ces résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous : chaque ligne est réservée à un terme et les valeurs de chaque colonne résulte de leur influence cumulée (la somme des influences vers tous les pères du terme) dans un niveau donné de l'organisation. Chaque agent qui représente un terme a des liens de filiation avec d'autres agents (normalement plus spécifiques). La force de ces liens est l'influence (une valeur entière). Une influence cumulée importante au niveau 1 indique que le terme est certainement spécifique pour la majorité des formateurs.

Niveaux d'organisation Termes	Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Documentaire	150	60	0	180	0	30	0	0
Internet	50	50	0	160	0	0	0	0
IST	50	50	0	70	0	30	0	0
Comment	40	0	0	20	0	90	0	80
Intranet	50	30	0	0	0	0	0	0
Sciences	130	140	0	90	0	70	0	20

Spécificité

↑

Intranet
Internet

IST

Sciences

Méthodologie
Documentaire

Comment

Non

Généricité

Figure 5. Organisation sémantique après deux phases d'apprentissage (C1 et C2)

Le tableau de la figure 5 donne leur placement (les colonnes C1) dans l'organisation sémantique après l'apprentissage des descriptions de 4 des 13 formateurs. Ces termes sont tous directement reliés aux formateurs (exclusivement au niveau 1) : à l'évidence le système possède encore une organisation interne non hiérarchique. Le peu de descriptions ne lui suffit pas encore à différencier les termes les plus pertinents des autres.

Maintenant nous terminons l'apprentissage en intégrant les descriptions de 9 autres formateurs (les colonnes C2 du tableau de la figure 5), correspondant à la création de 531 agents au total. La position des termes considérés dans le réseau a considérablement évolué et une différenciation de leur rôle (spécifique ou générique)

s'est opérée. Nous remarquons aussi que le nombre de niveaux est relativement réduit (cinq au maximum), mais offrant déjà une combinatoire très importante car la connectivité moyenne des agents du réseau est de l'ordre de huit.

Des informations du tableau de la figure 5, nous pouvons intercaler les termes sur une échelle de généricité-spécificité en comparant l'influence des termes deux à deux. Nous obtenons la gradation reportée sur l'échelle (cf. la partie droite de la figure 5), qui est relativement pertinente pour le domaine considéré. Les mots "non" et "comment" appartiennent au langage courant, ils sont descendus aisément dans les niveaux d'organisation. A l'opposé, les termes "Internet" et "Intranet" sont pertinents en recherche documentaire, mais seuls quelques formateurs ont la compétence correspondante et sont indexés par eux.

3.4.2. Adéquation fonctionnelle

Savoir si le système est fonctionnellement adéquat dans son milieu impose de décider si le processus d'auto-organisation entre ses agents le conduit à interpréter correctement les questions qui lui sont soumises et à restituer des réponses correctes. La pertinence des réponses ne peut être faite que par un observateur extérieur au système et compétent dans le domaine considéré car la sémantique du domaine est le résultat émergeant de son adaptation.

Pour étudier cette évaluation, nous avons considéré un corpus de 10 requêtes. Le graphique suivant (cf. figure 6) compare les réponses en termes de distance des réponses du système, relativement à la distance moyenne avec les réponses des trois experts. Par exemple la première requête posée est la phrase : *Je cherche une formation en méthodologie documentaire pour le 1er cycle en Economie ou Droit.*

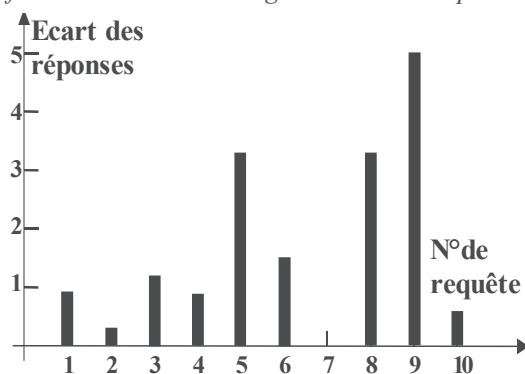


Figure 6. Comparaison entre les réponses des experts et les réponses du RS.

Un écart de 0 signifie que les réponses des experts et du système sont identiques et un écart de 5 que le système a donné des réponses qui ne se trouvent pas chez les experts. C'est le cas de la question N°9 (la phrase simple "*recherche documentaire*") qui est une requête considérée comme trop vague par le système et qui n'arrive donc pas à activer les représentations particulières qu'il s'est forgé pour les formateurs.

Les experts humains - tout en faisant des réponses nettement différentes - n'ont pas été bloqués par cette question peu significative. Malgré tout le système donne 7 fois sur 10 des réponses proches de celle des experts, sans compter qu'il existe aussi des désaccords entre eux. Nous pouvons donc considérer que le système a réussi à "faire émerger" une fonction qui

paraît satisfaisante, bien qu'aucune connaissance linguistique et contextuelle au domaine ne soit codée dans le système.

3.4.3. *Non linéarité*

La non linéarité implique l'existence de bouclages entre plusieurs parties du système. Cela fait que ces parties sont constituées en réseau et non en graphe. Dans la situation réduite que nous donnons dans cet article comme exemple, le système n'a créé aucun bouclage car il a créé une organisation strictement hiérarchique. Néanmoins, lorsque le réseau croît en complexité nous observons de nombreux bouclages qui sont automatiquement traités comme des auto-renforcements pour l'activation des agents ou au contraire comme des inhibitions. Mais nous n'observons jamais d'oscillations dans le réseau, car l'état stable est obtenu soit par l'activation de tous les agents dans la boucle, soit par l'inactivation de certains de ses agents.

3.4.4. *Stabilité du réseau*

Si les précédentes expériences montrent un processus effectif d'ajustement interne par réorganisation, il ne faut pas qu'il soit permanent, ce qui indiquerait une incapacité à apprendre des comportements adéquats dans son environnement. Pour étudier les perturbations que peut apporter l'enrichissement du RS, nous avons centré l'analyse de la réponse faite à la requête N°1 employée pour la mesure de l'adéquation fonctionnelle.

Le système après l'apprentissage complet avait donné 4 noms de formateurs pertinents. Nous avons interrogé le système avec cette même requête mais après l'apprentissage des descriptions de ces 4 formateurs uniquement. Le système n'a donné que 3 des 4 noms, cela indique clairement que les apprentissages suivants lui ont permis de modifier légèrement la représentation du domaine pour arriver à faire émerger ce quatrième formateur. Comme il effectue un classement des réponses par ordre de pertinence, il indique aussi que ce quatrième nom est la moins bonne réponse. Ce formateur a été indiqué par un seul des trois experts qui ont servi à tester le système. Nous pouvons ainsi dire que, si les descriptions des 9 formateurs suivants - qui sont dans le même domaine de compétence - ont effectivement modifié le comportement, elles n'en ont pas réellement affecté la pertinence.

