



HAL
open science

Modélisation et simulation par agents. Application aux systèmes complexes

Pierre Marcenac

► **To cite this version:**

Pierre Marcenac. Modélisation et simulation par agents. Application aux systèmes complexes. Informatique [cs]. Université de La Réunion, 1997. tel-01485195

HAL Id: tel-01485195

<https://hal.univ-reunion.fr/tel-01485195v1>

Submitted on 8 Mar 2017

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.

Institut de **RE**cherche en **M**athématiques
et **I**nformatique **A**ppliquées



**MODÉLISATION ET
SIMULATION PAR AGENTS**

Application aux systèmes complexes

4

SCD UNIVERSITE DE LA REUNION



350554 0350

Université de la Réunion

15, avenue René Cassin - BP 7151 - 97 715 Saint-Denis messag cedex 9

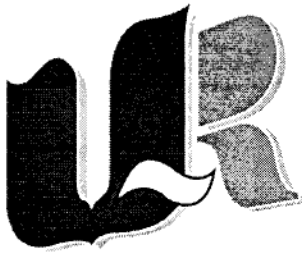
Téléphone : 02 62 93 82 82 Télécopie : 02 62 93 82 60

E-mail : iremiase@univ-reunion.fr

http : //www.univ-reunion.fr

2000

MOR



UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

**MODÉLISATION ET
SIMULATION PAR AGENTS**

Application aux systèmes complexes

4

Pierre Marcenac



HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Mémoire de Synthèse

Date de soutenance : 12 décembre 1997

Président du jury de soutenance : Henri Ralambondrainy

Réf# : PM/HV4/9709

N° d'ordre :

AVANT-PROPOS

Ce document constitue le mémoire de synthèse d'habilitation à diriger des recherches. Il décrit les problématiques étudiées, les besoins dans les domaines concernés et les résultats des recherches menées au sein du projet SMA¹ de l'IREMIA².

Le travail décrit une approche de modélisation de systèmes complexes par agents, en définissant une organisation des connaissances et un modèle de représentation. Il est appuyé par des expérimentations mettant en valeur les points clés du modèle. Le premier type d'expérimentation traite de la modélisation des processus de résolution de problèmes par un individu apprenant. Le second type est lié à l'environnement scientifique local, et traite de la simulation des phénomènes naturels (éruptions volcaniques et séismes en particulier). Lorsque dans ce rapport, le projet SMA sera cité, il fera référence à l'ensemble de ces travaux.

Le dossier est constitué de ce document de synthèse, et de quatre publications principales. Le document de synthèse est organisé en quatre parties, précédées d'un curriculum vitæ. La première partie présente les problématiques étudiées et les positionne par rapport à l'existant dans les domaines scientifiques qui les joutent. La seconde partie aborde les travaux sous un angle conceptuel, en proposant les approches retenues pour modéliser la complexité par agents. La troisième partie détaille l'architecture, le modèle et l'implémentation. La quatrième partie présente les expérimentations ayant permis de les valider. Enfin, en guise de conclusion, nous dressons des perspectives de recherche et le bilan des travaux.

Trois annexes viennent ensuite compléter le document : l'annexe 1 résume de manière chronologique mes activités de recherche en montrant la méthodologie de travail, les annexes 2 et 3 listent respectivement mes publications personnelles (classées par niveau et année) ainsi qu'une bibliographie commentée des différents travaux se rapportant à mes recherches.

¹ Acronyme pour Simulation et Modélisation par Agents.

² Acronyme pour Institut de Recherches En Mathématiques et Informatique Appliquées.

PLAN DU DOCUMENT DE SYNTHÈSE

AVANT-PROPOS	3
CURRICULUM VITÆ.....	7
PREMIÈRE PARTIE : PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE..	11
1. PROBLÉMATIQUE ET POINTS SOULEVÉS PAR LES TRAVAUX	11
2. LES OBJECTIFS ET LES MOTIVATIONS DES RECHERCHES.....	12
3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DES TRAVAUX.....	13
DEUXIÈME PARTIE : MODÉLISATION PAR AGENTS.....	15
1. PROBLÉMATIQUE DE LA COMPLEXITÉ	15
2. MÉCANISMES DE BASE D'UN AGENT.....	17
3. SYSTÈMES MULTI-AGENTS ET CRITIQUES AUTO-ORGANISÉS.....	18
3.1 QUEL EST LE PROBLÈME ?.....	18
3.2 QU'EST-CE QU'UN SYSTÈME CRITIQUE AUTO-ORGANISÉ ?.....	19
3.3 UN SCAO PEUT-IL ÊTRE MODÉLISÉ COMME UN SMA ?.....	20
3.3.1 <i>Au fait, quels sont les mécanismes d'émergence ?</i>	21
3.3.2 <i>Extension et enrichissement du SMA</i>	22
3.4 UN SYSTÈME MULTI-AGENTS EST-IL UN SYSTÈME CRITIQUE AUTO-ORGANISÉ ?.....	24
3.4.1 <i>Émergence de structures : auto-organisation</i>	24
3.4.2 <i>Émergence de propriétés : rétro-propagation</i>	27
TROISIÈME PARTIE : GEAMAS : UNE ARCHITECTURE, UN	29
MODÈLE, UNE IMPLÉMENTATION	29
1. UNE ARCHITECTURE.....	29
2. UN MODÈLE D'AGENT	29
3. UN MODÈLE DE SOCIÉTÉ D'AGENTS.....	32
4. UNE PLATE-FORME LOGICIELLE.....	34

**QUATRIÈME PARTIE : EXPÉRIMENTATIONS ET
MÉTHODOLOGIE.....37**

1. METAN ET CRYPTARITHMÉTIQUE.....37
1.1 METAN.....37
1.2 L'EXPERTISE DE CRYPTARITHMÉTIQUE.....38
2. L'APPLICATION TREMMA.....38
3. L'APPLICATION GEOMAS V2.....40
4. L'APPLICATION SÉISMES.....41
5. 10! ET GRAINS DE SABLE.....42
6. CONCEPTION D'APPLICATIONS DANS LE CADRE DE GEAMAS43

PERSPECTIVES.....45

1. AUTO-ADAPTATION.....45
2. MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ORIENTÉE AGENT.....46
3. FORMALISATION DU MODÈLE.....46
4. DES ORIENTATIONS NOUVELLES SUR DES DOMAINES DÉJÀ ABORDÉS.....46
5. DES ENVIRONNEMENTS D'EXPÉRIMENTATIONS NOUVEAUX47

RÉSUMÉ DES TRAVAUX.....49

ANNEXE 1 : HISTORIQUE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHEUR!

1. PRÉAMBULE.....51
2. ÉTAPE 1 : DE EDDI À TREMMA.....52
2.1 LE SYSTÈME EDDI52
2.2 TREMMA.....53
3. ÉTAPE 2 : IMPACT DE L'ENVIRONNEMENT LOCAL - GEOMAS V1.....54
4. ÉTAPE 3 : VERS UN MODÈLE PLUS GÉNÉRIQUE - GEAMAS.....55
5. ÉTAPE 4 : VALIDATIONS DE GEAMAS - GEOMAS V2 ET SÉISMES56
5.1 GEOMAS V2.....56
5.2 SÉISMES.....56
6. ÉTAPE 5 : GEAMAS EN JAVA.....57

ANNEXE 2 : LISTE DES PUBLICATIONS PERSONNELLES.....59

ANNEXE 3 : BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE.....67

CURRICULUM VITÆ

1/ État Civil

Nom patronymique et Prénom : MARCENAC Pierre
Sexe : Masculin
Situation familiale : Marié, un enfant
Nationalité : Française
Date et lieu de Naissance : Né le 29 Janvier 1961 à Paris
Adresse Personnelle : 31-bis Chemin Bancoule, Moufia -
97490 Ste Clotilde - La Réunion
Téléphones : 02-62-29-19-39 / 02-62-93-82-84

2/ Diplômes

Juin 1982 : DEUG A - Université de Nice, assez bien.
Juin 1983 : Licence d'Informatique - Université de Nice, assez bien.
Juin 1984 : Maîtrise d'Informatique - Université de Nice, bien.
Septembre 1987 : DEA d'Informatique, option "Gestion et de Représentation des
Connaissances" - bien - Université de Nice-Sophia Antipolis.
Décembre 1990 : Thèse de doctorat Sciences, option Informatique, Université de
Nice-Sophia Antipolis, très honorable.

Composition du jury :

J.C. Boussard, Professeur (Université de Nice-Sophia Antipolis), Président,
M. Quéré, Professeur (Université de Nancy II), Rapporteur,
C. Frasson, Professeur (Université de Montréal), Rapporteur,
D. Hérin, Professeur (Université de Montpellier II), Directeur de recherche,
J.P. Regourd, MCF (Université de Nice-Sophia Antipolis), Examineur.

3/ Déroulement de Carrière

1991 --> Maître de Conférences 1^{ère} Classe, Université de La Réunion,
IREMIA - 15, Avenue René Cassin - BP 7151 - 97715 St Denis
Messageries Cedex 9.
1989 --> 1991 ATER, Université de Nancy 1, en poste à l'ESSTIN, antenne de
Sophia-Antipolis.
1987 --> 1989 Allocataire de Recherche, bourse MEN, Laboratoire I3S -
Université de Nice-Sophia Antipolis.
1985 --> 1987 Maître-Auxiliaire à l'Éducation Nationale. Parallèlement, étudiant
en DEA d'Informatique - Université de Nice-Sophia Antipolis.
1984 --> 1985 Service Militaire effectué comme VFI.

4/ Publications

La liste complète de mes publications est fournie en annexe 2 de ce document de synthèse.
Certaines de ces publications listées ci-dessous sont présentées dans le dossier. Elles présentent,
pour des raisons diverses qui sont commentées en italique, un caractère plus important que les
autres :

P. Marcenac, S. Giroux, "GEAMAS: A Generic Architecture for Agent-Oriented
Simulations of Complex Processes", International Journal of Applied Intelligence, 42 Pages,
à paraître, 1998.

Cet article décrit en détail le coeur du travail, le modèle et l'organisation d'agents proposés, ainsi que l'une des expérimentations permettant d'en valider les principes (application à la simulation d'éruptions volcaniques).

P. Marcenac, "Modeling MultiAgent Systems as Self-Organized Critical Systems", 31st Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS-31, IEEE Computer Society Press, à paraître en Janvier 1998.

Cet article focalise sur l'étude des mécanismes intrinsèques des agents, en particulier l'auto-organisation constituant un point clé du modèle proposé. Il présente en outre une seconde expérimentation montrant l'application de ces principes (application à la sismicité).

P. Marcenac, "A computer-simulation tool for evolutionary systems", International Journal of Knowledge-based Intelligent Engineering Systems, à paraître, 1998.

Cet article présente l'environnement de développement GEAMAS V2, issu de l'abstraction des applications et entièrement reconçu et redéveloppé en Java au cours de l'année 1997. Il vient compléter les deux articles précédents, en focalisant sur les aspects d'analyse, de conception et d'implémentation de l'environnement logiciel proposé.

S. Leman³, P. Marcenac, S. Giroux⁴, "Un modèle multi-agents de l'apprenant", Revue AFCET STE, Sciences et Techniques Éducatives, Hermès, Vol. 3, N°4, 1996, Pages 465-483.

Cet article présente une vue globale de la première expérimentation de nos travaux, l'application aux environnements d'apprentissage avec ordinateur (thèse de S. Leman), qui a permis de valider la représentation en organisation d'agents, et une partie du modèle d'agent. Pour compléter ce point de vue, le lecteur peut également se reporter à [Leman et al. 95a] et [Leman et al. 96b], présentant respectivement les algorithmes de recouvrement distribué et d'expertisation, les conférences AI-ED et ITS constituant par ailleurs les deux grandes conférences internationales régulières du domaine des Environnements Interactifs d'Apprentissage par Ordinateur (EIAO).

5/ Encadrements de Recherche

Thèses :

Thèses en cours : J.C. Soulié, boursier d'allocation régionale et moniteur. Thèse qui commencera en Octobre 1997. Sujet : "Modélisation par agents de l'environnement d'un système complexe : application à l'écoulement de laves effusives du Piton de la Fournaise", soutenance prévue au cours de l'année universitaire 2000/2001.

S. Calderoni (100%)⁵, boursier MEN et moniteur. Thèse démarrée en Septembre 1996. Sujet : "Systèmes d'apprentissage et systèmes multi-agents : mécanismes d'auto-adaptation", soutenance prévue au cours de l'année universitaire 1999/2000.

Thèse soutenue : S. Leman (90%), "TREMMA : Transfert d'Expertise avec un Modèle Multi-Agents - Un modèle Multi-Agents pour la représentation dynamique des connaissances et des raisonnements d'un apprenant", Thèse soutenue en Juillet 1996 [Leman 96]. Cette thèse a été effectuée dans le cadre d'une bourse MEN. S. Leman est actuellement ATER à l'Université de la Réunion.

Composition du jury :

³ S. Leman est l'étudiant doctorant que j'ai encadré à 90% (l'encadrant officiel étant H. Ralambondrainy, Professeur à l'Université de la Réunion).

⁴ S. Giroux était, à cette époque, en études Post-doctorales dans le laboratoire, et a fait partie intégrante du projet SMA durant cette période.

⁵ Le chiffre entre parenthèses indique le pourcentage de ma participation à l'encadrement du travail cité.

H. Méloni, Professeur (Université d'Avignon), Président,
M. Baker, Chargé de Recherche au CNRS (ENS Lyon), Rapporteur,
D. Hérin, Professeur (Université de Montpellier II), Rapporteur,
H. Ralambondrainy, Professeur (Université de la Réunion), directeur de recherche,
P. Marcenac, MCF (Université de la Réunion), co-directeur de recherche,
S. Giroux, chercheur (Télé-Université, Montréal), Examinateur.

Stages de troisième cycle :

DEA d'Informatique S. Calderoni (100%), "Auto-Organisation dans une architecture multi-agents - Application à la Modélisation de Systèmes Complexes", DEA d'Informatique, Université de Montpellier II, Juin 1996 [Calderoni 96]. Actuellement étudiant de Doctorat dans le projet SMA, bourse MEN.

M.L. Aimelet (100%), "GEOMAS : Les multi-agents et le volcan de la Fournaise", DEA d'Informatique, Université de Montpellier II, Septembre 1995 [Aimelet 95]. Actuellement Ingénieur dans l'industrie.

DESS d'Informatique J.C. Soulié (50%), "Conception et implantation d'une plate-forme d'agents en JAVA", Mémoire de DESS, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Septembre 1997, 90 pages [Soulié 97]. Actuellement étudiant de Doctorat dans le projet SMA, bourse régionale.

D. Grosser (100%), "GEOMAS Version 1.2, Rapport de stage", DESS d'Informatique, Génie Logiciel et Applications, Université de Paris VI, Septembre 1995 [Grosser 95]. Actuellement étudiant de Doctorat dans le projet IKBS de l'IREMIA, bourse régionale.

Stages de second cycle et autres :

Stages d'ingénieurs C. Bergeron (50%), "Étude sismique de zones à risque", titre provisoire, mémoire d'ingénieur de l'école et Observatoire de Physique du Globe, Septembre 1996 [Bergeron 96]. Actuellement au service militaire.

F. Lahaie (50%), "Modélisation de la complexité des processus volcaniques : validation, sur les éruptions du Piton de la Fournaise, Réunion", mémoire d'ingénieur de l'école et Observatoire de Physique du Globe, Université de Strasbourg I, Septembre 1995 [Lahaie 95]. Actuellement étudiant de Doctorat en Géophysique, financement sur contrat de recherche.

P. Rougé (50%), "Rapport de stage GEOMAS", École Supérieure de Mécanique de Marseille, Juillet 1995 [Rougé 95]. Actuellement VAT à l'ORSTOM, La Réunion.

Maîtrise d'Informatique D. Souprayapoulé, J.D. Vally (50%), "Éditeur de simulation pour GEOMAS V2.0", Maîtrise d'Informatique, Université de la Réunion, Juin 1997 [Souprayapoulé et Vally 97], actuellement étudiants de DEA à l'Université de Montpellier II.