3.5 *Analyse*

Les dépouillements de résultats indiquent nettement que le système est capable de réponses pertinentes. Nous avons aussi vérifié cela en donnant aux trois formateurs considérés les résultats de ses collègues et du RS : un seul d'entre eux a identifié le système artificiel. Il existe néanmoins des cas où il est incapable de faire des associations que l'humain réalise de manière tout à fait automatique. Le réseau est par exemple incapable de fournir de réponse à la question N°9 car il n'a pas de sémantique des mots issue d'un long apprentissage : les associations qu'il réalise ne

sont pas prédonnées dans un lexique, mais uniquement issues de l'auto-organisation car le réseau est initialement vide. L'apprentissage est toutefois très rapide car chaque description enrichit la représentation précédemment acquise, qui sera à son tour profitable à tous. L'intérêt évident de cette approche est multiple :

- C'est un système doublement ouvert car il accepte en permanence une nouvelle terminologie et de nouveaux formateurs.
- En conséquence, l'environnement dans lequel le système est plongé est aussi dynamique.
- Le processus d'auto-organisation, dont découle l'apprentissage du système est totalement indépendant des domaines d'activité dans lesquels se réalisent les échanges.

C'est uniquement l'activité du réseau qui est à l'origine de la réorganisation et par voie de conséquence d'information nouvelle. Ce fonctionnement se rapproche de ce que pense Varela de la cognition. *« La clef de voûte de la cognition est précisément sa capacité à exprimer la signification et les régularités ; l'information doit apparaître non comme un ordre intrinsèque mais comme un ordre émergeant des activités cognitives elles-mêmes »* [VAR 88].

Les réponses correspondant à la fonction du système, sont émergentes car non programmées dans les agents Termes. En effet, un agent Terme ne contient qu'un mot ce qui n'est pas une réponse en soi. Ceci confère au phénomène le caractère de nouveauté radicale. De plus, il exécute sa fonction au niveau local sans connaître les conséquences au niveau global, ce qui ne permet pas de prédire le comportement global du système. En effet, la contrepartie de la souplesse inhérente au processus d'apprentissage par les Amas est l'impossibilité de démonstration de la convergence du système, préalable à toute utilisation, car il ne possède aucun attracteur déjà virtuellement présent au moment de la conception. C'est une des raisons des expérimentations sur le RS dont nous avons donné quelques résultats dans cette partie.

4. Quelques autres résultats des Amas

Toute théorie des systèmes impose une obligation expérimentale car l'adéquation fonctionnelle est un jugement du comportement d'un système dans un environnement, jugement effectué par un observateur. C'est pourquoi nous présentons succinctement dans cette partie trois autres applications de la théorie des Amas dans des domaines très variés (prévision de crue, commerce électronique, routage téléphonique). Il ne s'agit pas de donner précisément l'architecture des systèmes développés, mais plutôt un aperçu de leurs performances. Cela permet ensuite d'analyser la nature des applications qui semblent pertinentes pour la théorie.

4.1 *Staff : Software Tool for Adaptive Flood Forecast*

La prévision des crues est un problème dynamique complexe car les paramètres explicatifs du phénomène sont nombreux et hétérogènes : hygrométrie, perméabilité et nature des sols, déclivité et superficie des terrains, pluviométrie, topologie des stations, temps de propagation... Les systèmes actuellement en place ont une approche physique de ce phénomène : plus les paramètres précédents sont bien connus et meilleurs seront les résultats des prévisions. Leur mise au point pour chaque station de prévision correspond à une charge de travail de plusieurs hommes*mois et il faut les recalculer au bout de quelques années car les conditions environnementales ont généralement changé. Des réseaux neuronaux ont aussi été employés dans ce domaine [VER 95], mais certaines limitations rendent difficile leur diffusion : il faut manuellement sélectionner les stations pertinentes, l'algorithme d'apprentissage n'est pas générique et il n'y a pas d'apprentissage en temps réel.

Staff est un outil de prévision auto-adaptatif dans tout environnement qui dispose de capteurs pour l'observation de ces phénomènes naturels [REG 02]. Il ne nécessite aucun paramètre prédéfini (tels que : la topographie des stations, la superficie des bassins, les temps de propagation entre stations amont-aval), car son ajustement est effectué une seule fois à l'installation du système sur des historiques de crues. Il est actuellement employé comme modèle pour 24 stations dans le logiciel d'annonce de crues SOPHIE de la Direction Régionale de l'Environnement dans le bassin supérieur de la Garonne. Ce "calage" des 24 modèles a été réalisé avec le même logiciel en une semaine à partir d'historiques de crues des stations concernées.

4.1.1. L'organisation de Staff

A chaque station où il existe un capteur de mesure (pluviomètre et rivière) un agent est associé. Le modèle de calcul utilisé pour effectuer une prévision est une somme pondérée de toutes les données d'entrée des agents : $P = \sum E_i * A_i$, où E_i est une donnée d'entrée et A_i l'influence associée, gérée par un agent.

La fonction de chaque agent est d'encapsuler sa donnée pour déterminer son influence dans la prévision que le système doit modéliser. Malgré sa simplicité, ce modèle n'est pas linéaire car l'ajustement des poids (la fonction de tout agent) dépend de leur valeur précédente et de l'influence actuelle des autres agents. A l'initialisation, le système est donc un réseau à deux niveaux à connectivité totale. Au cours des apprentissages, le réseau va se structurer de manière à ne considérer que les quelques paramètres d'entrée corrélés avec les résultats de sortie : à ce stade, le système a trouvé le modèle adéquat. Les agents ne connaissent pas la finalité du système global même s'ils y contribuent directement : l'auto-organisation coopérative entre les agents définit la manière d'ajuster continuellement le modèle relativement aux mesures d'entrée, aux résultats des autres agents et à l'erreur de prévision commise.