J. Poquet, N. Vidot (50%), "Création d'un éditeur d'applications multi-agents", Maîtrise d'Informatique, Université de la Réunion, Juin 1997 [Poquet et Vidot 97], actuellement étudiants de DEA à l'Université Marseille-Luminy.

S. Calderoni, E. Valcares (100%), "Développement d'un environnement de simulation pour la modélisation d'édifices géophysiques", Maîtrise

d'Informatique, Université de la Réunion, Juin 1995 [Calderoni 95], [Calderoni et Valcares 95a et b].

Stage de chercheur D. Grosser (100%), "Implantation de la plate-forme GEAMAS", Septembre à Décembre 1995.

6/ Collaborations

1997 :

- Collaboration concernant l'application de GEAMAS au domaine de l'écoulement des laves sur le massif du Piton de la Fournaise (Réunion) : Laboratoire de Géologie, Université de la Réunion (Patrick Bachèlery).
- Application de GEAMAS à la simulation de plans de vol dans le cadre de la formation de contrôleurs aériens : collaboration en cours entre l'IREMIA et le CSIRO-Sydney (Australie), dans le cadre de mon congé de recherches en 1998.

1996 :

- Télé-enseignement : poursuite des travaux sur les applications d'enseignement d'apprentissage par ordinateur. Collaboration entre la Télé-Université du Québec (laboratoire LICEF) et l'IREMIA.

1995 :

- Mise en oeuvre d'une convention de recherche entre Jean-Robert Grasso (Directeur de Recherche au LGIT⁶ de Grenoble) et l'IREMIA, concernant le travail et l'encadrement en commun d'étudiants dans le cadre des applications du projet SMA.
- Collaboration avec Joël Quinqueton (Directeur de Recherches au LIRMM⁷), les étudiants de DEA que j'ai encadrés ayant effectué leurs parties théoriques à l'Université de Montpellier II.

1994 :

- Collaboration avec la Télé-Université à Montréal, dans le cadre des études post-doctorales de S. Giroux (boursier DRED), pour l'utilisation, l'expérimentation et l'amélioration de l'environnement de développement ReActalk, issu de ses travaux de doctorat.
- Collaboration avec le CEMEF⁸ à Sophia-Antipolis, représenté par Jean-Luc Wybo, dans le cadre du développement d'une maquette validant les types d'agents mis en oeuvre dans l'application TREMMA [Wybo et al. 94].

Enfin, de nombreuses discussions ont eu lieu dans le cadre de rencontres avec d'autres chercheurs. Parmi les plus fructueuses, je citerais, entre autres, les échanges avec Michel Aubé (doctorant Canadien de l'Université de Sherbrooke, Québec), Jean Sallantin (Directeur de Recherches au LIRMM), Alain Senteni (Maître de Conférences associé à l'Université de la Réunion entre 92 et 94), l'ensemble de la communauté du groupe de travail AFCET/AFIA "IAD et SMA", et plus récemment Danièle Héryn (Professeur à l'Université de Montpellier II) et Henri Méloni (Professeur à l'Université d'Avignon).

7/ Valorisation de la recherche

Une demande de brevet de GEAMAS V2.0 est en cours de demande par l'Université de la Réunion.

⁶ Acronyme pour Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique.

⁷ Acronyme pour Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier.

⁸ Acronyme pour Centre de Mise En Forme des matériaux, École des Mines de Paris.

PREMIÈRE PARTIE :

PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE

Dans cette première partie, nous présentons les préoccupations abordées, les motivations, ainsi qu'une brève présentation des résultats de nos travaux. La finalité est de proposer un environnement de développement d'applications de simulation de systèmes complexes, pour explorer les mécanismes et comportements de tels systèmes.

1. Problématique et points soulevés par les travaux

La philosophie de mes travaux pourrait se résumer à « comment faire du simple avec du complexe? » ou le problème inverse, « comment faire du complexe avec du simple ? ». Notre approche consiste en effet à mettre en évidence des bases simples à des comportements apparemment complexes, en cherchant à décrire et isoler des mécanismes. L'on veut donc pouvoir représenter dans une machine des composants simples, dont la mise en relation dynamique peut reproduire un comportement proche du réel. Cette problématique nous paraît sensée, ce qui le serait moins serait de vouloir retranscrire toute la complexité interne, c'est-à-dire la complexité des composants eux-mêmes.

Cette étude engendre alors autant de questions délicates : Comment une machine peut produire des comportements difficilement maîtrisables dans le réel ? Comment créer des systèmes informatiques capables de reproduire de tels comportements ? Quelles caractéristiques de base doivent-ils disposer ?

Enfin, plus concrètement, la question fondamentale alors est la suivante : « quelles sont les caractéristiques et les mécanismes internes que doivent avoir de telles plates-formes de développement ? ». Prétendre fournir une réponse unique est naturellement utopique et ne serait que pure prétention. Néanmoins, elle induit un centre de pensée qui m'est cher, résolument tourné vers le Génie Logiciel, qui est en toile de fond dans tous mes travaux, rappel du contexte dans lequel ma thèse de doctorat s'est déroulée et qui n'a jamais cessé de m'inspirer. Dans ce contexte, des outils pour construire des systèmes artificiels⁹ sont proposés, afin d'expérimenter des domaines d'application caractérisés par leur complexité intrinsèque.

Le problème que je me suis posé durant ces recherches est de rendre intelligible et compréhensible un système complexe en le modélisant artificiellement. Il s'agit donc d'une tentative pour montrer qu'on peut réduire un comportement dont l'algorithme global est inconnu, en un ensemble de mécanismes élémentaires qui, une fois structurés et ordonnés en machine, permettent d'observer le même résultat. Ma conviction est qu'il convient donc de « *décortiquer* », de *structurer* et de *classifier* les mécanismes observés dans le réel, pour en déduire des schémas implémentables. Cette approche autorise alors l'utilisateur d'une part à entrevoir de nouvelles possibilités pour l'outil informatique comme aide à la compréhension de problèmes nouveaux, ce qui était jusqu'alors impensable, et d'autre part à mieux saisir la dynamique de la complexité.

Cette problématique peut être alors assimilée à la « réification de mécanismes », ou réification de la dynamique du système (par analogie à la réification structurelle, introduit par J. Ferber

⁹ Dans le sens de Herbert Simon [Simon 96], système qui exhibe des comportements visibles de l'extérieur, similaires à ceux des systèmes naturels, indépendamment de sa ressemblance interne avec le système naturel.

[Ferber 89] et résumée dans [Pachet 97]), sorte de processus de pensée qui consiste à associer à un comportement observé dans le monde réel à une ou plusieurs fonctions de base implémentables.

Par ailleurs, nous sommes très attentifs au principe de réutilisabilité, l'abstraction des mécanismes mis en œuvre dans les expérimentations nous permettant d'enrichir le modèle, vu alors comme un moule décrivant la structure interne des composants du système. La méthodologie de travail est orientée vers le cycle de développement en spirale, de type expérimentation-abstraction-généralisation [Courdier et al. 97], [Courdier et Marcenac 97a]. Je suis donc convaincu (mais qui ne l'est pas ?) que des réponses partielles peuvent être proposées sur la base de l'enrichissement d'un outil à partir de l'abstraction qui peut en être faite à partir des expérimentations. Cette voie conduit à la définition d'un modèle¹⁰, qui peut s'insérer dans une plate-forme générique de développement par agents et donne ainsi l'occasion d'aborder des expertises variées d'un même domaine d'application et même de domaine différent. L'utilisation d'un tel outil relève alors d'une opération de modélisation, c'est-à-dire de la représentation des connaissances d'un domaine particulier en suivant le modèle défini.

Pour proposer des réponses aux problèmes que l'on se pose, nous avons réfléchi en amont à des questions sous-jacentes, en utilisant l'approche expérimentale :

- Quel paradigme de programmation serait le plus adéquat à la modélisation de systèmes complexes ? Les agents semblent être adaptés. Mais pour y répondre plus précisément, nous avons étudié la complexité d'un point de vue pratique, en tentant d'identifier des caractéristiques et fonctionnalités fondamentales pouvant être isolées. Cette étude nous a conduit à proposer une abstraction d'un système complexe et à définir les mécanismes fondamentaux qu'il convient de structurer et d'ordonner dans le système informatique.
- Si un modèle distribué par agents communicants semble être une base intéressante, suffit-il à résoudre le problème de modélisation des systèmes complexes ? quels sont alors les caractéristiques de base qu'il doit intégrer ? Cette opération nous a conduit à approfondir le concept d'agent pour y séparer les mécanismes, et à les implanter de façon fidèle à la vision que l'on s'en fait et dont la pensée le structure.

Ces deux points, qui constituent les études conceptuelles préalables à notre environnement, sont reportés dans la deuxième partie de ce document.

2. Les objectifs et les motivations des recherches

Les objectifs du travail sont soulignés par la définition d'un modèle d'agent pour représenter les connaissances, les contraintes et les mécanismes globaux, ainsi que l'établissement d'une certaine organisation des agents. La modélisation de systèmes complexes constitue une démarche plus expérimentale que théorique. Néanmoins, une démarche expérimentale nécessite un cadre de conception, un environnement spécifique autour duquel pourra s'exprimer le modèle, l'*organisation*. L'organisation décrit la manière dont les agents sont positionnés les uns par rapport aux autres ; elle permet de mieux isoler les mécanismes de fonctionnement du système dans les différents niveaux de l'organisation, ce qui en facilite la compréhension.

Ainsi nos recherches visent également à fournir une plate-forme logicielle expérimentale et paramétrable qui peut être assimilée à un laboratoire virtuel permettant de simuler le fonctionnement de systèmes complexes [Calderoni et Marcenac 97a]. Ces résultats sont présentés dans la troisième partie du document.

La mise en œuvre d'une approche par agents, centrée autour de la définition d'un modèle, d'une organisation et d'une plate-forme logicielle, est donc motivée par les constats suivants :

¹⁰ Souvent appelé "architecture" dans la littérature (voir [Ferber 95 Pages 25 et 137] par exemple).

- L'approche fournit des bons résultats lorsque la complexité ne peut être exprimée globalement, et qu'aucun algorithme ne peut être formulé pour en refléter globalement les propriétés intrinsèques,
- Dans le cadre de la modélisation de systèmes complexes devant intégrer des capacités distribuées, il n'existe pas d'outil informatique approprié,
- Les mécanismes intrinsèques aux systèmes complexes, en particulier la dynamique des interactions conduisant au comportement global du système, ne sont pas clairement identifiés,
- La démarche de modélisation expérimentale ne peut être menée que dans un cadre spécifique.

3. Synthèse des résultats des travaux

Les travaux présentés dans ce document de synthèse abordent donc plusieurs axes :

- La notion d'agent, de système multi-agents et d'interactions comme outil de modélisation des systèmes complexes à des fins de simulation. En particulier, les efforts sont portés vers la conception d'un système suivant un modèle d'agent et de société d'agents, qui identifient clairement les propriétés fondamentales de *communication*, *d'interaction*, *d'indépendance* et *d'autonomie*.
- La représentation de l'évolution du système, que je peux classer en modification dynamique de l'état d'un agent, auto-organisation et auto-adaptation. Elle m'a conduit et conforté à modéliser un système complexe suivant *3 niveaux d'abstraction*, permettant de réduire la complexité du système et d'en faciliter la conception.
- L'étude de l'auto-adaptation, sous l'angle de la production d'un comportement global adapté¹¹ par l'interprétation de l'état du système. Cette partie du travail a conduit à la définition de mécanismes de base dans l'architecture.
- L'étude des mécanismes nécessaires à l'auto-organisation. Ces travaux mettent en relief l'étude de « l'émergence »¹² comme centre de pensée pour la compréhension des phénomènes et mécanismes opératoires qui la régissent. En particulier, cette étude dégage les grands principes de la dynamique des interactions conduisant à la formation de structures auto-organisées, en définit les relations entre composants individuels et collectif, et les implémente dans l'architecture à trois niveaux.
- Les modèles ainsi obtenus ont ensuite été *implantés* au sein d'une architecture logicielle dans un environnement de développement (tout d'abord ReActalk [Giroux 93] puis plus récemment Java après ré-ingénierie).
- Un début d'approche *méthodologique de conception* d'une application dans le cadre de l'architecture proposée.
- *L'expérimentation*, qui constitue une grande partie du travail, comme support de validation des principes et concepts proposés dans le modèle.

¹¹ On parlera également de synthèse comportementale ou autonomie de l'agent.

¹² L'émergence est assimilée ici à un processus dynamique au travers duquel un phénomène apparaît visible à un observateur extérieur au système.

DEUXIÈME PARTIE :

MODÉLISATION PAR AGENTS

Cette deuxième partie aborde de façon conceptuelle nos travaux sur le mariage entre la complexité et les agents, dans le cadre de la modélisation de systèmes complexes pour des applications de simulation. La complexité est tout d'abord étudiée au premier paragraphe, dans le cadre des travaux connexes des chercheurs d'autres disciplines, sociétés artificielles, théorie du chaos, vie artificielle, ... Une synthèse des convictions que l'on en retire est ensuite proposée.

Dans le deuxième paragraphe, nous décortiquons le concept d'agent. Ce paragraphe résume les idées auxquelles nous nous rattachons et en expose les raisons. En particulier, nous sommes favorables à la distinction, au sein même de l'agent, entre ses capacités de communication, d'interaction, d'indépendance et d'autonomie.

Enfin, le troisième paragraphe pose le problème de l'utilisation de l'agent comme composant atomique dans les systèmes complexes. L'étude est plus particulièrement axée sur les systèmes complexes rencontrés en Physique, les systèmes critiques auto-organisés, car elle nous semble être porteur de problèmes particulièrement intéressants pour les systèmes multi-agents. Ainsi, nous proposons un modèle d'auto-adaptation et d'auto-organisation, obtenu par réification des mécanismes observés dans le réel.

1. Problématique de la complexité

Le terme complexité est employé partout où l'homme n'a jusqu'à présent pas su apporter de réponses à des observations de phénomènes de relation aléatoire¹³, que ce soit des phénomènes observés ou des structures. La complexité est intrinsèque dans tout système naturel, en physique, biologie, sciences sociales, etc. Elle est sous-jacente à de nombreux domaines d'application qui servent d'expérimentations aux théories scientifiques qui les jouxtent. La complexité est ainsi au carrefour de plusieurs approches scientifiques. Vouloir étudier la complexité suppose donc un travail pluridisciplinaire, pour tenter de comprendre les courants de pensée des différentes disciplines scientifiques. Nos recherches s'inscrivent dans cet état d'esprit. Ce type de recherche permet des échanges riches, mais en contrepartie est plus difficile à mettre en œuvre, car il nécessite un effort contigu des chercheurs pour aborder les domaines où leurs compétences respectives trouvent souvent leurs limites.

Ainsi, j'ai porté un regard particulier sur les approches faites de la complexité dans les sociétés artificielles, la vie artificielle, la théorie du chaos et la cybernétique. Bien que beaucoup d'efforts aient été portés d'un point de vue épistémologique, et que peu d'évolution sur la réalisation de systèmes ne soit à noter, j'en ai retiré des convictions que j'expose ici en quelques lignes :

- De l'approche envisagée par les systèmes artificiels modélisant des organisations humaines, la complexité laisse supposer la corrélation d'éléments, dont les interactions donnent lieu à d'imprédictibles schémas comportementaux. La complexité d'un système impose alors que les composants soient reliés entre eux et étroitement connectés, et tel qu'il soit difficile de les séparer. La complexité est ici abordée sous un angle structurel. Elle impose une certaine organisation du système pour que les dites interactions aient lieu. L'idée que j'en retiens est qu'un système complexe est comme un système régi par une dynamique liée à de

¹³ Terme reflétant l'apparence du hasard qui caractérise certains phénomènes du monde physique, et tel que plusieurs issues sont simultanément possibles, en nombre fini (d'après [Lorigny 92]).

nombreuses interactions entre composants le constituant, décrits eux-mêmes selon plusieurs niveaux d'organisation, et dont la sémantique des interactions diffèrent d'un niveau à un autre.