4.1.2. Résultats et analyses

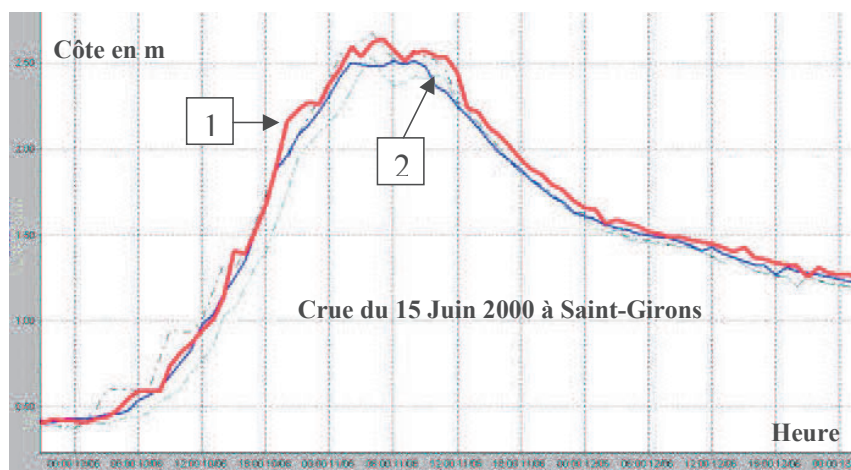


Figure 7. Station intermédiaire du bassin supérieur de la Garonne

Le système possède en permanence 500 entrées qu'il doit tenter de corrélérer avec la sortie désirée. Aucune indication relative aux paramètres hydrologiques habituels ne lui est fournie. La figure 7 est un exemple de prévision effectuée par Staff sur une station typique du bassin car elle est située entre l'aval et le plus amont. La courbe bleue (n° 2) est l'évolution réelle de la montée des eaux, les deux courbes en pointillés sont les résultats de modèles hydrologiques "classiques" pour des prévisions à 2 heures. Staff donne les résultats de la courbe rouge (n° 1), mais pour une prévision à 3 heures. Le modèle obtenu suit correctement l'évolution réelle, mais il est surtout particulièrement adapté dans la phase de montée des eaux, qui est un des points les plus cruciaux pour la prévision.

Staff réalise aussi des modèles très corrects pour des stations les plus amont du bassin en déterminant des corrélations avec des petits bassins adjacents à la station considérée : lorsque des précipitations font monter les stations sur les bassins adjacents, il est probable que ce même comportement va survenir dans quelques heures sur la station où s'effectue la prévision. Aucun modèle hydrologique actuel ne peut opérer dans cette situation car il manque notamment toutes les données indispensables sur l'évolution de stations qui seraient situées en amont.

Le problème habituel d'un algorithme adaptatif est sa difficulté à fournir une réponse optimale par le fait de la convergence vers des attracteurs locaux. Nous avons vérifié expérimentalement sur cette application (pour l'ensemble des stations) que la théorie employée supprime cet inconvénient, car quel que soit l'état initial du système, il tend vers la fonction souhaitée. Un élément d'explication de ce comportement des systèmes basés sur la théorie des Amas est donné dans la conclusion.

4.2 *Un système de commerce électronique adaptatif sur Internet*

L'ensemble des sites accessibles par le réseau Internet peut être considéré comme une collection considérable de fournisseurs de services et de clients qui ont respectivement des offres et des requêtes très dynamiques. Cela rend très difficile la réalisation d'une bonne fonction de courtage c'est-à-dire trouver les bons interlocuteurs qui répondent au besoin d'un utilisateur. Abrose (Agent Based Brokerage SErVICES in electronic commerce) est un projet européen ACTS faisant intervenir neuf partenaires³ et ayant pour objectif de concevoir un logiciel adaptatif pour améliorer cette fonction de courtage [ATH 99].

4.2.1. *Description*

Le cœur du système est constitué de plusieurs systèmes multi-agents auto-organisateurs [GLE 00] :

- Au niveau le plus général, se trouve l'agent de médiation qui représente un site où réside le système. Un agent de médiation connaît tous les agents de transaction qui se trouvent sur son site. Il a une mémoire collective mais synthétique des transactions réalisées sur son site.
- Au niveau intermédiaire, le système comporte un système multi-agent adaptatif d'agents de transaction qui sont sur le site. Un agent de transaction représente un client ou un fournisseur de services et agit pour son compte. Il connaît d'autres agents de transactions qui se trouvent sur le même site que lui. Un agent de transaction est créé automatiquement quand un nouvel utilisateur est enregistré.
- Au niveau le plus interne, les croyances qu'un agent a sur d'autres agents du même type que lui (médiation ou transaction) sont implémentées dans un système multi-agent adaptatif appelé réseau de croyances. Il y a donc un réseau de croyances par agent de transaction et de médiation. Cette fonction n'est pas présentée car elle est construite selon un principe similaire au réseau sémantique de Forsic, qui est détaillé dans la deuxième partie.

4.2.2. *Résultats et analyses*

Les agents de transaction coopèrent pour répondre à une requête ou pour propager une offre. Un agent de transaction est constitué de croyances, de compétences, d'un langage d'interaction et d'une attitude sociale. Les compétences correspondent aux compétences de l'utilisateur qu'il représente. Quand un agent reçoit un message, il l'interprète et agit en conséquence. Les croyances sont des représentations que cet agent a sur lui-même et sur d'autres agents de transaction. Ainsi chaque agent de transaction a son point de vue sur d'autres agents de transaction correspondant aux préférences de son utilisateur. L'attitude sociale est la coopération, elle guide leur comportement. Les agents de transaction coopèrent en échangeant des messages. Ils

³ Le consortium comprend : DT-Berkom, FT-CNET, Univ. of Toulouse, Univ. of Athens, Univ. of Madrid, Univ. of Berlin, Infomures from Roumania, Tradezone Ltd England, Dégriftour SA France.

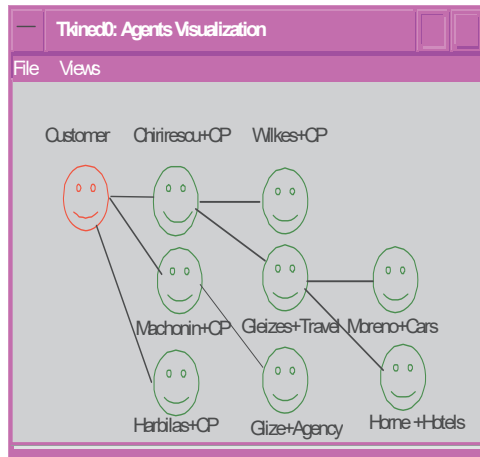


Figure 8. *Composition spontanée de services*

Machonin ne peut plus rendre le service mais il connaît un autre agent Glize+Agency (il a des croyances sur Glize+Agency) qui est une agence de voyages et qui fait des propositions de voyages à la mer. Comme il est coopératif, il envoie spontanément la requête de Customer à Glize+Agency. De la même manière, Chiricescu va envoyer la requête qu'il ne peut pas satisfaire. Par contre l'agent Gleizes+Travel qui n'offre que des voyages par avion ne répond que partiellement à la requête il va donc lui aussi envoyer la requête aux agents qu'il connaît susceptibles d'être pertinents. Par conséquent, un agent de transaction qui ne sait pas répondre à une requête ou à une offre qu'il reçoit peut faire appel soit à d'autres agents de transaction qu'il connaît et qu'il trouve pertinents (cf. figure 8), soit à l'agent de médiation qui a un point de vue général -mais imprécis⁴- sur la place de marché. Après une transaction, le client peut l'évaluer en sélectionnant un des trois jugements : "bon" s'il est satisfait de la transaction, "mauvais" s'il n'est pas satisfait, "peu importe" s'il ne veut pas l'évaluer. Ces notations sont utilisées par l'agent de transaction pour mettre à jour ses croyances. Ensuite, cette évaluation est envoyée à l'agent qui représente le fournisseur de services et à l'agent de médiation pour qu'eux aussi mettent à jour leurs croyances.

C'est un exemple typique dans Abrose qui montre que la fonction de courtage est améliorée par le comportement coopératif des agents de transaction, bien qu'aucune planification préalable ne soit câblée dans les agents. L'apprentissage du réseau de croyances (notamment par l'évaluation de l'utilisateur) accroît la coopération entre les agents de transaction et c'est grâce à la mise à jour de ses croyances que l'agent de transaction va s'adapter à son environnement c'est-à-dire aux autres agents de transaction en acquérant une représentation plus juste des autres.

⁴ Il doit en effet gérer des points de vue différents et parfois divergents sur l'ensemble des agents de transactions du site.

4.3 *Acheminement adaptatif du trafic d'un réseau téléphonique*

Un réseau téléphonique est constitué de trois éléments principaux : le centre de commutation qui achemine les appels téléphoniques, le faisceau qui se compose de circuits physiques acheminant les appels, le flux qui définit l'ensemble des tentatives d'appel (l'action de composer un numéro) ayant même centre origine et même centre destination. Aux problèmes courants de pannes physiques et de surcharges de trafic, viennent s'ajouter les inconnues liées à l'évolution de l'architecture du réseau téléphonique et à la connaissance incomplète et imprécise sur les trafics issus des nouveaux services [LEW 95]. Des lois de modélisation issues d'observation sur de grandes échelles de temps et de grands échantillons permettent d'avoir une évaluation du problème seulement pour des régimes de fonctionnement typiques (régime normal, régime de surcharge simple, ...) dont les transitions ne sont anticipables que dans certains cas (jour de l'An, jeux télévisés, ...). Cette somme d'imprécisions sur la nature des données, ajoutée aux inconnues liées à l'évolution générale des réseaux d'information, ne favorise pas une modélisation analytique du problème complexe de l'acheminement d'un appel.

4.3.1. *L'agent de commutation*

En respectant les caractéristiques physiques du réseau téléphonique de France Télécom et de ses composants (nature des mesures, action de gestion, ...), un système multi-agent auto-organisateur a été défini [DOT 99a], [DOT 99b]. Ce système est constitué par les organes du réseau téléphonique : les agents correspondent aux centres de commutation, les faisceaux bidirectionnels aux ressources gérées par ces agents. L'environnement est constitué par l'ensemble des demandes d'appel organisées en flux.

Chaque agent de commutation possède uniquement quelques connaissances locales sur le réseau : certaines caractéristiques des organes voisins telle la capacité totale des faisceaux adjacents, le trafic qu'il traite et celui transitant par ses faisceaux adjacents, la table d'acheminement des flux qu'il traite et qui fait partie de ses connaissances prédéfinies car il n'a pas la possibilité de les générer de manière autonome.

Chaque agent de commutation possède des aptitudes liées aux actions de gestion utilisables dans le réseau : aptitude à percevoir l'environnement (lecture d'un message issu d'un centre voisin) et aptitude à agir (polarisation de circuit, sélection d'un faisceau sortant, envoi d'un message vers un centre voisin).

4.3.2. *Comportements coopératifs*

Le comportement coopératif de base d'un agent de commutation est similaire à celui d'un centre de commutation réel dans une situation de fonctionnement normal : le volume de circuits alloués à la direction sortante légèrement supérieur au volume de circuits nécessaires au traitement des appels vers cette direction (marge de sécurité permettant d'absorber les variations de trafic entre deux périodes de mesures). De

manière duale, le comportement réorganisateur est activé par des phénomènes de surcharge du réseau téléphonique qui sont recensés dans la figure 9.

Situation de non coopération	Description de la SNC	Action d'auto-organisation
Pénurie de Ressources Partagées	Faisceau sortant qui entraîne un conflit d'allocation de ses circuits mixtes entre les deux centres adjacents.	Polarisation de circuit pour augmenter les capacités d'un faisceau sortant.
Pénurie de Ressources Individuelles	Saturation des capacités de traitement de l'agent courant qui ne va pas pouvoir traiter les demandes de ses voisins.	Réacheminement d'un flux pour changer le faisceau sortant emprunté par ce flux.
Flux en Débordement	Un des flux traité par le centre emprunte un faisceau autre que le faisceau direct, c'est-à-dire un chemin potentiellement non coopératif.	Envoi d'un message d'alarme pour modifier temporairement localement les contraintes de l'environnement.

Figure 9. Comportement de réorganisation d'un agent de commutation.

4.3.3. Résultats et analyses

Le simulateur Supermac développé par le CNET, a permis d'évaluer l'acheminement adaptatif (AA) sur différents types de réseaux téléphoniques conçus pour optimiser des politiques d'acheminement différentes utilisées chez les opérateurs téléphoniques. L'exemple présenté a été effectué avec le réseau non hiérarchique DEMO T, conçu pour la politique d'acheminement multiple intelligent (A.M.I) qui consiste à ordonner une liste de chemins possibles en fonction de la situation sur ces chemins (appel rejeté, appel en débordement), appel par appel. Le phénomène indiqué dans la figure 10 est une situation de surcharge locale grave de 4 flux sur 57. Sur l'exemple, mais aussi d'une manière générale pour chaque type de réseau, nous

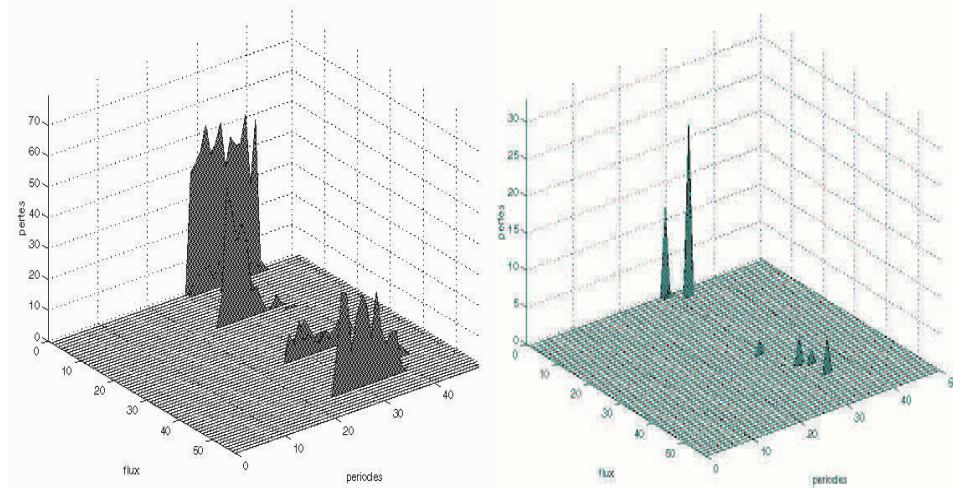


Figure 10. A.M.I (1373 pertes sur 13 flux).