- De l'approche vie artificielle, le point de vue défendu est l'interaction, c'est-à-dire la relation entre les entités plutôt que les entités elles-mêmes, comme dans les travaux les plus connus (C. Langton à Santa-Fé par exemple [Langton 89]). Bien qu'il s'agisse ici de simuler des systèmes vivants qui s'éloignent à priori de mes domaines d'application, la vision de l'interaction comme caractéristique des modèles de fonctionnement des systèmes complexes est majeure. On retiendra également la notion de coopération, qui est ici considérée comme très liée à la celle d'interaction, et en devient ainsi une conséquence ; elle assure, par des mécanismes appropriés, une sorte de meilleure productivité du système. La vie artificielle vise à définir la bonne structure des relations, afin que les interactions soient correctes, sans que la composition interne du système ne le soit. Enfin, les problèmes de conflits, de coordination d'agents et de négociation dans le système ne trouvent pas d'intérêt primordial dans notre contexte.
- Dans la théorie du chaos, l'approche consiste à trouver de l'ordre dans ce qui apparaît confus et désordonné. On retrouve des applications en Physique et Géophysique notamment, et la complexité y est étudiée d'un point de vue comportemental, où la non-linéarité des comportements caractérise l'imprédictibilité du système, et où les phénomènes naturels sont supposés être le résultat des interactions entre composants élémentaires. La complexité est étudiée sous le regard d'une collection macroscopique de composants microscopiques qui évoluent dans le temps, dont les interactions conduisent à un comportement collectif cohérent [Coveney et Highfield 95]. Elle conduit à des modèles définissant les systèmes naturels comme « *critiques auto-organisés* », cette approche constituant par ailleurs l'une des expérimentations les plus poussées de nos travaux, abordée dans le troisième paragraphe.
- Enfin en cybernétique, la complexité est définie par la combinaison de la distinction (l'identité des composants) et la connexion entre les composants, qui décrit une contrainte relationnelle structurelle. L'idée intéressante, qui conduit par ailleurs au fait qu'il n'est pas aberrant de modéliser des systèmes artificiels), est que la distinction entre les composants du système n'est perçue que de l'intérieur et pas de l'extérieur. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser précisément le niveau interne pour observer des résultats intéressants.

Ce qui clair est que le rapprochement entre la complexité étudiée d'un point de vue structurel et comportemental conduit à étudier comment représenter des composants élémentaires et la dynamique de leurs interactions. Ces deux axes constituent à nos yeux la base de la modélisation de la complexité. Le résultat des interactions entre les composants du système détermine le comportement de celui-ci, qui excède les contributions individuelles de chaque composant. La difficulté est alors l'intégration des composants et de leur dynamique dans une machine, et l'étude de l'interprétation des résultats individuels conduisant au comportement du système dans son entier. C'est dans ce cadre que les techniques d'Intelligence Artificielle traditionnelles sont peu adaptées à la modélisation de tels systèmes. En étudiant les systèmes complexes, trois caractéristiques amènent à cette constatation :

- Complexité organisationnelle : tout d'abord, considérer un système complexe comme une entité unique, et les comportements comme les résultats de l'exécution d'un programme unique, ne permet pas d'exprimer la réalité complexe intrinsèque au système,
- Indépendance : ensuite, la caractéristique même d'un système complexe implique que ces composants réagissent aux sollicitations extérieures du milieu indépendamment de leur appartenance au système ; ils possèdent ainsi une dimension propre, dont les comportements de chacun sont générés sans nécessairement atteindre un résultat global,
- Non déterminisme : un système complexe est souvent décomposable de façon naturelle en entités simples, isolables séparément, mais la dynamique de l'ensemble n'est pas exprimable. Les changements d'états des composants sont alors cruciaux pour déterminer l'ordre du système.

Le deuxième paragraphe présente maintenant nos travaux sur l'Intelligence Artificielle Distribuée, et plus particulièrement les agents, comme alternative.

2. Mécanismes de base d'un agent

L'approche distribuée fournit un modèle de calcul qui vise à représenter les phénomènes localement, dans lequel le comportement global est le résultat d'interactions entre des entités autonomes, nommées agents. Nous défendons alors que l'idée de considérer l'agent comme unité atomique de représentation de connaissances y est donc basiquement intéressante. Par agent, nous défendons la définition de Jacques Ferber en [Ferber 89] : « *une entité physique ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de son environnement, et qui, dans un système multi-agents, 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* ».

Si l'on va plus loin, la base d'un agent décrit donc des mécanismes de communication, d'indépendance, d'interaction, d'autonomie et de coopération :

- La communication, autorisant l'agent à interpréter des événements externes et de réagir aux sollicitations reçues. Cet office peut être rempli par le mécanisme de boîtes à lettres de type In/Out, comme nous le suggérons dans [Marcenac et al. 97]. Ce mécanisme simpliste laisse alors de côté l'association qui peut être faite avec les actes du langage, comme ce qui est proposé par T. Bouron dans son travail de doctorat [Bouron 92], même si l'essentialité de la démarche n'est pas claire dans ce qui nous intéresse.
- L'indépendance, comme la capacité à agir sans relation directe avec l'environnement. L'agent peut alors mettre en œuvre des comportements *internes* sans recevoir de sollicitations extérieures.
- L'interaction : notre perception de l'interaction dans un tel environnement est comprise au sens de [Ferber 95 Page 67], comme une mise en relation dynamique d'agents par le biais d'actions réciproques. Elle débouche sur la coopération effective d'agents, qui, dans le cadre des systèmes complexes, impose une collaboration coordonnée (suivant la classification de J. Ferber [Ferber 95 Page 74]) sans conflits, où les agents du système n'ont pas forcément connaissance de tous les autres, mais doivent en partager les contraintes.
- L'autonomie assure à l'agent la capacité à concevoir et exécuter ses propres comportements en fonction d'événements internes (aspect indépendance). Elle assure également une intelligence lui permettant d'interpréter les messages extérieurs correspondants aux événements externes (aspect interaction). Pour être autonome, l'agent doit donc pouvoir contrôler son activité interne et externe.
- Enfin, la coopération indique la façon dont plusieurs agents évoluent ensemble pour agir dans et sur leur environnement. Si l'on comprend la coopération dans le sens de [Brassac et Pesty 96], notre modèle n'intègre pas cette notion de façon explicite, car le monde réel abordé, par nature non déterministe, ne permet pas de décrire une planification des tâches de l'agent. L'agent ne peut planifier ses actions pour intentionnellement¹⁴ participer à l'objectif global. Mon opinion à ce sujet est que la coopération effective entre agents peut s'envisager dans des domaines de résolution de problèmes, plus que dans la simulation de systèmes complexes. Mais, la coopération est implicite dans le système, puisque les agents non intentionnels participent, sans le savoir, à l'objectif global (C. Brassac et S. Pesty parlent alors de coaction).

Ainsi, ces caractéristiques forment l'essentiel de l'agent dont il nous semble être l'unité atomique de représentation des connaissances dans les systèmes complexes. Certaines notions

¹⁴ L'intention caractérise ici la volonté propre d'un agent et guide sa conduite, elle n'a pas la signification qu'on peut lui réserver dans le domaine des croyances, par exemple dans l'approche BDI, « *Belief-Desire-Intention* ».

plus évoluées comme l'intentionnalité, le désir, se retrouvent dans une approche plus cognitive des agents, par exemple dans l'approche de type Belief-Desire-Intention dans des systèmes comme IRMA [Bratman et al. 88] ou GRATE [Jennings 93], ce qui, du moins dans l'immédiat, s'éloigne de nos préoccupations.

J.P. Treuil, E. Perrier et C. Cambier soulignent dans leur étude [Treuil et al. 97], que l'agent est une notion informatique qui recoupe un processus parallèle, un composant autonome et enfin un composant communiquant. Cette étude nous a frappé, tant l'essence même du problème de distinction entre les notions informatique et réelle est saisissante ; elle montre en particulier que *« s'il paraît peu utile de parler d'autonomie et de communication à propos des processus physiques (donc réels), il peut être tout à fait utile d'en parler à propos des programmes informatiques qui les représentent »*. Cette remarque appelle la suivante : à notre sens, l'effort doit être concentré sur la *modélisation*, permettant d'offrir un moyen de représenter un univers réel pour créer un système artificiel.

Le système artificiel qui résulte de la mise en mouvement de tels agents revêt alors deux aspects :

- Un système naturellement distribué, où la structure organisationnelle des composants du système, ainsi que les comportements sont connus, délimitant ainsi le rôle de chacun. Ce type de système a été bien étudié dans le cadre militaire ou nucléaire [Benhamou et al. 92], [Lardjane 93], ou dans le cas des systèmes physiquement répartis composés d'agents logiciels (agents communicants), comme dans les systèmes d'informations coopératifs par exemple [Brodie et Ceri 92], où les contraintes de chaque sous-système peuvent nécessiter une perception globale pour prendre une décision. Dans de tels systèmes, les interactions posent des problèmes particuliers de gestion de négociations et de conflits entre chaque sous-système.
- Un système où les comportements des composants du système sont non connus, et peuvent néanmoins agir à un instant donné de façon significative sur le comportement global du système. Dans de tels systèmes, les interactions posent davantage le problème de la coopération entre les composants du système.

Mon travail s'apparente plutôt au second aspect, où des agents modélisent une partie d'une expertise, et dont l'étude des interactions avec leur environnement et leur perception locale permet d'en déduire le comportement du système global. Du côté de la modélisation informatique, on ne cherche pas à inclure dans une vision distribuée des agents représentant des systèmes existants devant coopérer ensemble comme ARCHON par exemple [Arlabosse 94], mais à décomposer la complexité du domaine étudié, en donnant plus d'intelligence et d'autonomie aux composants du monde réel. La complexité d'un système est alors quantifiée par la précision des connaissances et des comportements représentés dans les composants du système.

Le paragraphe suivant aborde le mariage entre la complexité et l'agent, dans un cadre précis dégageant des problèmes fondamentaux pour les systèmes multi-agents.

3. Systèmes multi-agents et critiques auto-organisés

3.1 Quel est le problème ?

Pour aborder la modélisation de la complexité, nous avons choisi les phénomènes naturels comme terrain d'expérimentation. Partant d'hypothèses sur les agents naturels et leurs comportements, nous proposons de montrer comment le comportement du système implémenté peut être en adéquation avec celui observé dans la réalité. La compréhension de tels phénomènes nécessite de développer des expérimentations par simulation, comme dans [Quinqueton et Arques 95], celle-ci étant souvent la seule façon de déterminer le comportement de systèmes non

linéaires (dont le comportement est plus que la somme de ses parties [Taylor 91]), car elle fournit un moyen d'évaluation de mesure des résultats. Elle permet de vérifier et valider l'approche retenue, de mieux saisir les phénomènes et mécanismes internes régissant l'organisation du système et en outre, d'exhiber de nouveaux comportements et structures et d'aborder leur rôle causal dans l'apparition des phénomènes [Marcenac 98b].

Ainsi cette partie du travail est orientée vers la validation des systèmes multi-agents pour modéliser des systèmes complexes vus comme des *Systèmes Critiques Auto-Organisés* (SCAO)¹⁵ [Bak et al. 87], et en exhiber les paramètres internes d'une organisation qui sont cachés dans la dynamique du système. En d'autres termes, de valider l'approche par agents comme paradigme de modélisation des systèmes complexes, en se basant sur la distribution pour réduire la complexité du système, complexité liée à la fois à la structure de ses organisations et à son comportement non déterministe. La difficulté ne réside pas forcément dans l'élaboration d'un modèle réaliste, si l'on se réfère à la théorie du chaos, où l'une des conclusions est que le comportement apparemment complexe d'un système n'est pas nécessairement le résultat d'actions complexes [Casti 97].

3.2 Qu'est-ce qu'un système critique auto-organisé ?

Les écrits de P. Bak et K. Chen parus en 1991, décrivant des systèmes complexes par la théorie des systèmes critiques auto-organisés, m'ont fortement interpellé [Bak et Chen 91]. Ils stipulent que « *les grands systèmes interactifs évoluent naturellement et continuellement vers un état critique, tel qu'un événement mineur déclenche une réaction en chaîne pouvant engendrer une catastrophe* ».

Ce que nous en retenons est moins la vision mathématique et théorique du SCAO¹⁶, mais plutôt la vision étrange d'une modélisation de problème différente des approches traditionnelles, qui consiste à décrire un système général par décomposition structurelle en systèmes plus simples (proche d'ailleurs de certaines visions systémiques [Ferber 95 Page 14]). Nous sommes alors tentés d'analyser tout le poids des termes choisis et de les interpréter :

- *Grand système* : qu'est qu'un grand système ? Sans doute dans le contexte abordé, un système faisant de grandes choses (surprenantes, au comportement de relation aléatoire [Lorigny 92]) et un système imposant par sa taille. Cette vision rend alors compte d'un système composé de multiples facettes variées qui, si l'on l'associe à une vision plus artificielle¹⁷ que naturelle, en décrit un ensemble de composants choisis pour leur rôle joué dans le processus à observer.
- *Interactif* : interactif est la symbolique du dialogue, de l'échange avec autrui dans le but de produire un résultat satisfaisant à un objectif. L'interaction est une forme dynamique d'échange, à l'opposé d'une association sémantique matérialisant un lien statique qui perdure au delà de la vie du composant lui-même. Un grand système interactif serait donc vu comme un ensemble de composants naturels en relation dynamique les uns avec les autres, résultant d'une activité collective qui échappe en partie à chacun des agents du système [Lenay 94]. Un système complexe est alors décrit comme un grand système interactif si des composants y sont représentés et que les relations qui unissent ces composants privilégient l'aspect dynamique à l'aspect statique.

¹⁵ Terme connu aussi sous sa forme anglo-saxonne SOC (Self-Organized Critical) systems.

¹⁶ Vision liée à la théorie du chaos, qui présente un SCAO comme les caractéristiques d'un système dont le comportement se répète de façon similaire au cours du temps, décrivant un univers fractal représenté par une loi-puissance observée lors de l'apparition des catastrophes.

¹⁷ Le terme « système artificiel » est employé ici dans le sens commun d'un système construit pour modéliser des composants eux-mêmes artificiels.

- *L'évolution* : l'évolution d'un système est la symbolique du changement sous l'influence de contraintes et/ou d'événements qui l'affectent au cours de sa vie.
- *Naturellement et continuellement* sous-tend une activité constante du système, comme on le conçoit dans des systèmes temps-réel en Informatique, pour représenter le contrôleur d'un système mécanisé par exemple. Cette remarque sous-tend également qu'il ne peut y avoir de systèmes complexes qui n'évoluent pas.
- *Vers un état critique* : l'état critique est à la base de toute la théorie des systèmes critiques auto-organisés. Il est tout d'abord une propriété globale du système considéré, décrivant une approche du problème sous un angle bien différent de la modélisation traditionnelle qui ne voit l'état critique que comme l'un des effets de bords possibles du système. Ensuite, il permet d'expliquer le comportement d'un système, la complexité de la dynamique globale étant alors considérée comme intimement liée à l'état critique de cette dynamique.
- *Tel qu'un événement mineur peut déclencher une réaction en chaîne*, s'envisage comme une conséquence de l'état critique du système dans son entier, et si cet état critique est favorable à engendrer de telles réactions, il suffirait donc à expliquer la dynamique du système et par dérivation, son comportement.
- *Pouvant engendrer une catastrophe* : la notion de catastrophe se conçoit aisément dans les systèmes naturels, moins dans les systèmes artificiels. Je préfère donc l'assimiler plutôt au résultat surprenant (parce que difficile à obtenir) d'un système, toujours comme conséquence de la dynamique des interactions dans un système en état critique.

Les SCAO sont donc des systèmes qui réfèrent à un état critique, auto-organisés faisant référence au fait que l'état critique est alors un attracteur de la dynamique du système [Bonabeau et Bourguin 94]. Dans un SCAO, c'est l'état critique qui dynamise l'émergence des comportements, le système est en continuelle mouvance, donc en interaction constante, et c'est la dynamique de ces interactions qui positionne l'état critique du système, qui à son tour, fait qu'un comportement émerge.

L'un des exemples les plus connus de ce genre de système (que nous avons par ailleurs implanté partiellement pour valider GEAMAS V2.0), est celui des avalanches dans un tas de sable : l'ajout d'un grain sur un tas de sable peut alors déclencher une avalanche sans que l'on sache, *de l'extérieur*, quand, ni pourquoi cela va arriver, ni quel grain de sable en sera responsable.

3.3 Un SCAO peut-il être modélisé comme un SMA ?

Il convient alors naturellement de montrer que la modélisation par agents permet de suffisamment bien décrire cette expérimentation pour pouvoir en analyser les résultats. On peut retrouver des travaux fort intéressants sur cette démonstration expérimentale de la faisabilité, par exemple dans [Cerri et Loia 97], montrant la capacité de l'approche acteur à modéliser le raisonnement diagnostique concurrent.

Nous retenons que les modèles informatiques doivent permettre de (1) représenter des *composants atomiques* qui *interagissent* (dont l'intérêt de pouvoir travailler dans un niveau fin de granularité s'explique alors par l'expression des comportements et des connaissances qui est linéaire et prédictible), qui *évoluent* dans le temps, et dont un comportement *émerge* des interactions entre composants [Marcenac 97a].

Mais comment modéliser l'émergence de comportements ? Les travaux menés dans le domaine de la Systémique, qui regroupe l'étude des lois et des propriétés "d'entités émergentes", sont très liés à ce problème. Ils focalisent sur l'émergence comme le moyen de modéliser, simuler et finalement générer des comportements de plus en plus complexes [Bonabeau et al. 95] et se concentrent sur la structure du système et ses effets sur l'environnement, les aspects fonctionnels étant souvent occultés. D'autres travaux méritent d'être cités, comme ceux de S. Forrest [Forrest 90] et [Kanada et Hirokawa 94] sur le calcul émergent, ou ceux de J.R. Searle

sur la conscience [Searle 92].

3.3.1 Au fait, quels sont les mécanismes d'émergence ?

De façon générale, l'émergence dans la systémique est présentée comme traitant de l'apparition, dans un contexte spécifique et dans un environnement actif, de nouvelles formes, de nouveaux comportements, non identifiés auparavant, et dès lors irréversibles. Le terme d'émergence est alors employé dans les univers où il n'est pas possible de lier les comportements des composants du système avec des variables agrégées au niveau global du système [Drogoul et Ferber 94a]. Du fait de la non-linéarité des comportements, la difficulté est alors de modéliser des composants dont, soit on ne connaît pas la structure organisationnelle, soit on ne connaît pas le fonctionnement.

Les travaux auxquels j'ai participé en 1995, puis en 1996, dans le cadre du groupe de travail AFCET-AFIA [MR Jean 97] m'ont fait émerger (!) les idées suivantes :

- Tout d'abord, l'émergence impose une évolution dynamique des agents et de leur organisation. Nous défendons alors l'idée que l'évolution y tient donc un rôle fondamental. L'évolution est ici assimilée à un ensemble de mécanismes essentiels à l'émergence dans les systèmes artificiels. L'évolution doit être comprise dans son sens dynamique imposant un processus collectif, elle concerne : (1) la mise à jour des connaissances internes d'un composant pendant l'exécution (cette composante peut être aisément modélisée dans le cycle de vie de tout composant logiciel), (2) l'auto-organisation, définie comme l'apparition ou la modification dynamique de la structure d'un système. Cette vision restreint celle définie en [MARCIA 96], qui intègre notamment l'auto-organisation réflexive ou introspective, dont il ne sera pas question ici, et (3) l'auto-adaptation, définie comme la capacité d'un organisme à améliorer et ajuster son comportement à son environnement.
- Le résultat d'une émergence peut être classifié en trois catégories : émergence de structure, émergence de propriétés, et émergence de comportements [Marcenac 96a]. L'émergence structurelle et de propriétés concernent plus particulièrement l'apparition de concepts statiques dans le système, qualifié de *phénomène émergent*. L'émergence statique sera présentée dans le paragraphe 3.4, alors que nous focalisons ici sur l'émergence comportementale ou dynamique.
- L'émergence comportementale et structurelle est « construite », dans le sens où la *manière* dont les phénomènes sont produits est algorithmique, bien qu'il n'existe pas de processus global qui les dirige. Nous pensons qu'il s'agit là d'un manque de connaissances scientifiques, qui aujourd'hui ne ont pas assez avancées pour permettre d'exprimer dans un langage et une grammaire au niveau global ce qui se passe au niveau local, et donc d'être capable de réaliser une sorte d'*agrégation comportementale*. En allant plus loin, on peut alors raisonnablement penser que ceci constitue une caractéristique générale des systèmes artificiels, nous la définissons comme *émergence artificielle* [Marcenac 98b]. Cette idée est renforcée par celle de Mitchell et Hofstadter dans [Mitchell et Hofstadter 90], qui précisent que les explications liées aux comportements émergents ne peuvent pas être données à un niveau global, à cause de la limite des connaissances scientifiques d'aujourd'hui (cette considération avait d'ailleurs déjà été observée dans les années 1940 par L. Von Bertalanffy¹⁸).
- Enfin, le résultat de l'émergence observée dans un composant C est la conséquence d'interactions entre composants d'un niveau de *granularité inférieure* à C. Cette définition précise sensiblement celle plus coutumière donnée dans [PLEIAD 92], car elle sous-entend la présence de *niveaux de granularité*, qui définissent des niveaux de complexité des composants du système. L'émergence est alors vue comme le résultat d'une activité organisée des interactions entre 1% un composant de granularité *n* et des composants de granularité *n-1*, 2% des composants de granularité *n-1*, et 3% des composants de granularité *n-1* et un autre composant de granularité *n*.

¹⁸ Ces propos sur l'émergence ont été rapportés et discutés par Jean-Pierre Müller lors des journées de travail du groupe AFCET/AFIA IAD et SMA en Mai 1996.

L'apparition de phénomènes émergents est donc décrit par la façon dont les interactions entre composants génère des propriétés globales inattendues, non présentes dans les composants pris individuellement. Ainsi, l'interaction est le point central est le point fondamental de l'émergence.

Dans notre travail, nous avons abordé l'émergence par rapport à l'*auto-organisation* d'une part, ce qui suppose que des composants c_i de granularité inférieure puissent être décrits ainsi que le comportement du composant C qui les englobe, mais sans que la composition effective de C ne soit connue ; et d'autre part à l'*auto-adaptation*, dans le sens de l'émergence comportementale, c'est-à-dire dont le comportement d'un agent d'un niveau de granularité supérieure est supérieur aux comportements locaux individuels. Comme il n'existe pas de processus ou règle qui dirige ce comportement global, il est par conséquent émergent, d'où le terme d'émergence comportementale [Langton 89]. Ceci suppose alors qu'un composant C et ses composants c_i de granularité inférieure puissent être décrits, ainsi que des comportements possibles de C, mais sans que C ne puisse déterminer le comportement à produire, avant la simulation.

3.3.2 Extension et enrichissement du SMA

« L'intelligence collective n'est réellement acquise que dans la mesure où les mécanismes qui conduisent à ce résultat peuvent être identifiés » disaient [Stewart et Varela 94], page 153. Pour pouvoir décrire les mécanismes de l'émergence comportementale, il est intéressant, soit de les exprimer de façon théorique, soit de les isoler dans une architecture spécifique. Nous sommes ici proches des considérations de M. Wooldridge et N. Jennings [Wooldridge et Jennings 95], qui spécifient que tant que nous ne disposerons pas d'une architecture d'agents adéquate, nous ne pourrons jamais vraiment comprendre pourquoi le modèle marche.

De fait, la notion d'architecture¹⁹ d'agents prend ici toute son importance ; je la définis comme une *organisation*, c'est-à-dire une vue conceptuelle des composants du système et de leur positionnement les uns par rapport aux autres, et dans laquelle les décisions et les raisonnements sont distribués au sein d'agents représentant le monde réel. Différents schémas d'organisations ont été proposés dans la littérature pour structurer une société d'agents réactifs ou cognitifs [Baeijs et Demazeau 96]. Ne nous étendons pas sur cet état de l'art, des exemples de ces différentes approches sont décrits, entre autres, dans [Wooldridge et Jennings 95] et [Ferber 95].

Pour aborder l'organisation des agents, nous y avons étudié plusieurs points :

- Comment réduire la complexité ? Par l'abstraction et l'omission nous propose M. Fox [Fox 88]. L'abstraction est atteinte par l'utilisation de niveaux d'abstraction. Il convient donc de concevoir une architecture informatique dédiée, intégrant un modèle des caractéristiques des SCAO (évolution, interactions, dynamique d'interactions) et la mettre en œuvre dans le cadre d'une plate-forme logicielle expérimentale, permettant de construire des systèmes artificiels. L'omission, quant à elle, relève du masquage de détails (qui revêt alors une forme d'abstraction), lorsque ceux-ci n'apportent rien [Marcenac et Giroux 98].
- Comment modéliser l'émergence comportementale ? Dans le contexte des systèmes complexes, il est souvent difficile, voire impossible, de déterminer correctement au moment de la conception du système, quand et pourquoi une activité se produit. Cette « synthèse du comportement »²⁰, décrit l'activité du système et traduit son comportement global. Celui-ci ne peut être alors qu'implicite, et ne peut être décrit que par le traitement adaptatif des informations.

¹⁹ Ne pas confondre le sens que nous donnons ici au terme "architecture" avec celui de structure interne d'un agent, qui lui est souvent associé dans la littérature [Ferber 95 Page 27 et 137]. Ici le terme est emprunté à la Sociologie.

²⁰ Comme on dit en Vie Artificielle.

Point 1 : réduction de la complexité

Le premier point nous a conduit à modéliser le système complexe par une approche *descendante* et y réifier ses composants dans une architecture à trois niveaux d'abstraction de complexité descendante. L'ajout d'un niveau intermédiaire entre la société et les micro-agents est justifiée par notre interprétation de l'émergence ; ainsi la société étant unique et les micro-agents réactifs, et le comportement pouvant émerger dans un composant différent de celui qui traite initialement le processus, il convient de définir des composants intermédiaires.

La conception du système peut alors être envisagée de façon descendante, le niveau intermédiaire devenant alors lieu de description de structures, dont la dynamique résulte de comportements déterministes de ses composants. De telles organisations sont vues comme des sous-systèmes du système global lui-même, en reprenant la propriété *réursive* du SMA, considérant un agent comme une société, où le système possède un degré de complexité plus grand que ses parties. Dans ce cas de figure, si rien ne peut justifier une architecture à trois et seulement trois niveaux de représentation, il est néanmoins toujours possible de s'y ramener, en appliquant des principes conceptuels d'abstraction et d'omission dans la méthodologie de développement (que nous proposons dans le paragraphe 6 de la troisième partie).

Point 2 : identification des mécanismes d'interprétation

Le second point nécessite de donner aux agents les moyens de s'adapter aux situations et aux événements qui peuvent se présenter à eux. Au niveau interne du système, cette caractéristique s'apparente à la synthèse comportementale qui va réguler l'autonomie de l'agent. Au niveau extérieur, le résultat sera assimilé à de l'intelligence collective, nous préférons parler d'émergence comportementale car il n'y a pas représentation explicite de cette intelligence au niveau de la société d'agents.

Des travaux dans ce domaine ont été abordés par extension du modèle de Markov pour la prise de décision comportementale, notamment dans le monde de la Robotique. Ainsi, InteRRap [Müller 96] est basé sur ce principe ; il intègre des modèles probabilistes constitués d'un ensemble d'états de l'agent, et pour lesquels la distribution de la probabilité conditionnelle satisfait la propriété de Markov. Dans les travaux de P. Maes [Maes 92], les actions de l'agent sont basées sur l'existence de motivations internes. On notera également une approche intéressante à ce sujet dans les travaux de [Guessoum et al. 97] sur la définition de méta-comportements, pour superviser et contrôler les interactions d'un agent, par l'introduction d'un niveau de spécifications déclaratives des stratégies de raisonnement de l'agent.

Nous proposons que le mécanisme interne qui régit l'adaptation de l'agent soit le fief d'une *méta-fonction*, chargée d'évaluer un ensemble de paramètres externes et internes à l'agent pour décider du comportement à adopter. Dans le cadre de l'émergence construite, l'approche que nous défendons est que la méta-fonction permette l'interprétation des résultats provenant des niveaux inférieurs. Nous avons alors mis en évidence deux mécanismes pour implanter de façon claire et distincte les liens causaux inter-niveaux. Ces deux mécanismes implantent des liens conceptuels dynamiques et ont été nommés *Décomposition* et *Recomposition*. Le mécanisme de *Recomposition* permet de transférer des résultats issus des interactions entre agents de granularité n à un niveau $n+1$ ²¹. La *Recomposition* décrit une relation dynamique informationnelle entre agents et permet à la société de disposer de toutes les informations émanant des niveaux inférieurs pour produire son comportement. La *Décomposition*²² permet un transfert d'informations entre un agent de granularité n et un ou plusieurs autres agents de granularité $n-1$ (en ce sens ce mécanisme peut être vu comme réalisant l'opposé de la *Recomposition*). Il décrit cette fois une relation dynamique opérative entre agents. Ainsi l'émergence comportementale est le résultat de la triade {*Décomposition*}-{interactions entre micro-agents}-{*Recomposition*}.

²¹ Ce mécanisme est parfois appelé interaction agent-société.

²² Mécanisme parfois appelé interaction société-agent.

Critiques de « notre » émergence comportementale :

Le mécanisme de Recomposition ne fabrique pas de comportements, pas plus qu'il ne permet l'apparition de propriétés dans un agent. Il rend compte simplement de "l'émergence artificielle"²³. Il permet à un agent de disposer des résultats des interactions et des situations de coopération entre les agents de granularité inférieure dans l'organisation. Ainsi, la coopération favorise l'émergence des comportements de haut niveau, à cause de l'aspect collectif du travail des agents qui peut rendre une action possible. En d'autres termes, les interactions entre micro-agents conditionnent les comportements. Lorsqu'un message de Recomposition doit être traité par un agent de granularité supérieure, la méta-fonction associée à cet agent collecte les informations relatives aux comportements et à l'état des agents sous-jacents. Elle combine alors ces informations pour déterminer le comportement à appliquer à la situation qui vient d'être décelée.

3.4 Un système multi-agents est-il un système critique auto-organisé ?

Nous avons ensuite été tentés d'étudier la relation inverse, c'est-à-dire si les SMA, vus comme des systèmes émergents, peuvent aider à fournir les mécanismes essentiels à la modélisation de systèmes complexes de type SCAO. Pour répondre de façon affirmative, il est nécessaire de savoir représenter les phénomènes émergents dans le système. L'émergence doit alors être étudiée sous sa forme structurelle et caractéristique (émergence de propriétés). Nous nous rallions ici aux idées défendues par G. Kampis [Kampis 91], qui qualifie un phénomène émergent de résistant, cette propriété supposant qu'une fois le phénomène créé, il existe indépendamment des composants sous-jacents qui lui ont donné naissance.

3.4.1 Émergence de structures : auto-organisation

L'auto-organisation est une propriété supposée intrinsèque des systèmes complexes et sans doute la fonctionnalité clé. Je la définirais comme la capacité d'un système à être organisé ou réorganisé dans le temps pour former des structures sémantiquement remarquables. Elle est assimilée à une forme d'émergence, car elle est produite à partir d'interactions entre des composants de fine granularité.

Les travaux existants sur l'auto-organisation dans le domaine connexe qu'est la vie artificielle montrent que l'auto-organisation est le fruit d'une activité structurée dans un contexte spécifique et dans un environnement actif, donnant naissance à des phénomènes non identifiés initialement, mais dorénavant irréversibles. Elle est le résultat d'une instabilité structurelle des composants du système. Ces structures en s'organisant, acquièrent un degré de complexité plus grand que ses parties, autrement dit elles possèdent des propriétés irréductibles à celles de ses composants. L'auto-organisation a fait aussi l'objet de recherches récentes, en cognition, où le comportement d'un groupe d'étudiants est simulé durant leur trajet quotidien dans un campus en travaux [Brassac et Pesty 96], ou en Socio-Biologie où l'auto-organisation y est étudiée pour comprendre le degré de sophistication de l'organisation collective des insectes [Wilson 90].