A.A. (68 pertes sur 7 flux).

constatons que le nombre d'appels perdus diminue sensiblement avec l'Acheminement Adaptatif basé sur le principe des Amas. Ce dernier possède aussi deux avantages généraux importants comparativement à ces autres approches :

- L'adaptation se réalise sans aucun présupposé sur le type de problème d'acheminement pouvant être observé à un niveau global comme les pannes, les situations de crise,...
- L'adaptation est locale ce qui n'implique aucune dépendance de la politique A.A. envers l'architecture globale du réseau qui peut être dynamique (ajout ou suppression de centre, modification de la topologie).

5. Positionnement des Amas

Le théorème présenté dans le paragraphe 2.1 explique en quoi certains phénomènes dont les parties ont des activités corrélées –par le fait qu'elles sont dans un milieu intérieur coopératif- sont fonctionnellement adéquats. De tels systèmes possèdent les propriétés de phénomènes émergents énoncées dans le paragraphe 1.3. Ce théorème définit aussi une théorie de l'émergence (parmi probablement comme beaucoup d'autres à venir) car elle vérifie les quatre conditions énoncées dans le paragraphe 1.3. La théorie des Amas nous a conduit à une technologie Amas pour guider un système artificiel vers une organisation interne qui soit à milieu intérieur coopératif. Cette technologie implémente un système basé sur la théorie des Amas dans le cadre des conditions énoncées dans le paragraphe 1.4.

C'est ainsi que les applications présentées -qui respectent toutes le cadre technologique des Amas- ont des fonctionnalités émergentes, bien que cela ne s'impose pas toujours de manière évidente :

- Le Réseau Sémantique de Forsic est constitué de termes qui trouvent leur place dans l'organisation à partir de la corrélation d'activités avec leur voisin. Au macro-niveau, une capacité à catégoriser les compétences du domaine est observée. Elle n'est aucunement interprétable à partir des comportements au micro-niveau.
- Les agents de Staff 'encapsulent' des données provenant de l'environnement et déterminent leurs influences à partir de l'analyse de leur activité concurrente. Le résultat émergent est la sélection des données spatialement et temporellement pertinentes (inconnues du logiciel) permettant d'effectuer des prévisions.
- Les agents de transaction d'Abrose sont initialement 'indifférenciés' car sans aucune connaissance réciproque. L'analyse coopérative de leurs interactions conduit à une organisation optimale qui doit répondre au mieux aux besoins de leurs clients/fournisseurs associés.
- Le micro-niveau du réseau téléphonique adaptatif est constitué d'agents de commutation qui modifient localement l'acheminement de leurs flux pour être le plus coopératif avec leurs voisins. Au macro-niveau, l'acheminement des flux est performant (les résultats permettent de le supposer proche de l'optimal).

5.1 *Classification des applications*

5.1.1. *Le degré d'adaptation*

Toutes les applications que nous avons succinctement montrées sont des systèmes ouverts car ils admettent la création et la suppression d'agents sans modification du code. Les systèmes employant le principe d'auto-organisation coopérative sont de différents types :

- Les systèmes auto-organisés sont les plus simples car les compétences et les croyances de tous les agents sont fixes. En toute rigueur, la fonction globale f_S est toujours la même, mais le corpus du comportement collectif est tel que l'observateur a l'impression de ne jamais trouver le système dans la même situation. Par exemple, les agents-fourmis d'un système-fourmilière ont des croyances exactes et non modifiables sur la fonction de leur congénère (qui est identique à la leur). La fonction globale de fourragement du système-fourmilière est constante, mais les milliers de comportement locaux instantanés donnent l'impression que ce n'est pas le cas [TOP 99].
- Les systèmes auto-organiseurs qui modifient réellement l'organisation interne de leurs croyances (les croyances qu'ont les agents de transaction dans le commerce électronique, les agents "centraux téléphoniques", les agents de prévision de crues). Dans ce cas, les croyances de chaque agent sont seules capables d'ajustement. L'ajustement de croyance est une modification de fonction dans le sens le plus général du terme, donc un processus d'adaptation qui doit se régler selon notre théorie par auto-organisation coopérative.
- Les systèmes auto-apprenants qui modifient les compétences de chaque agent (les agents de médiation dans le commerce électronique). Cela induit que ce sont aussi des systèmes auto-organiseurs selon l'alinéa précédent car ils doivent adapter leurs croyances à leurs changements de compétences respectifs.

5.1.2. *La diversité*

Les applications sur lesquelles nous avons expérimenté la théorie de l'auto-organisation coopérative peuvent se classer selon plusieurs dimensions :

- La granularité des agents. Les agents les plus simples ont été conçus pour la prévision de crues, les réseaux de croyances dans le commerce électronique et Forsic. Les agents dont la plage de comportement est la plus variée, correspondent aux agents de commutation dans le réseau téléphonique. Au milieu, nous avons les agents de transaction du commerce électronique.
- La cardinalité d'agents. Les réseaux de croyances ont été employés avec plusieurs milliers d'agents ; tandis qu'un logiciel de prévision de crues en contient quelques centaines. Viennent ensuite les dizaines d'agents de transaction. Nous pouvons observer que d'une manière générale dans les applications développées, la cardinalité des agents est inversement proportionnelle à leur compétences individuelles.
- La résolution de problème. De nombreux problèmes peuvent s'exprimer par l'optimisation d'une fonction : trouver les composants du système qui réalise

cette fonction est appelé le problème direct : c'est typiquement la finalité en prévision de crues. Le problème inverse est de trouver la fonction d'un système lorsque les composants sont définis : nous trouvons ici le commerce électronique et la gestion du réseau téléphonique.

5.2 Des algorithmes d'exploration de solutions

L'adaptation autonome d'un système se réalise toujours relativement à un milieu dans lequel il est plongé. Ainsi, le processus d'adaptation n'est pas dans le système, ni dans son environnement, mais dans l'entre-deux. De ceci résulte l'idée générale selon laquelle le couplage de toutes sortes de variations spontanées avec n'importe quelle pression sélective d'un environnement correspond à une forme de mécanisme de recherche qui explore spontanément l'espace des possibilités. Au cours du temps, le système sera capable de trouver des combinaisons de caractéristiques qui sont des solutions plus ou moins stables aux problèmes que pose l'environnement. Mais il faut aussi avoir présent à l'esprit que, par son action, le système transforme l'espace des possibilités. « *Learning typically involves: 1. a learner, 2. a thing to be learned, 3. an environment in which the thing to be learned is exhibited to the learner, 4. the hypotheses that occur to the learner about the thing to be learned on the basis of the environment* » [OSH 86].