Une autre remarque sur laquelle repose notre point de vue est que l'apparition de structures organisées dans le système est attribuée à la présence de relations exprimant les possibilités d'interactions qui unissent les composants. Le réseau initialement décrit pour organiser les composants d'un système et le réguler, s'étend et se complexifie au fur et à mesure que le système s'auto-organise. Il semble bien établi que cette propriété intervient du fait de l'organisation en réseau du système d'agents. C'est le pouvoir de connectivité du réseau qui progressivement organise les agents en un sous-réseau. Cette approche est bien illustrée dans les travaux ayant trait à la Sociologie, où l'émergence de sociétés organisées et les transitions entre des familles et des tribus de plus grande envergure sont illustrées [Gilbert et Doran 94].

²³ C'est-à-dire la mise en évidence des mécanismes conduisant à des phénomènes émergents dans les systèmes artificiels.

Là encore, les deux niveaux de granularité traditionnels d'un SMA ne peut conduire à la caractérisation de l'auto-organisation. Les nombreuses interactions ayant lieu au niveau microscopique restent trop complexes pour permettre d'identifier directement la formation ou la modification de structures existantes au niveau macroscopique. D'autre part, les structures émergentes ne peuvent être décrites au niveau microscopique, car elles supposent une vision plus globale de l'environnement dans lequel évoluent les agents qui les composent.

Ainsi, pour modéliser l'auto-organisation, nous proposons de considérer l'architecture à trois niveaux d'abstraction sous une vue ascendante en montrant que des médium-agents pouvaient être créés de façon dynamique pour représenter des phénomènes émergents. Nous avons d'autre part mis en évidence des mécanismes nécessaires à l'apparition de telles structures dans le systèmes [Marcenac 98b].

Point 1 : Une approche ascendante

Dans cette approche « ascendante », le niveau intermédiaire décrit une organisation d'agents que j'appelle « abstraite », par opposition à l'approche descendante qui décrit concrètement les composants physiques existants du monde réel. Les médium-agents abstraits ne sont donc pas nécessairement associés à une existence physiquement observable dans le système réel. Vu sous cet angle, un tel niveau d'abstraction est source de modification dynamique du système et de représentation de structures émergentes. Mais ce point de vue renforce la nécessité de savoir concevoir de tels agents, car s'il est clair que les agents sont dynamiquement créés, leur structure doit être statiquement conçue. La conception des médium-agents abstraits doit alors fournir l'abstraction la plus efficace en fonction du problème posé (notamment différencier les organisations concrètes et abstraites, savoir comment les organisations abstraites apparaissent et quelles sont les liaisons qu'elles entretiennent avec les organisations concrètes).

Cette approche devient donc complémentaire à l'approche descendante, et nous pouvons classer les médium-agents en trois catégories :

1. Des agents caractérisés par un comportement linéaire et descriptible : ici, les connaissances de l'agent et celles des autres médium-agents avec qui il est en communication suffisent à en décrire parfaitement le fonctionnement, même lorsque des événements viennent perturber son cycle de vie. Il dispose de toute la connaissance nécessaire pour répondre aux événements extérieurs (ce qui ne veut pas dire qu'ils ne puissent pas évoluer par la suite). Bien qu'il soit toujours possible d'en décrire la complexité, leur décomposition en micro-agents n'ont pas d'intérêt, puisqu'ils peuvent toujours répondre aux événements extérieurs, par le biais d'interactions avec des agents de même niveau de granularité. Un exemple d'un tel agent pourrait être un glaçon dans un verre à l'heure de l'apéritif. Le fonctionnement du glaçon est linéaire et descriptible (on sait qu'il fondra), et il est aisé de le décrire par une loi qui combine diverses informations (comme le volume du verre ou la densité du contenu par exemple) obtenues par le biais des agents voisins. Il n'est donc aucunement nécessaire dans ce cas qu'il interagisse avec ses composants, comme les molécules de glace par exemple. La présence de micro-agents est rendu indispensable dans les deux autres catégories décrites ci-dessous, lorsque la complexité est forte.
2. Des agents modélisant des comportements non-linéaires et imprédictibles. Un tel agent ne peut se suffire de ses propres connaissances et de celles des autres agents du même niveau de granularité pour répondre aux événements extérieurs. Ce type d'agents nécessite d'être décomposé, car son seul moyen de produire un comportement de haut niveau est d'analyser les comportements et les états de ses composants, ce qui impose de pouvoir connaître sa structure (ou plus exactement les comportements de ses composants). Par exemple, dans une maladie virale affectant la gorge, le virus se propage dans les cellules, qui en fonction de leurs états et de leurs comportements, vont être ou non affectées. Une fois l'ensemble stabilisé, la maladie se déclenche ou non. La contrainte (ici le virus) est donc propagée aux cellules, qui réagissent, propagent à leur tour la contrainte, et se stabilisent dans un certain état. L'ensemble des états des cellules détermine alors le comportement général de la gorge (qui peut inhiber ou non la maladie).

3. Enfin, des agents dont l'organisation n'est pas connue initialement, mais dont les caractéristiques, si elles sont connues, ne peuvent être instanciées qu'en fonction de l'organisation dynamique de la structure.

Pour mieux illustrer ces derniers, je prendrais deux exemples. Le premier exemple est celui d'un phénomène météorologique, ayant pour but l'observation de la naissance de cyclones (encore un exemple frappant de l'île de la Réunion !). Considérons l'atmosphère comme le macro-agent, et les particules d'air comme des micro-agents et le système dans un état stable. Si l'on applique alors une contrainte globale dans l'atmosphère (pression et taux d'humidité particuliers par exemple), la contrainte va s'appliquer de façon différente aux particules d'air qui la composent. De ces interactions et des changements d'états qui peuvent en découler au niveau des particules d'air (densité différente, humidité croissante, ...), peut naître un regroupement de certaines particules suivant un ensemble de caractéristiques communes, formant petit à petit un cyclone. Quant aux comportements et aux propriétés du cyclone une fois formé, ils dépendent du nombre et de l'état des particules d'air agrégées.

J'ai eu l'occasion de pouvoir observer pendant une année l'évolution des comportements de ma fille de 4 ans, jeune élève en classe de Maternelle, ce qui m'a inspiré ce second exemple, qui relate de la toujours difficile rentrée des classes. Le jour de la rentrée des classes, trente élèves ne se connaissant pas, arrivent dans la même classe pour y passer ensemble une année. Considérons un macro-agent représentant la classe des élèves, des micro-agents "élève", et un système ayant pour but l'observation sociale de la classe. Trois mois (jours ?) plus tard, des groupes (des structures d'agents "élève") se sont formés en fonction des goûts et des envies de chacun, mais il est clair que les comportements et propriétés de ces groupes pouvaient à l'avance être devinés : il y a toujours, dans toutes les classes, des groupes d'élèves studieux, perturbateurs, des garçons, des filles, ... qui, une fois formés, ne se mélangent que très peu aux autres groupes. Les groupes ainsi formés ont une existence propre au sein du système, et peuvent avoir un rôle déterminant dans son équilibre (par exemple, la dynamique de groupe).

Point 2 : Les mécanismes de l'auto-organisation

En analysant les quelques exemples précédents, on peut aisément distinguer les différentes étapes de l'auto-organisation : détection des conditions optimales à l'apparition du phénomène, apparition du phénomène lui-même et arrêt du phénomène. Nous identifions alors trois mécanismes dédiés pour l'auto-organisation [Calderoni et al. 97] :

1. Un mécanisme local qui décrit la sensibilité du système à certains paramètres critiques. Il est distribué sur les micro-agents, et destiné à identifier les agents dans un état instable (la stabilité d'un agent est définie comme l'état de satisfaction de l'agent en regard de son rôle, un peu comme dans le principe de l'éco-résolution [Drogoul et al. 91]). La mise en œuvre de la reconnaissance des agents partageant la même instabilité est alors régie par l'étude locale à l'agent des états des agents de l'organisation. Cette démarche fait apparaître les agents qui partagent des contraintes et caractéristiques communes, déterminant sa configuration actuelle. Elle est néanmoins guidée par les domaines abordés, une approche par détection de complémentarité ou d'antagonisme pouvant certainement être plus favorable dans la modélisation des sociétés artificielles par exemple. Notre approche est ainsi fondée sur les interactions entre micro-agents qui guide le processus d'auto-organisation, et ces interactions sont la conséquence de la création de structures dans le système, et par conséquent de la connectivité qui en découle (et non l'inverse, comme dans l'approche descendante). Une fois le phénomène détecté, chaque agent envoie alors un message de Recomposition à sa société pour indiquer qu'il peut participer au phénomène émergent.
2. Un mécanisme chargé d'agréger les micro-agents détectés en créant un médium-agent et de maintenir la structure. La prise en compte du phénomène au niveau global résulte de l'interprétation du message de Recomposition précédent, et conduit alors à créer la société et décrire les relations entre agents individuels et collectif ainsi créé. Ceci nécessite par conséquent de la part de la société une capacité importante de traitement d'informations des niveaux inférieurs.

3. Et un mécanisme d'arrêt de la propagation, chargé de repérer les agents qui ne propagent plus une contrainte, et donc sont positionnés dans un état stable. Ce mécanisme est qualifié « *d'observateur* ». J'ai insisté sur la notion d'observateur en [Marcenac 98b], et en ai proposé de deux types : l'observateur externe, qui voit le phénomène sans pouvoir le prédire, et l'observateur interne, qui est programmé dans le système lui-même. De mon point de vue, il est essentiel de différencier l'observation externe de l'observation interne. Du point de vue externe, l'auto-organisation est observée par l'utilisateur, et l'on parle alors d'émergence si l'utilisateur emploie des termes nouveaux (c'est-à-dire n'étant pas définis dans le niveau de granularité inférieure du système), pour décrire ce qui est observé [Brooks 89]. D'un point de vue interne, le mécanisme interprétant l'auto-organisation réfère à celui de l'attraction [Lenay 96], par l'observation de la stabilité des structures ainsi construites, la notion de stabilité étant alors dépendante du système construit. Ce mécanisme interne, qu'il convient de concevoir dans le système, régit le caractère inattendu des structures émergentes, ce que C. Lenay expose comme « *ignorance interne* » [Lenay 94]. Habituellement représenté dans les SMA par une boucle centralisée, l'observateur du phénomène auto-organisé est assuré localement dans notre approche, par chaque agent participant à la structure émergente.

3.4.2 *Émergence de propriétés : rétro-propagation*

L'auto-organisation est également porteur de mécanismes de régulation, veillant à la non-prolifération des structures intermédiaires ou des micro-agents et à la cohérence du système. Dans son article sur la Kénétique, J. Ferber indique à ce sujet que « *la structuration des systèmes complexes résulte de l'interaction entre agents ... De ces interactions émergent des structures organisées, qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents* » [Ferber 94].

En ce sens, l'auto-organisation sert au système de moyen d'adaptation. L'auto-organisation est donc une forme d'évolution, que l'on peut qualifier de *modification qualitative* du système. La relation intrinsèque entre auto-organisation et auto-adaptation apparaît donc ici naturellement.

Ainsi, ce qui peut justifier la création dynamique de structures intermédiaires dans le système est la nécessité de les voir représenter à des fins de traitement, ce qui est souvent imposé par le réel (après une avalanche, les flocons de neige n'ont plus la même énergie, ni ne sont plus positionnés au même endroit). En étudiant des travaux existants mis en œuvre dans MANTA [Drogoul et Ferber 94b] ou SWARM [Minar et al. 96], j'ai pu voir que peu d'approches nécessitaient une telle démarche, tant l'observation « *extérieure* » du phénomène émergent répondait aux spécifications fixées. Dans le cadre imposé par la simulation de SCAO, s'il est nécessaire de représenter des structures intermédiaires pour les « *voir* » émerger, il devient intéressant de mettre en évidence un mécanisme qui traite cette structure, en calcule ses nouvelles propriétés et maintient la cohérence de l'ensemble de ses composants. Ce mécanisme permet en quelque sorte la *mémoire* du système sur les phénomènes passés. Les structures ainsi organisées définissent en retour un ensemble de contraintes qui s'applique alors sur leurs composants (forme de rétroaction positive au sens de [Ferber 95 Page 95]).

A cette fin, nous avons introduit un mécanisme qualifié de « *rétro-propagation* » pour assurer cette fonction [Marcenac 98b]. La rétro-propagation contraint les micro-agents agrégés dans la nouvelle société, assurant une meilleure stabilité (au sens sémantique) de la structure. Les propriétés des médium-agents abstraits sont calculées au moment où de leur création, ce qui est facilité par les informations émanant des messages de Recomposition. Notre position est ici de considérer ces propriétés fraîchement affectées comme contraintes agissant sur toute la structure, et assurant un rôle causal au médium-agent. Les propriétés sont ainsi « *ré-introduites* » dans le niveau de granularité inférieur, forçant le comportement des micro-agents pour la suite de la simulation.

Ainsi l'organisation naît des interactions entre agents ou plutôt des comportements réflexes des agents lors des interactions, et ceci sans passer par la moindre propriété décisionnelle au niveau local. Leur interprétation au niveau global assure la structuration du phénomène lui-même.

Résumé et critiques de « notre » auto-organisation

L'auto-organisation dans nos travaux met en œuvre un mode de couplage variable (suivant la classification proposée en [Ferber 95 Page 124]), dont les relations entre agents évoluent dans le cadre des mécanismes qui viennent d'être précisés. Néanmoins, l'observation de l'arrêt de la propagation d'une contrainte impose l'étude de la stabilité de tous les agents de plus faible granularité. Ainsi la structure qui s'organise est considérée comme stable si l'ensemble de ses agents est stable. Je considère ce point comme assez discutable, surtout dans l'univers des systèmes complexes, où il apparaît clairement que la stabilité des composants d'un système n'entraîne pas la stabilité du système tout entier, ce qui irait à l'encontre des hypothèses posées notamment dans les systèmes critiques auto-organisés.

Par ailleurs ce mécanisme, qui peut s'apparenter à l'extraction de sous-graphes dans un graphe orienté, laisse sous-entendre une structure figée du système. Or, on peut noter que la structure initiale du graphe que décrit le macro-agent n'a pas d'importance. La connectivité peut être quelconque impliquant un graphe complexe, afin de décrire un système non contraint (seuls les temps de réponse ne sont pas garantis !). Dans ce cas, l'auto-organisation conduit à l'apparition d'un ordre, à partir d'un système dont la structure initiale est modélisée de façon aléatoire.

Enfin, le modèle qui ne demande qu'à être enrichi, ne traite actuellement pas de la révision des connaissances de l'agent. Une fois l'agent créé, s'il peut disparaître aisément, ses connaissances et comportements ne sont pas remis en question.

L'ensemble des mécanismes présentés dans ce couplage entre agent et complexité ont été regroupés au sein d'un modèle d'agent intégré dans une architecture. Cette implémentation a donné naissance à la plate-forme GEAMAS que nous présentons dans la troisième partie du document.

TROISIÈME PARTIE :

GEAMAS : UNE ARCHITECTURE, UN MODÈLE, UNE IMPLÉMENTATION

La plate-forme GEAMAS peut être perçue comme un environnement de développement et d'expérimentation par agents, permettant de construire des applications de simulation de systèmes complexes. Elle a été conçue dans le but de modéliser les univers où :

- des composants peuvent avoir des comportements non-linéaires, mais peuvent néanmoins agir à un instant donné de façon significative sur le comportement global du système,
- des structures, dont l'organisation initialement non connue, peuvent néanmoins influencer le système si elles apparaissent,
- les démarches de résolution ne sont pas déterministes, et où l'étude des interactions et l'exploration des mécanismes intrinsèques mis en jeu restent à ce jour la seule façon de modéliser, et par dérivation, de comprendre les phénomènes résultants.

Cette troisième partie est l'occasion de structurer les aspects conceptuels présentés dans la deuxième partie. Ils sont centrés autour d'une architecture à trois niveaux, un modèle d'agent et de société, ainsi qu'une implémentation fidèle à la conception.