Le modèle neuronal et le modèle génétique sont des stratégies courantes pour l'exploration de l'espace de recherche. Comme dans la théorie des Amas, ils étudient les conditions "d'émergence" d'un comportement intelligent, issu de l'agrégation d'entités plus simples, qui ne soit pas directement "programmé" dans chacune d'elles.

Donald Hebb avait émis l'hypothèse en 1949 que les facultés d'apprentissage des réseaux biologiques sont dues à l'auto-organisation de leurs connexions sous l'effet des stimuli qu'ils reçoivent. Un modèle connexionniste est caractérisé par trois constituants de base : un réseau, une règle d'activation et une règle d'apprentissage [GRE 91]. C'est ainsi que nous pouvons réaliser un rapprochement intuitif avec l'architecture du réseau sémantique de Forsic. Mais l'architecture d'un RS est beaucoup plus souple tant du point de vue du nombre de parties que de leur organisation ; par exemple un RS est totalement vide avant sa première utilisation. De plus, l'apprentissage impose moins de présupposés initiaux comme l'ignorance de la fonction globale, l'absence de supervision et de rétroaction. Salomé et Bersini ont toutefois étudié un réseau de neurone formel - avec certains résultats initiaux intéressants, mais sans approfondir - dont les critères d'ajustement sont voisins de certaines activités auto-organisatrices d'un RS. « *Encouraged by these results, we suggest that algorithms for self-structuring neural networks should give more attention to local internal variables at the expense of global external ones. Such algorithms should be capable of "introspective" regards on how the network behaves and, if necessary to improve it, on how and where to help it by enriching its current structure* » [SAL 94].

Les années 70 ont vu l'apparition de nouvelles méthodes de conception de systèmes adaptatifs fondées sur une métaphore de l'évolution biologique. Un modèle génétique repose sur l'évolution d'une population dans un environnement selon des critères de survie préfixés [MIT 94]. La stratégie de l'algorithme repose sur un processus itératif qui remplace les individus les moins adaptés par les "enfants" issus de la reproduction de "parents" choisis parmi les plus adaptés. Les algorithmes génétiques semblent véritablement aborder les systèmes adaptatifs sans finalité prédéterminée. Mais le critère de sélection nécessite une connaissance de cette finalité, formulée dans l'optimisation d'une fonction d'évaluation. De plus, tout le fonctionnement est fondé sur une approche centralisée du contrôle (même s'il existe quelques variantes) et une connaissance parfaite dans ce contrôleur de l'ensemble de la population. En contrepartie, les individus ont un degré d'autonomie totalement inexistant.

Les modèles neuronaux et génétiques garantissent généralement, sous certaines conditions, l'obtention de solutions acceptables mais ont le désavantage de guider les systèmes par une forme de finalisme. C'est pour cela que leurs systèmes convergent vers des attracteurs déjà virtuellement présents dès la conception. Or, comme le souligne Atlan, « *cet état de choses est gênant, du point de vue de la méthode scientifique, en ce qu'il nie le principe de causalité, suivant lequel les causes d'un phénomène doivent se trouver avant et non après sa survenue* » [ATL 79].

6. Conclusion et perspectives

C'est parce que l'unicité d'un mécanisme générique d'apprentissage est rarement admise dans la communauté scientifique que des recherches sur l'apprentissage sont menées dans différentes directions. Cette opinion est par exemple énoncée par Minsky, « *I doubt that in any one simple mechanism, e.g., hill-climbing, will we find the means to build an efficient and general problem-solving machine. Probably, an intelligent machine will require a variety of different mechanisms. These will be arranged in hierarchies, and even in more complex, perhaps recursive, structures. And perhaps what amounts to straightforward hill-climbing on one level may sometimes appear (on a lower level) as the sudden jumps of "insight"* » [MIN 61]. Mais quelques autres comme Inhelder considèrent qu'une théorie générale d'apprentissage peut être concevable : « *Contrairement à l'assertion de Chomsky, qui affirme qu'il n'existe pas de théorie générale de l'apprentissage cognitif, nous sommes persuadés, pour notre part, que l'apprentissage de la connaissance correspond à un processus très général, qu'il s'agisse de connaissances logico-mathématiques, physiques, ou de connaissances ayant pour objet la langue naturelle* » [INH 79].

Selon notre point de vue, une théorie générale ne peut pas être tributaire de présupposés contraignants comme la connaissance de la fonction globale à réaliser, la connaissance de propriétés de l'environnement, ou d'un feed-back explicite environnement-système. Cela explique que les notions d'émergence et d'auto-

organisation soient fortement associées dans nos travaux. L'auto-organisation introduit des comportements, structures ou formes au niveau collectif qui sont nouveaux relativement aux comportements, structures et formes du niveau individuel : c'est l'émergence [FOR 91]. L'auto-organisation, telle que nous la considérons ici, ne nécessite aucun présupposé sur la finalité du système. Les agents qui le composent poursuivent seulement un objectif individuel (celui de rester les plus coopératifs possible) plutôt que de chercher à s'adapter par apprentissage individuel aux perturbations externes. Bien que le système ne possède aucune finalité programmée au niveau des agents (si ce n'est la coopération), l'auto-organisation conduit au résultat collectif souhaité par émergence.

La théorie des Amas constitue un guide pour concevoir un collectif adaptatif de manière simplifiée car le mode de conception est le constructivisme. Au lieu de partir de la fonction globale du collectif et de la décomposer en fonctions plus élémentaires, on commence par concevoir les agents (leurs fonctions élémentaires) ainsi que les critères locaux qui vont guider leur organisation collective : la détection et le traitement de situations non coopératives. Cette théorie laisse entrevoir l'émergence comme support à la conception des systèmes multi-agents adaptatifs. Les agents apprennent de manière collective puisque c'est grâce à leurs interactions qu'ils apprennent à réagir à un imprévu en modifiant leur organisation et par voie de conséquence la fonction globale. Les applications décrites dans l'article montrent la pertinence de l'approche.

Bien d'autres applications ont montré l'adéquation de cette approche émergente pour l'adaptation des systèmes artificiels, mais il reste encore un travail théorique conséquent à effectuer pour en déterminer les propriétés. Par exemple, nous n'avons jamais observé d'attracteurs locaux. Si cette méthode d'exploration semble insensible à un espace de recherche "chahuté" de la fonction globale, c'est que les agents l'ignorent et parcourent un autre espace, celui des organisations coopératives du système. Encore faut-il le démontrer. Un autre objectif est aussi la diffusion massive d'une méthodologie de conception de tels systèmes chez les développeurs : c'est la raison du projet national Adelfe (Atelier pour le Développement de Logiciels à Fonctionnalité Emergente) [CAS 00], [BER 02].