1. Une architecture

L'approche retenue dans le projet SMA est de décrire un ensemble d'agents dotés de capacités substantielles de raisonnement et de capacités réactives (approche hybride selon [Wooldridge et Jennings 95]). On retrouve les fondements de cette approche dans les travaux de Jörg P. Müller sur InteRRap [Müller 96] ou I. Fergusson sur Touring Machine, où un agent intègre un niveau réactif, un niveau de planification et un niveau de résolution de conflits [Fergusson 92].

L'architecture de GEAMAS décrit une organisation hybride d'agents typés, décrite dans un graphe. Cette hiérarchie, comme nous l'avons vu dans la seconde partie, est appelée *organisation d'agents*²⁴, et est constituée de trois types d'agents, *macro*, *médium* et *micro*, chacun représentant un niveau d'abstraction supplémentaire par rapport au précédent. Chaque agent, quelque soit son type, est indépendant, et exécute des processus de façon asynchrone, respectant ainsi les principes de base d'un agent. La figure 1 illustre cette architecture.

2. Un modèle d'agent

Le modèle d'agent de GEAMAS est vu comme une spécialisation du modèle de Ferber [Ferber 95 Page 122], adapté à la modélisation de systèmes complexes. Il a une dimension sociale, relationnelle, environnementale et personnelle. Il est dicté par la triade connaissances, comportements, évolution (auto-adaptation et auto-organisation), illustrée dans la figure 2.

²⁴ On pourrait également parler ici d'architecture multi-couches pour rappeler la terminologie de [PLEIAD 92].

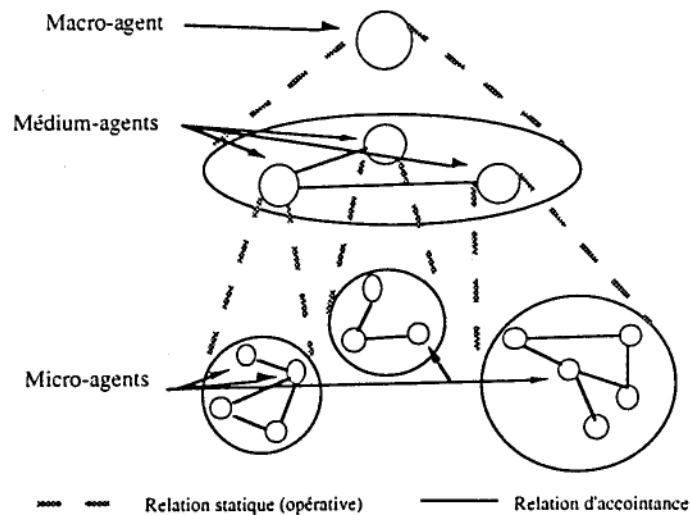


Figure 1 : L'organisation d'agents dans GEAMAS

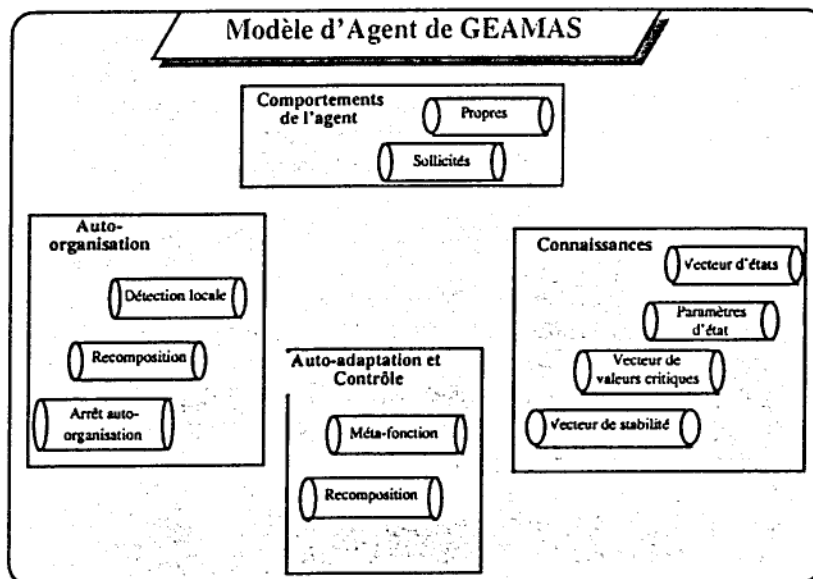


Figure 2 : Les principales caractéristiques du modèle d'agent de GEAMAS

Ainsi, un agent A_n d'un niveau de granularité n , peut être vu comme un ensemble de 4 caractéristiques essentielles : $A_n = (P, C, M_f, M_{ao})$, où :

- P est un vecteur d'états $X_i(t)$, $i=1..m$, décrivant l'état de l'agent à un instant t . L'état constitue les connaissances propres de A_n , modifiés par la partie comportementale de l'agent.
- C est l'ensemble des comportements de A_n , dont un élément c est choisi par le mécanisme d'auto-adaptation, et tel que :

$C' \{A_{n-1} R_i B_{n-1}\} M_f c(A_n)$, l'ensemble des comportements C' des agents significatifs de granularité inférieure A_{n-1} , après interaction R_i avec des agents de même niveau de granularité B_{n-1} , détermine par la méta-fonction M_f le comportement $c(A_n)$ de l'agent A_n .

- M_f est donc la méta-fonction responsable de l'auto-adaptation.

- M_{ao} est le mécanisme d'auto-organisation local à l'agent, et tel que :

$\{A_{i_n}\}_P M_{ao} A_{n+1}$, où l'ensemble des agents A_{i_n} de même niveau de granularité n , significatifs de la contrainte reçue et partageant le même état P , détermine par un mécanisme d'auto-organisation M_{ao} la création ou la mise à jour d'un médium agent de granularité $n+1$, A_{n+1} .

Quelques détails du modèle sont fournis ci-dessous :

Connaissances

Les états marquent les étapes importantes de la vie d'un agent. L'évolution d'un agent entre deux instants est caractérisé par la suite des états qu'il a traversé entre ces deux instants. L'état représente donc une phase temporaire de la vie de l'agent [Guessoum et al. 97]. Un agent change d'état par une loi de transition, en répondant à l'apparition un événement. La nature des lois de transitions dépend de la manière dont l'état est défini initialement, lors de la conception du système.

- Les connaissances propres d'un agent déterminent son état et sont données sous forme d'un *vecteur d'états* décrivant les valeurs des paramètres de l'agent.
- Certains paramètres participent directement au rôle de l'agent ; ce sont les *paramètres d'état*.
- L'agent répond aux sollicitations extérieures (par un comportement), lorsqu'au moins une valeur de l'un de ses paramètres d'état dépasse une *valeur critique*. Un comportement est donc associé à chaque valeur critique.
- La *stabilité* est définie comme l'état de satisfaction de l'agent en regard de son rôle et est bornée par les valeurs critiques des paramètres d'état de l'agent.

Comportements de l'agent : indépendance, communication et interaction

- Les *comportements propres* (que j'appelle aussi *comportements internes*) décrivent la partie indépendante de l'agent ; ils décrivent un cycle de vie de l'agent et traitent des actions que l'agent peut mener sans recevoir de sollicitations extérieures.
- Les *comportements sollicités* (ou *comportements externes*) répondent, quant à eux, aux sollicitations extérieures (ou contraintes), transmis d'agent en agent par communication pour simuler les événements qui surviennent. Dans le cas des agents réactifs, un tel comportement agit suivant 4 axes : (1) ils mettent à jour le vecteur d'états, (2) calculent le reste de la contrainte à propager, (3) choisissent les agents à qui propager et (4) la propagent dans les agents choisis.

Auto-adaptation et contrôle des comportements : autonomie de l'agent

- L'auto-adaptation est vue dans GEAMAS comme le choix d'une action à effectuer par l'agent, en fonction de l'état de l'agent, de ses connaissances propres et celle des autres agents de son environnement. Ce mécanisme réalise le *contrôle du comportement* et implante la partie autonome de l'agent, caractérisant sa dimension personnelle. Isoler cette composante est essentielle pour tout environnement orienté agents (des travaux connexes aux miens sont en cours à ce sujet, voir [Guessoum et al. 97]). Dans GEAMAS, des mécanismes de type conscience individuelle de l'agent pourront être greffés à terme, menant au choix intelligent du comportement de l'agent par analyse de ses comportements antérieurs, grâce à l'acquisition d'informations pertinentes par des techniques d'apprentissage automatique (ce qui constitue l'un des objectifs de la thèse de S. Calderoni que j'encadre actuellement). Actuellement, le contrôle du comportement est réalisé par un processus indépendant qui intercepte les messages à traiter par l'agent, et ce préalablement à toute action de l'agent. En fonction de l'état de l'agent, des messages eux-mêmes, de leur priorité et de leurs arguments, la méta-fonction peut arrêter le traitement en cours, afin de mettre en œuvre un comportement plus adapté à la situation courante.

- Enfin, au niveau local, un mécanisme informe la société de l'agent sur son état de satisfaction (sa stabilité). Il joue le rôle d'observateur pour l'auto-adaptation. C'est une *sorte de Recomposition*, avec comme argument la valeur de stabilité de l'agent. Rappelons que la Recomposition est un lien conceptuel dynamique et décrit une relation dynamique informationnelle entre agents. Il est utilisé par un agent lorsque celui-ci est redevenu stable après avoir agi, ce qui donne des informations essentielles à la méta-fonction de l'agent de granularité supérieure pour en déterminer son comportement.

Comportement générique d'auto-organisation

- Un mécanisme de détection locale, permettant de connaître les agents impliqués dans une structure émergente. Actuellement basé sur la détection de « similarité » entre agents pour les besoins d'une expérimentation, ce mécanisme réducteur est surchargeable.
- Un mécanisme de déclenchement de la structure auto-organisée, qui avertit alors le médium-agent (s'il existe déjà) ou le macro-agent (dans le cas contraire), afin que la structure du médium-agent soit modifiée ou créée. Ce mécanisme est aussi une *sorte de Recomposition* (avec des arguments de nature différente de celui de l'auto-adaptation).
- Un mécanisme d'arrêt de la structure auto-organisée, qui vérifie dans l'agent « détectant », la stabilité des agents participant à la nouvelle structure.

3. Un modèle de société d'agents

GEAMAS décrit un modèle de société d'agents, illustré par la figure 3 :

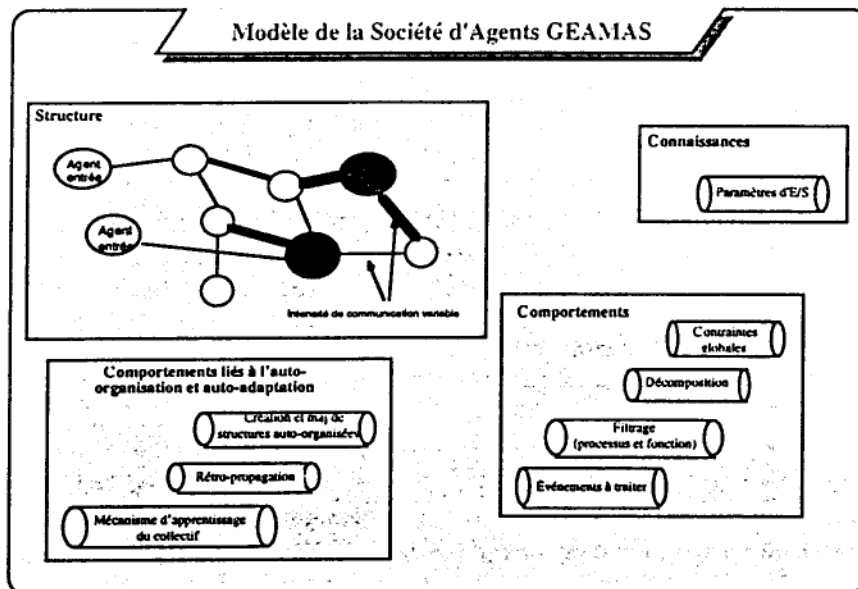


Figure 3 : Illustration du modèle de la société de GEAMAS

Une société d'agents S_A est donc l'ensemble de : $S_A = (P, S, C, Mao\{A_{n-1}\})$, où :

- P est l'ensemble des paramètres d'Entrée/Sortie de S_A ,
- S décrit la composition de la structure de S_A ,
- C est l'ensemble des contraintes globales et des événements que sait traiter S_A ,
- $Mao\{A_{n-1}\}$ est le mécanisme responsable de la création de la structure émergente constituée de l'ensemble des agents $\{A_{n-1}\}$, et de la rétro-propagation des contraintes sur $\{A_{n-1}\}$.

Quelques détails du modèle sont fournis ci-dessous :

Connaissances

C'est l'ensemble des paramètres *d'entrée* qui régissent tout le système, et de *sortie* qui décrivent les variables globales résultat. Le comportement externe à observer constitue le but du système, et est géré par une interface d'entrée/sortie avec le monde extérieur (autre logiciel ou personne humaine).

Structure de la société

Elle décrit l'organisation, c'est-à-dire la structure des liaisons dynamiques entre agents dans un réseau, et ne doit pas être confondue avec l'organisation hiérarchique de tâches, mentionnée dans [Fox 88], en économie ou organisations humaines. La division fonctionnelle qu'elle impose requiert une forte coordination entre les agents pour prendre des décisions adéquates.

Dans notre réseau apparaît la notion de priorité, ou *d'intensité* des arcs, représentant ce qui sera la priorité de traitement des messages. Mais le choix d'une organisation en réseau est surtout motivé par sa souplesse et sa non-réductibilité. En effet, paradoxalement, un réseau peut être considéré comme s'opposant à toute structure (contrairement à une liste ou un arbre). L'analyse de réseaux en Sociologie par exemple [Gilbert et Doran 94] montre bien la nature de ce paradoxe, le réseau représentant des liens conjoncturels et occasionnels entre individus, où l'évolution et l'adaptation y sont toujours possibles. Cette caractéristique peut s'avérer fondamentale dans les systèmes complexes, car elle peut permettre de montrer comment la complexité se crée, à partir d'un réseau non contraint (qui laisse toute possibilité d'interaction aux agents, comme par exemple la formation de groupes dans une classe d'élèves ou encore les éléments de la croûte terrestre). En Biologie, les réseaux de neurones en illustrent parfaitement l'idée, où les études sur le cerveau humain laisseraient entrevoir qu'un neurone lance des connexions au hasard vers d'autres neurones, en donnant le maximum de chance à chaque liaison de perdurer, et de construire ainsi un fonctionnement intelligent. Cette idée va d'ailleurs au delà, elle montre que c'est le pouvoir de connexion qui organise progressivement le système et le place dans un état tel que son comportement nous semble intelligent. Elle montre par là-même la liaison émergence structurelle et émergence comportementale, dont il convient de tenir compte dans les environnements de développement par agents.

Un autre intérêt d'un réseau réside dans la modélisation même des liaisons physiques du monde réel. Le réseau peut facilement engendrer une représentation topologique de l'univers réel, où la géométrie peut y être alors implicitement représentée. Cette topologie est, dans le cadre des systèmes complexes, très intéressante à mettre en œuvre. Elle conduit à l'étude des connexions entre agents, ce que j'ai appelé la « *connectivité* » [Marcenac 97b], qui exprime la vraie grandeur du réseau et sa puissance d'organisation.

Comportements

- Des contraintes globales, qui définissent des comportements spécifiques s'appliquant à toute la structure. Elles se composent généralement de lois ou de stratégies générales suivant le domaine d'application.
- Le mécanisme de Décomposition, qui permet un transfert d'informations entre un agent de granularité n et un ou plusieurs autres agents de granularité $n-1$ (en ce sens ce mécanisme peut être vu comme réalisant l'opposé de la Recomposition). Il a pour but le partage de connaissances et de contraintes : il peut en effet y avoir des contraintes globales et des paramètres d'Entrée/Sortie devant être connus à un moment donné par certains agents de granularité inférieure. La société peut alors contraindre une partie de l'état et du comportement des agents subordonnés, en agissant sur la structure entière ou sur des agents particuliers.
- Un processus de filtrage qui permet de trouver l'ensemble des agents de la société à qui un événement extérieur sera distribué (l'ensemble des agents impliqués dans l'événement). Lui est associée une fonction de filtrage, qui permet de « discrétiser » un événement en entrée pour le distribuer sur les agents de granularité inférieure [Marcenac et Giroux 98]. Une fois les agents sélectionnés et l'événement discrétisé, l'événement est distribué par la

Décomposition.