Les techniques d'apprentissage usuelles, qui nécessitent la connaissance d'une fonction de coût associée à la fonction globale, ne peuvent pas prétendre à l'émergence de phénomènes. C'est pour cela qu'elles rentrent dans les limitations du « No free lunch theorem » de Wolpert et Mac Ready. Ce théorème stipule que tous les algorithmes de recherche (déterministes et stochastiques) qui exploitent une fonction de recherche pour optimiser un coût ont des performances globalement identiques, car chacun d'eux est efficace compte tenu du biais introduit par la connaissance sur la fonction de coût [WOL 95]. Ils ont globalement tous la même efficacité pour un corpus suffisamment vaste et diversifié d'exemples : les algorithmes qui sont très bons dans une classe spécifique d'exemples sont très mauvais ailleurs, et ceux qui sont peu efficaces le sont néanmoins partout.

A l'inverse, toute théorie effective de l'émergence ne rentre pas dans le cadre de ce théorème car par principe la fonction à atteindre est inconnue, et il ne peut donc y avoir de fonction de coût associée. L'apprentissage fondé sur une théorie de l'émergence pourrait ainsi avoir la même efficacité quelle que soit la classe de problème. Cette brèche entr'ouverte est une raison passionnante supplémentaire pour étudier l'émergence dans les systèmes synthétiques.

Bibliographie

- [ATH 99] ATHANASSIOU E., CHIRICHESCU D., GLEIZES M.-P., GLIZE P., LAKOUMENTAS N., SCHLENKER H., LÉGER A., MORENO J., "Abrose : A Co-operative Multi-Agent Based Framework for Marketplace", *IATA, Stockholm, Sweden* August 1999.
- [ATL 00] ATLAN, H., "La finalité", Hors série Science&Avenir, 2000.
- [ATL 79] ATLAN H., "Entre le cristal et la fumée", Seuil 1979.
- [AUT 93] AUTHIER M., LEVY P., "Les arbres de connaissance", La Découverte, 1993.
- [BER 02] BERNON C., GLEIZES M.P., PICARD G., GLIZE P., "The ADELFE Methodology for an Intranet System Design" *Agent Oriented Information Systems (AOIS'02)*, dans le cadre de CAiSE'02, Toronto, 2002.
- [BER 93] BERTALANFFY VON, L., "Théorie générale des systèmes", Editions Dunod, 1993.
- [BON 97] BONABEAU E., THERAULAZ G., "Auto-organisation et comportements collectifs : la modélisation des sociétés d'insectes", In *Auto-organisation et comportement*, Editions Hermès, 1997.
- [CAM 98] CAMPS V., GLEIZES M.-P., GLIZE P., "Une théorie des phénomènes globaux fondée sur des interactions locales", *Actes des Sixième journées francophones IAD&SMA Pont-à-Mousson*, Editions Hermès, Novembre, 1998.
- [CAS 00] CASTERAN J.-C., GLEIZES M.-P., GLIZE P., "Des méthodologies orientées multi-agent", *Actes des Huitième journées francophones IAD&SMA*, Editions Hermès, Novembre 2000.
- [COS 96] COSTA A.C.R., DEMAZEAU Y., "Toward a formal model of multi-agent systems with dynamic organizations", *Proceedings of the Second International Conference on Multi-Agent Systems*, AAAI Press/ The MIT Press, Kyoto, 1996
- [DOT 99a] DOTTO F., "Acheminement adaptatif auto-organisé par coopération", Thèse de l'Université Paul Sabatier, Décembre 1999.
- [DOT 99b] DOTTO F., TRAVE-MASSUYES L., GLIZE P., "Acheminement du trafic d'un réseau téléphonique commuté par une approche multi-agent adaptative", *Congrès CCIA*, Girona, 1999.
- [FER 95] FERBER J., "Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective", *Éditions InterEditions*, 1995.

- [FOR 90] FORREST, S., "Emergent computation: self-organizing, collective, and cooperative phenomena in natural and artificial computing networks", *Proceedings of the ninth annual CLNS conference*, 1990.
- [FOR 91] FORREST S., "Emergent computation : Self-organizing, Collective, and cooperative phenomena in Natural and Artificial Computing networks", *Special issue of Physica D*, MIT Press / North-Holland, 1991.
- [GLE 00] GLEIZES M.-P., LINK-PEZET J., GLIZE P., "An Adaptive Multi-Agent Tool for Electronic Commerce", *9th IEEE International Workshops on Enabling Technologies - Infrastructure for Collaborative Enterprises WET-ICE2000*, June 2000
- [GLI 99] GLIZE P., GLEIZES M.-P., LÉGER A., "Brokerage communication in a cooperative multi-agent based mediation service : one example in Abrose", *Foundation for Intelligent Physical Agent*, Proceedings CFP6_016, 1999.
- [GOL 99] GOLDSTEIN, J., "Emergence as a Construct : History and issues", *Emergence Volume 1, Issue 1, pp 49-71*, 1999.
- [GRE 91] GREENWOOD D., "An overview of neural networks", *Behavioral Science*, January, 1991.
- [HAK 78] HAKEN H., "Synergetics, an introduction". *Springer, Berlin*. 1978.
- [HEW 91] HEWITT C., "Open information systems semantics for Distributed Artificial Intelligence", *Special volume foundations of Distributed Artificial Intelligence*, Elsevier Science Publishers B.V. Vol.47, 1991
- [HOL 97] HOLLAND, J. H., "Emergence – from Order to Chaos", *Addison-Wesley*, 1997.
- [INH 79] INHELDER B., "Théorie générale de l'apprentissage", *Théories du langage, théories de l'apprentissage - M.Piatelli-Palmarini Coordinateur*, Editions du Seuil, 1979.
- [KIM 00] KIM J., "L'émergence, les modèles de réduction et le mental" *Philosophiques*, vol.27, n° 1, 2000
- [LAN 90] LANGTON C., "Computation at the edge of chaos, Phase transition and emergent computation", *Physica D Vol.4*, 1990
- [LEW 75] LEWES G.H., "Problems of life and mind", *London : Kegan Paul, trench, Turbner, &Co*, 1875.
- [LEW 95] LEWIS L., "Artificial Intelligence and intelligent networks in the 1990s and into the 21st century", *Worldwide Intelligent Systems*, 1995.
- [LIN 00] LINK-PEZET JO, GLEIZES MARIE-PIERRE, GLIZE PIERRE, "FORSIC : A Self-Organizing Training System", *6th conference on Information Systems Analysis and Synthesis ISAS 2000, Orlando USA*, 2000.
- [McL 97] McLAUGHLIN B. P., VARELA F., "Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living". London. *D. Reidel Publishing Company Holland*, 1980.
- [MAT 80] MATURANA H., "Emergence and supervenience". *Intellectica – Emergence and explanation*, 1997.