- Et enfin, les événements que sait traiter la société.

Comportements liés à l'auto-organisation et l'auto-adaptation

- Le mécanisme responsable de la création ou la modification d'un médium-agent lors de l'apparition (dynamique) de structures auto-organisées.
- Le mécanisme de rétro-propagation, qui calcule les valeurs du vecteur d'état du médium-agent ainsi créé ou modifié par le mécanisme précédent, et qui les applique sur tous les agents composant le médium-agent par Décomposition.

Récurtivité des modèles

L'organisation d'agents de GEAMAS intègre la récursivité du modèle, un agent peut donc être vu à la fois comme un agent et une société d'agents, comme l'illustre la figure 4. La récursivité a un pouvoir unificateur entre les agents et les systèmes. Elle est très intéressante pour tout travail de modélisation, car elle permet d'appliquer le même modèle d'agents à différents niveaux de granularité, renforçant le caractère générique de l'approche, et simplifiant ainsi la conception d'applications.

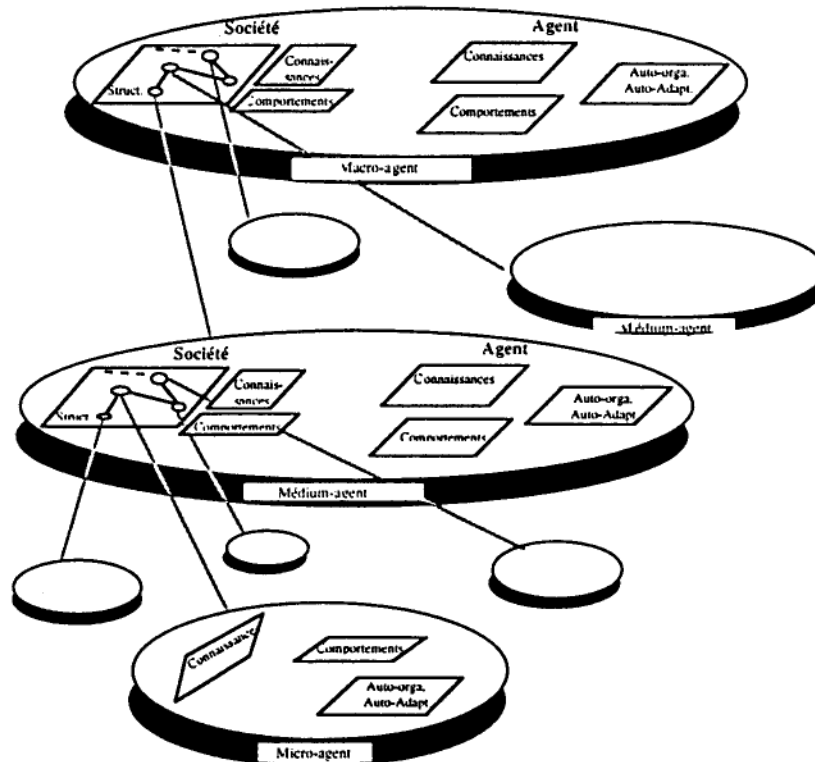


Figure 4 : Illustration de la récursivité du modèle

4. Une plate-forme logicielle

La plate-forme GEAMAS a été implantée dans un premier temps en reprenant la base de l'environnement ReActalk [Giroux 93], une plate-forme d'acteurs réflexifs construite autour de Smalltalk-80. L'idée générale de ReActalk est qu'un agent est décrit par son comportement, son comportement opératoire (le traitement des messages) et son écosystème. La notion d'agent autonome conduit alors directement à celle d'acteur, le concept d'acteur modélise à la fois les composants de la société (avec des objets Smalltalk) et leur évolution concurrente. [Marcenac et Giroux 98] en décrit plus en détails l'implémentation.

Pour implémenter explicitement les mécanismes de communication et interaction, d'indépendance et d'autonomie, ainsi que l'auto-organisation et auto-adaptation, et être ainsi fidèle à la vision conceptuelle de nos travaux, GEAMAS a été entièrement réécrit en Java (environnement JDK 1.1). L'analyse et la conception sont décrites en détail dans [Marcenac 98a]. La figure 5 suivante en résume l'essentiel.

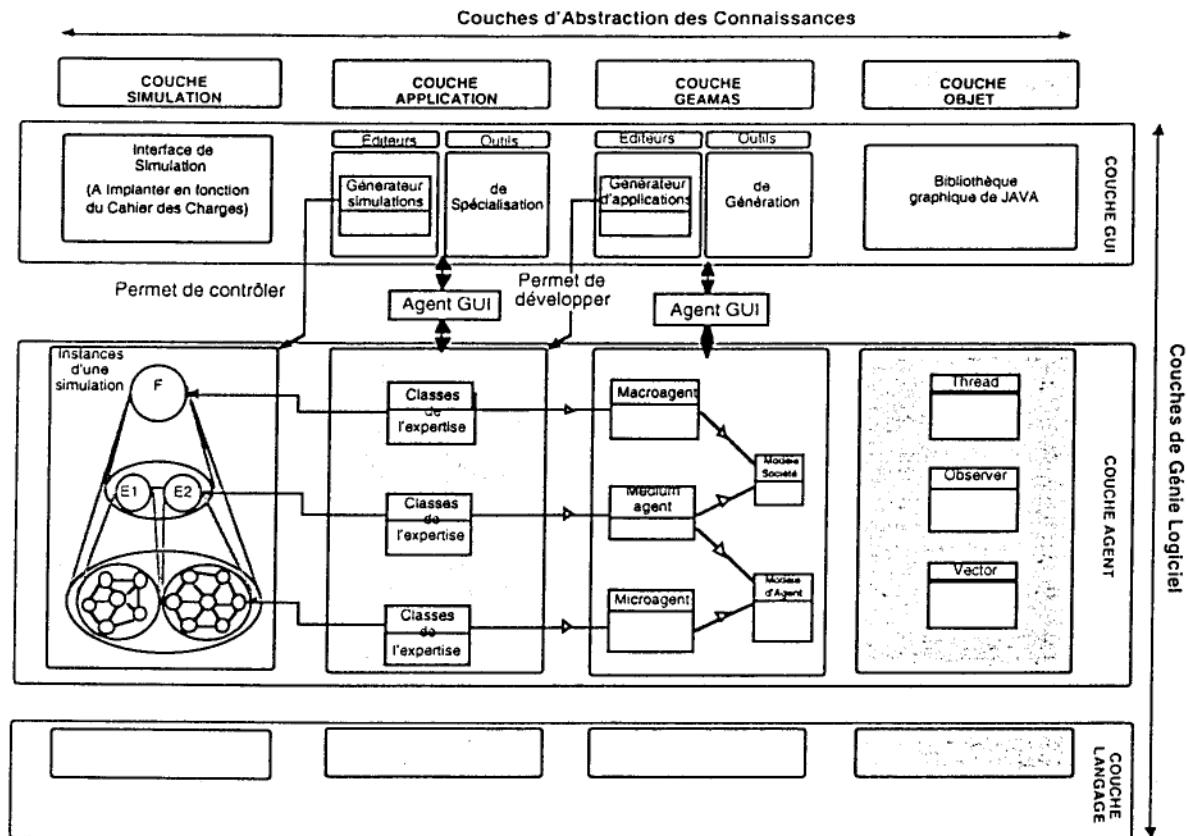


Figure 5 : Schéma global d'analyse de la plate-forme GEAMAS V2.

Horizontalement, la plate-forme décrit 3 couches logicielles, de bas en haut :

- La couche Langage, qui décrit les classes de base Java utilisées.
- La couche Agent, qui permet d'ajouter les fonctionnalités agent aux objets, l'agent étant alors le composant logiciel de base de la plate-forme.
- La couche GUI, qui masque la complexité de la plate-forme au développeur en introduisant des éditeurs pour la mise au point d'applications (qui évolueront par la suite vers une sorte de générateur d'applications) et de simulations (instanciation des classes précédentes et contrôle des simulations). Cette couche implante en fait la notion de laboratoire virtuel pour la simulation de systèmes complexes.

La plate-forme est également conçue selon 4 couches verticales, de droite à gauche :

- La couche Objet qui est la couche langage contenant les classes de base de Java utilisées (*Thread* par exemple).
- La couche GEAMAS qui implémente le modèle d'agent et de société intégrés dans les macro, médium et micro-agents. Cette couche est le coeur du système : chaque module y est étudié pour implanter un concept particulier de l'agent (connaissances, activité, indépendance et autonomie). Le module *communication* par exemple implémente le modèle de communication asynchrone grâce à deux classes : *In* qui stocke les messages que l'agent doit traiter par ordre

de priorité, et *Out* qui stocke les messages à propager au voisinage. Le mécanisme utilisé pour la propagation au voisinage est basé sur les observateurs Java [Marcenac et al. 97].

- La couche Application, qui peut être vue comme le résultat de l'application des modèles d'agent et de société sur un domaine d'application particulier.
- Enfin, la couche Simulation qui est le niveau classique des instances.

Résumé

Enfin, on peut résumer la plate-forme GEAMAS, son organisation et son modèle d'agents, suivant la classification donnée en [Ferber 95]. Cette classification regroupe trois dimensions, l'analyse fonctionnelle, l'analyse structurelle et les paramètres de concrétisation :

- L'analyse fonctionnelle décrit les principales fonctions que les composants de l'organisation peuvent remplir. Au niveau représentationnel (modélisation de l'environnement), GEAMAS s'inscrit dans les dimensions physique, relationnelle, environnementale et personnelle ; au niveau organisationnel (allocation des tâches), dans les dimensions physique, sociale et relationnelle ; au niveau conatif (fonction décisionnelle), dans les dimensions physique et relationnelle ; au niveau interactionnel, dans les dimensions physique, sociale, relationnelle et environnementale ; au niveau productif (fonction comportementale), dans la dimension physique et enfin, au niveau conservatif (maintien de la structure) dans les dimensions physique et sociale.
- L'analyse structurelle décrit les relations abstraites qui relient les agents. Dans GEAMAS, les relations abstraites décrivent des relations d'acointances, des relations dynamiques opérative (mécanisme de Décomposition) et informationnelle (mécanisme de Recomposition). Le couplage est variable (les relations évoluent dynamiquement, guidées par des mécanismes), la structure de subordination est hiérarchique (du macro vers les micros, du macro vers les médiums, ou des médiums vers les micro-agents) et enfin, la constitution de la société est pré-définie et émergente.
- Les paramètres de concrétisation décrivent la répartition des compétences par rapport à la tâche à résoudre. Dans GEAMAS, la spécialisation est variable et peut être proche de 1 dans le cas des micro-agents, où très peu de compétences y sont développées, et la redondance peut être au contraire forte, surtout dans les micro-agents, chacun disposant de la même compétence.

La quatrième partie présente maintenant les expérimentations qui ont été menées dans le projet SMA lors des différentes spirales de développement de GEAMAS, pour en valider les principes.

QUATRIÈME PARTIE :

EXPÉRIMENTATIONS ET MÉTHODOLOGIE

Pour valider l'organisation et le modèle d'agent, plusieurs applications ont été réalisées avec des objectifs particuliers. Tout d'abord, une application aux environnements d'apprentissage avec ordinateur, TREMMA²⁵ a été étudiée, dans le but d'appliquer le modèle à la modélisation d'un utilisateur résolvant un problème. Dans ce contexte, la coexistence de points de vue multiples, qui nous conduit à une approche de type multi-experts distribuée, a été étudiée. L'approche par agents est apparue comme une alternative appropriée pour aborder la représentation de multiples solutions d'un problème sous la forme de points de vue et leur coordination, la localisation des actions de l'apprenant et leur situation dans l'intégralité de la résolution et enfin, l'examen concurrent des alternatives de résolution empruntées par l'apprenant tout au long de la résolution. Ensuite, des applications ont été réalisées dans le cadre de la modélisation de phénomènes naturels, principalement les éruptions volcaniques (GEOMAS²⁶) et les séismes.

Dans cette quatrième partie, deux courtes expérimentations sont rappelées, METAN qui a permis de valider la typologie des connaissances utilisée dans l'application TREMMA, et la Cryptarithmétique ayant permis d'initialiser l'expérimentation des univers distribués. L'application TREMMA, ainsi que les applications de simulation GEOMAS et SÉISMES, sont ensuite présentées.

Cette quatrième partie est l'occasion de décrire les applications par rapport aux points de GEAMAS qu'elles ont eues pour objectif de valider. Chacun des trois paragraphes suivants présentant les expérimentations, décrit sommairement le domaine d'application, les objectifs de validation de GEAMAS, l'instanciation du modèle de GEAMAS sur le domaine d'application ainsi que les résultats obtenus.

1. METAN et Cryptarithmétique

1.1 METAN

Dans le cadre de la validation des types de connaissances de EDDI²⁷ [Marcenac 90] reprise ensuite dans TREMMA, une collaboration a été entreprise en Mars 1993 avec le laboratoire CEMEF (Centre de Mise En Forme des matériaux) de l'école des Mines de Paris (antenne de Sophia-Antipolis). La collaboration portait sur la conception d'un environnement d'apprentissage avec ordinateur, portant sur les choix et la mise en forme de matériaux pour des processus industriels. Dans un document de spécifications que j'ai rédigé en Février 1994 [Marcenac 94b], les composants tutoriels minimaux pour un prototypage rapide ont alors été proposés. Cette expérience a donné des résultats convaincants dans la spécification des types d'agents S, D et R repris par la suite dans TREMMA. La conception et l'implantation d'un premier prototype dans ce contexte ont donné naissance à une publication en 1994 [Wybo et al. 94].

1.2 L'expertise de Cryptarithmétique

La Cryptarithmétique est la première expérimentation que nous avons menée hors du cadre de

²⁵ Acronyme pour Transfert d'Expertise avec un Modèle Multi-Agents.

²⁶ Acronyme pour GEOphysics and MultiAgent Systems.

²⁷ Environnement de Développement de Didacticiels.

EDDI, conjointement avec M. Aubé, doctorant de l'Université de Sherbrooke à Montréal, et A. Senteni, Maître de Conférences associé à l'Université de la Réunion.

Trois problèmes de Cryptarithmétique [Aubé 93] ont été étudiés et représentés sous forme d'un ensemble d'agents communicants. Ce type de problèmes se propose de résoudre des équations arithmétiques simples, dans lesquelles les chiffres sont codés par des lettres (ce type de problèmes est à rapprocher de l'exemple bien connu SEND + MORE = MONEY de [Newell et Simon 72]).

Il est possible d'aborder la modélisation de cette expertise de deux manières. Une première approche, à rapprocher de celle de l'éco-résolution [Drogoul et Ferber 94b], consiste à considérer l'aspect réactif des composants, et à associer un agent à chaque chiffre ou lettre. Le comportement général est ensuite décrit par un contrôle centralisé, implantant une fonction mathématique permettant d'approcher la solution des problèmes. La deuxième approche est à dominante cognitive, et consiste à utiliser un niveau de granularité supérieur, en associant un agent aux trois éléments de l'équation : numérateur, dénominateur et résultat. Dans ce cas précis, cette approche permet une distribution plus naturelle de l'expertise sur plusieurs agents, sous la forme d'un ensemble de "Pièces de Connaissances" et contenant des théorèmes ou des heuristiques de calcul.

La résolution et l'implantation de cette première expérience m'a permis de mettre en avant l'intérêt d'une approche distribuée dans le cadre d'une expertise cohérente et peu traitée par ailleurs. Elle a donné lieu à une publication en 1994 [Leman et al. 94b].