- [MIN 61] MINSKY M., "Steps toward artificial intelligence", *Proceedings of the IRE*, January 1961.
- [MIT 94] MITCHELL M., FORREST S., "Genetic algorithms and artificial life", *Artificial Life*, 1994.
- [OSH 86] OSHERSON D. N., STROB M., WIEINSTEIN S., "Systems that learn", *The MIT Press*, 1986.
- [PFE 01] PFEIFER R., SCHEIER C. "Understanding intelligence" *The MIT Press*, 2001.
- [REG 02] REGIS C., SONTHEIMER T., GLIZE P., GLEIZES M.-P., "STAFF : un système multi-agent adaptatif en prévision de crues", *Actes des Dixièmes journées francophones IAD&SMA*, Editions Hermès, 2002.
- [ROS 75] DE ROSNAY J., "Le microscope - vers une vision globale", *Editions du seuil*, 1975
- [SAL 94] SALOME T., BERSINI H., "An algorithm for self-structuring neural net classifiers", *2th IEEE conference on neural networks*, 1994.
- [TOP 99] TOPIN X., FOURCASSIE V., GLEIZES M.P., THERAULAZ G., REGIS C., GLIZE P., "Theories and experiments on emergent behaviour : From natural to artificial systems and back", *Proceedings on European Conference on Cognitive Science, Siena*, 1999
- [VAR 88] VARELA F.J., "Autonomie et connaissance, essai sur le vivant", *Editions du Seuil*, 1988.
- [VER 95] VERGNES J.-C., "Etude de modèles de prévision à la station de Nant. Exploitation de l'utilisation des réseaux neuronaux en prévision de crues", *Rapport ENSEIHT/DIREN*, 1995
- [SEA 95] SEARLE J., R. , "La redécouverte de l'esprit", *Editions Gallimard*, 1995.
- [VIJ 97] VAN DE VIJVER, G., "Emergence et explication", *Intellectica : Emergence and explanation*, 1997/2 n°25, ISSN n°0984-0028 185-194, 1997.
- [WOO 02] WOOLDRIDGE MICHAEL, "An introduction to multi-agent systems", *John Wiley & Sons*, 2002

Annexe 1 - L'algorithme d'un agent Amas

Après la création d'un agent Amas coopératif, le coeur de l'algorithme qu'il exécute pour décider de son comportement est le suivant :

```

c ⊆ P          /* c est un sous-ensemble de percepts */
a ⊆ A          /* a est une action */
SR ⊆ SkillRules /* SR correspond aux règles pour appliquer les compétences de l'agent */
BR ⊆ BeliefRules /* BR correspond aux règles pour appliquer les compétences en utilisant
                  les croyances de l'agent sur les autres */
NCSR ⊆ NonCooperativeSituationRules /* NCSR correspond aux règles à appliquer dans
                                     une situation non-coopérative */
R = SR ∪ BR ∪ NCSR ⊆ Behavior Rules /* R correspond aux règles applicables par l'agent */
(c,a) / c ⊆ P et a ⊆ A /* (c,a) correspond à un comportement */
(c1,a1) ≺ (c2,a2) /* exprime une relation de priorité du comportement (c1,a1) sur (c2,a2) */

/* La fonction action permet de décider quelle action va être exécutée par l'agent en fonction
   de ses perceptions p */
Function action (p:P) : A
var fire : f(SR) /* fire est l'ensemble des comportements possibles
                  actuellement obtenus par la fonction f */
var fireCooperativeAction : f'(BR) /* fireCooperativeAction est l'ensemble des comportements
                                     coopératifs obtenus par la fonction f' */
var fireNCS : f''(NCSR) /* fireNCS est l'ensemble des comportements supprimant
                           les situations non coopératives momentanées obtenu par la fonction f'' */
var a : A

begin
  fire := {(c,a) / (c,a) ∈ SR, p ∈ c}
  fireCooperativeAction := {(c',a) / (c,a) ∈ fire et (c',a) ∈ BR et c'=c ∪ c" et p ∈ c ∪ c"}
  if fireCooperativeAction <> ∅ then
    /* si fireCooperativeAction n'est pas vide, alors l'agent est en situation coopérative */
    for each (c,a) ∈ fireCooperativeAction do
      if (∄(c', a') ∈ fireCooperativeAction / (c', a') ≺ (c,a)) then return a
    endif
  endfor
  else /* Des situations non-coopératives sont détectées */
    /* Si fire = ∅ et fireCooperativeAction = ∅, l'agent ne peut pas utiliser ses percepts : c'est
       une situation non-coopérative */
    /* Si fire <> ∅ et fireCooperativeAction = ∅ alors l'agent ne peut réaliser une action 'a' car 'a'
       est non-coopératif au regard de sa représentation des autres agents */
    fireNCS := {(c,a) / (c,a) ∈ NCSR et p ∈ c} /* En conséquence, l'agent doit utiliser un
                                                  comportement appartenant à NCSR afin de supprimer la situation non-coopérative. */
    for each (c,a) ∈ fireNCS do
      if (∄(c', a') ∈ fireNCS / (c', a') ≺ (c,a)) then return a
    endif
  endfor
  endif
return null
End function action

```

Annexe 2 – Le questionnaire d'évaluation de Forsic

Le format des questions est identique pour les formateurs et le logiciel. Le Réseau Sémantique possède un prétraitement automatique de lemmatisation très simple (principalement pour les ponctuations et les majuscules).

- 1) Je cherche une formation en méthodologie documentaire pour le 1er cycle en Economie ou Droit
- 2) Je voudrais apprendre à faire une recherche documentaire en chimie , notamment sur les bases de données Chemical Abstracts Current Contents
- 3) Formation de formateurs à la recherche documentaire réflexions théoriques sur la recherche documentaire et les sciences de l'information en tant que discipline
- 4) Nous sommes des étudiants de milieux universitaires et nous voulons une formation à l'IST pour exploiter de larges masses d'information et faire émerger de l'information non visible
- 5) Qui connaît un site Internet pour la recherche de musiques techno
- 6) Formateur à la recherche documentaire je voudrais me spécialiser dans les disciplines de lettres et sciences humaines et pouvoir créer des modules de formation à l'IST évolutifs et reconductibles
- 7) Recherche d'information création de sites web indexation et référencement de sites organisations complexes hypertexte écriture hypertextuelle
- 8) Je cherche un stage de formateurs à la recherche documentaire et pouvoir élaborer des modèles outils d'ingénierie de la formation
- 9) Recherche documentaire
- 10) Je cherche un théoricien dans le domaine de la recherche documentaire