2. L'application TREMMA

Description du domaine d'application

Le domaine d'application est celui des environnements d'apprentissage avec ordinateur, et la problématique est celle de la modélisation de l'apprenant. Les environnements d'apprentissage avec ordinateur nécessitent une modélisation des connaissances de l'apprenant avec un niveau fin de granularité. L'hypothèse de travail, que j'avais vérifiée dans EDDI et METAN, est que le niveau de l'apprenant peut alors se mesurer comme l'union des connaissances statiques, dynamiques et de savoir-faire maîtrisées par celui-ci. La reconnaissance des démarches de résolution mises en œuvre par l'apprenant nécessite alors une analyse poussée des connaissances statiques et dynamiques, ainsi que du contexte dans lequel évolue l'apprenant.

Par ailleurs, la résolution d'un problème est par nature un processus non linéaire, et un expert utilise des démarches de résolution différentes suivant son niveau d'habileté ou sa préférence. Ainsi, plusieurs résolutions différentes, mais pas nécessairement disjointes, peuvent exister pour résoudre un même problème. L'on peut alors faire l'analogie avec la perception d'un expert, et assimiler ces différentes résolutions à différents points de vues. C'est la coexistence de ces différents points de vue sur la manière de traiter un problème qui fait la richesse du système de résolution de problèmes. La modélisation de l'apprenant peut alors être enrichie grâce à l'examen parallèle et parfois contradictoire de plusieurs branches de résolution du problème, cet examen constituant les hypothèses sur les démarches de résolution de l'apprenant.

La spécificité de ce domaine d'application impose donc d'une part, une représentation des connaissances à un niveau de granularité satisfaisant et d'autre part, une représentation de type *multi-experts distribuée*. L'approche multi-experts distribuée est comprise ici comme un mode de représentation de multiples points de vue d'experts, permettant la localisation des actions de l'apprenant et leur situation dans l'intégralité de la résolution, ainsi que l'examen concurrent des alternatives de résolution empruntées par l'apprenant.

Objectifs de Validation

Les objectifs de TREMMA étaient centrés autour de la validation de la représentation par graphes d'agents de GEAMAS et la récursivité du modèle. Les différentes solutions d'un

problème, initialement données par les experts, décomposent le problème général en une succession de sous-problèmes qui peuvent être résolus par l'utilisateur. Les connaissances statiques et dynamiques y sont représentées par des agents typés, respectivement nommés S-agents et D-agents. Pour représenter les solutions d'un problème, les agents S et D y sont organisés suivant plusieurs graphes, qualifiés de *graphes de raisonnement*, qui décrivent l'ensemble des connaissances à enchaîner pour résoudre le problème. Un graphe de raisonnement décrit une société d'agents de GEAMAS, dans lequel chaque étape de la progression dans la résolution du problème est signifiée par l'un des noeuds du graphe [Leman et al. 94a].

Instanciation du modèle de GEAMAS sur le domaine d'application

1. Connaissances de l'agent, basées sur l'introduction de valeurs de croyance [Leman et al. 95a]. Les croyances sont ici d'ordre factuel, ce sont des connaissances propres de l'agent (liées au domaine d'application). Elles ne portent pas de dimension environnementale, sociale, relationnelle ou personnelle ; elles ne sont pas utilisées à des fins de prévision, mais à des fins de modélisation du niveau de connaissances de l'apprenant²⁸.
2. Comportements de l'agent : comme l'expert, l'apprenant est une personne humaine dont le comportement n'est pas toujours "cohérent", mettant en œuvre des démarches par nature non séquentielles. S'il est possible de représenter les différents points de vue des experts dans le système, il est alors intéressant d'examiner en parallèle plusieurs hypothèses sur la démarche de résolution de l'apprenant, en les calquant sur les points de vue des experts. Cet algorithme spécifique a été dénommé "*recouvrement distribué*" [Leman et al. 95b]. Le recouvrement distribué suppose une mise à jour d'un coefficient de croyance dans tous les agents concernés des différents graphes de raisonnement. N'ayant pas de dimension relationnelle, un agent de TREMMA va donc, pour propager une valeur de croyance à un autre agent, utiliser une technique de transmission successive aux accointances, point à point (ou "broadcasting"²⁹) [Marcenac et al. 96c]. Une solution de type statique n'a pas été envisagée, car elle amènerait tous les agents de même nature à se connaître avant le début de session, comme dans [Guessoum 96] qui gère un graphe de dépendances, ce caractère figé étant trop contraignant et "contre nature" dans ce type d'application. Je me suis également penché avec S. Leman et un collègue du département de Mathématiques de l'Université, sur l'étude de la convergence des valeurs de croyances lors de la propagation dans les graphes. Les résultats de ce travail ont montré que cette propagation n'est pas infinie et peut être facilement contrôlée. La démonstration est donnée dans [Leman et al. 96c] et montre que les valeurs de croyance propres des deux agents convergent vers une même valeur λ . Le nombre de messages traités pour atteindre λ peut être contrôlé par un seuil de propagation (différence numérique entre la nouvelle et l'ancienne valeur du coefficient).
3. Comportements de la société : plus on s'approche de la solution, plus les agents reçoivent des informations de leurs fils et acquièrent ainsi les perspectives globales sur la démarche de résolution de l'apprenant ; ils peuvent alors, le cas échéant, détecter les portions de résolution maîtrisées par l'apprenant. Cette détection se caractérise dans TREMMA par la création dynamique d'agents spécifiques dans le système (les R-agents), qui fonctionne alors par auto-organisation. L'algorithme chargé de cette création a été appelé algorithme "*d'expertisation*" [Leman et al. 96b].

Une application de la récursivité du modèle de GEAMAS

Si l'on se place dans un cadre visant à développer des cursus d'enseignement (parfois appelés "curriculum" dans certains travaux Canadiens - notamment [Frasson et al. 92]), un problème peut être alors perçu comme un agent, faisant partie d'une société d'agents représentant un objectif pédagogique. L'on peut alors aisément montrer [Leman et al. 96a], en se servant de la récursivité de GEAMAS, comment le modèle d'agent peut servir de base à la description d'objectifs pédagogiques, de façon similaire à des problèmes. L'ensemble de ces objectifs pédagogiques peut, à son tour, être vu comme un cursus de formation, également décrit dans

²⁸ Il serait d'ailleurs plus juste de parler de poids ou de coefficient de renforcement plutôt que de croyance.

²⁹ Ce type de transmission est également appelé interaction diffusion.

une société d'agents.

Résultats et Critiques

Deux expertises ont pu être implantées avec le système TREMMA avec EpiTalk [Pachet et al. 94]. La première concerne un sous-ensemble de la géométrie élémentaire mettant en œuvre l'algorithme de recouvrement distribué, et la seconde un jeu de cartes (le jeu de Tarot) mettant en œuvre l'algorithme d'expertisation. Si elles demeurent essentielles pour valider à la fois le modèle de représentation multi-experts distribué et son instanciation sur un domaine d'application, elles manquent néanmoins d'envergure et de réalisme, dans un domaine qui est par nature dévoué aux expérimentations à une échelle plus réaliste.

Par ailleurs, l'on peut également regretter que l'apprenant soit modélisé au travers de valeurs de croyances, qui reste à mon goût un peu arbitraire, tant l'absence de fondements théoriques sur le sujet est flagrant. S'il convenait de poursuivre dans cette voie, je souhaiterais alors rapprocher mes travaux de modèles validés dans les sciences cognitives, comme les travaux d'Anderson par exemple [Anderson 83]. Enfin, dans ce domaine d'application, l'auto-adaptation, si toutefois elle reste envisageable dans ce contexte, n'est pas une priorité, car il s'agit moins de fournir un programme d'enseignement à partir d'interactions entre problèmes, que d'aider l'utilisateur à acquérir des mécanismes de résolution sur l'expertise considérée. Le mécanisme de Recomposition est donc moins significatif dans ce cas de figure. L'expertisation pourrait cependant constituer une capacité intéressante à explorer, pour repérer les intentions de l'apprenant. Elle nécessiterait alors d'avoir un certain recul sur les sessions antérieures afin d'analyser tous les éléments nécessaires à leur interprétation par une méta-fonction.

Le point fort reste néanmoins l'originalité de l'approche multi-experts distribuée pour modéliser les démarches de résolution d'un apprenant dans un environnement d'apprentissage avec ordinateur. Elle suit la voie qu'avaient tracé A. Gisolfi et V. Loia, qui ont reformulé la conception des environnements interactifs d'apprentissage avec ordinateur en terme d'acteurs [Gisolfi et Loia 94].

3. L'application GEOMAS V2

Description du domaine d'application

Le cadre général de l'expérimentation est celui de la simulation des éruptions volcaniques du Piton de la Fournaise, La Réunion. L'application décrit la composition du volcan par approximation de la réalité, et a pour objectif la reproduction des comportements éruptifs observés dans la réalité au cours du siècle dernier. Elle propose une description de portions de roche et de lentilles de magma, et prend en compte la dimension de l'évolution de tels composants au cours du temps. Du point de vue géophysique, l'application est utilisée pour reproduire des phénomènes physiques observés, simuler des modèles de physique statistique et explorer leur aptitude à comprendre la complexité intrinsèque d'un volcan, et valider ainsi l'hypothèse de fonctionnement d'un volcan comme un SCAO.

Dans GEOMAS, la circulation du fluide est donc aléatoire, mais elle n'a pas d'importance, car il s'agit plutôt de retrouver des données réelles par simulation, afin de déterminer les paramètres rentrant en jeu dans les mécanismes éruptifs. D'autres expérimentations pourraient requérir une meilleure adéquation par rapport à la réalité, notamment lorsque l'environnement physique y tient un rôle essentiel et nécessite alors une meilleure cohérence et symbiose entre le système artificiel et réel (comme dans les travaux de C. Cambier à l'ORSTOM [Cambier et al. 97], où la circulation des gouttes de pluie sur le sol est contrainte par des relevés cartographiques représentés à l'extérieur du système). Comme nous le verrons dans la partie perspectives, une thèse est en cours pour modéliser de tels aspects environnementaux dans la plate-forme GEOMAS.

Objectifs de Validation

Cette expérimentation a été réalisée dans le but de valider les agents intermédiaires de

l'organisation de GEAMAS, ainsi que les mécanismes de Décomposition/Recomposition utilisées dans l'émergence comportementale. Le niveau intermédiaire est utilisé pour conserver toute trace des déformations engendrées par l'activité volcanique pendant la simulation, et ainsi mieux mesurer la résistance du composant.

Un autre objectif de l'application est centré autour de la validation de la partie indépendance des agents, en particulier les agents modélisant les lentilles de magma : en effet, une lentille qui cristallise en se refroidissant sur les bords externes peut créer une surpression et conduire à une éruption isolée. Pour reproduire ce phénomène, des comportements internes ont du être décrits dans l'agent lentille.

L'auto-adaptation dans le domaine d'application

L'auto-adaptation est décrite par des comportements définis dans les micro-agents (les cellules) et une méta-fonction dans les médium-agents, interceptant les messages de Recomposition émanant des cellules.

Le comportement d'une cellule lentille est focalisé sur le refroidissement. Si aucun événement externe ne vient perturber la cellule, celle-ci se refroidit en modifiant ainsi sa température. La façon dont elle se refroidit dépend de sa position géographique, et décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne des bords de la lentille. Lorsque la température est suffisamment basse, un message de Recomposition est envoyé au médium-agent et la méta-fonction analyse alors son état pour décider d'une éruption isolée ou non.

Résultats et Critiques

La preuve d'un SCAO ne peut être donnée formellement. Néanmoins des signes opérationnels ont été mis en avant dans le cadre des simulations avec GEOMAS, et sont liés au fait que le système possède de nombreux degrés de liberté en interaction, dont la dynamique est non-linéaire et les événements externes (le flux de magma dans GEOMAS) n'est pas uniforme [Sornette 91]. Notre système a permis de reproduire remarquablement les données réelles et même expliciter certains mécanismes [Lahaie et al. 96].

L'implémentation de GEOMAS V2 a été directement dérivée de celle de la première version de la plate-forme GEAMAS, implantée en ReActalk. L'auto-adaptation des agents a été implantée en utilisant la réflexivité de ReActalk. L'application a donné lieu à deux publications [Giroux et al. 96a] et [Marcenac et al. 96a] et un exemple complet de fonctionnement de GEOMAS V2 est décrit dans [Marcenac et Giroux 98]. Cet exemple permet d'illustrer comment les messages sont traités dans GEAMAS, comment des comportements non prévisibles peuvent être néanmoins reproduits à partir d'interactions entre agents de plus faible niveau de granularité, et enfin comment la complexité est distribuée dans les micro-agents.

Cette expérimentation m'a également permis de me conforter dans l'idée que l'adaptation d'un agent était réalisée, dans les systèmes artificiels, sans émergence forte. Dans GEOMAS V2, le comportement d'un médium-agent intervient après stabilisation des contraintes générées par les interactions des agents de plus faible granularité.

4. L'application SÉISMES

Description du domaine d'application

La deuxième expérimentation est liée à l'apparition de phénomènes sismiques sur des zones géologiques, dont la mesure du risque est, une nouvelle fois, peu déterministe. L'occurrence des phénomènes sismiques sur une faille pré-existante est donc spatialement et temporellement imprévisible. Bien qu'étant encore du domaine de la Géophysique, ce domaine d'application présente des différences fondamentales avec celui de la Volcanologie. En effet, du point de vue conceptuel, la structure de la faille est parfaitement connue, ainsi que les mécanismes des perturbations qui s'appliquent sur la faille, qui vont induire la rupture des compartiments rocheux qui la composent et faire naître les séismes.

Objectifs de Validation

Cette expérimentation était pour moi l'occasion de montrer une autre facette (cette fois-ci

ascendante) du niveau intermédiaire, et valider les mécanismes d'auto-organisation de GEAMAS.

Instanciation de l'organisation de GEAMAS sur le domaine d'application

L'approche proposée par GEAMAS dans la simulation de ces séquences d'événements sismiques s'adapte bien à la distribution hiérarchique des éléments du système. Ainsi, l'application est décrite par un macro-agent décrivant une faille soumise aux perturbations, des micro-agents décrivant des "cellules de roche" interagissant entre elles et présentant des lois physiques simples régissant la combinatoire des forces, et des médium-agents modélisant les séismes qui vont émerger au cours de la simulation.

La présence de médium-agents pour modéliser les séismes est motivée par le fait que les séismes laissent des traces sur les éléments de roche touchés par la perturbation, qui sont alors contraints en retour. Dès lors, leur état doit être modélisé à chaque perturbation. Pour modifier les paramètres de cellules affectées par un même événement sismique, le nouvel état doit nécessiter la connaissance de l'ensemble des cellules touchées par ce séisme, et pouvoir ainsi retranscrire un comportement adéquat.

Résultats et Critiques

Tout comme avec GEOMAS, cette expérimentation a fourni d'excellents résultats sur le plan géophysique ; elle a permis de rendre compte de phénomènes naturels, tout en modélisant leur complexité et en gardant trace des perturbations passées, ce qui donne un caractère plus réaliste aux simulations. Le prototype a été finalisé grâce à la définition et l'implantation d'une interface conviviale. Les simulations sont poursuivies à l'heure actuelle au LGIT à Grenoble.

Du côté de GEAMAS, l'expérimentation a montré comment le mécanisme d'auto-organisation fonctionnait dans un cadre grandeur nature. Il est raisonnable de penser, même si cela n'a pas été expérimenté, que GEAMAS pourrait aisément modéliser la création de la complexité dans un système, à partir d'un réseau d'agents bruts et non contraints, les agents s'organisant au gré des événements pour former des médium-agents et la société elle-même. Une telle vision des choses nécessiterait néanmoins de décrire l'auto-organisation au niveau local, en tant que composante du modèle d'agent et non du modèle de société, comme c'est le cas actuellement. L'application SÉISMES a donné lieu à deux publications spécifiques [Marcenac 96a], [Calderoni et Marcenac 97].

5. 10! et grains de sable

Factoriel 10 est un problème présenté par le sous-groupe ASA (Architectures des Systèmes d'Agents) du groupe SMA AFCET/AFIA, pour comparer les approches utilisées et les architectures des différentes plates-formes de développement par agents dans la communauté francophone. Notre équipe a été fortement intéressée par la participation à ces travaux. R. Courdier et moi-même avons proposé de valider la plate-forme GEAMAS V2 au travers de cet exemple.

Il s'agit donc de constituer une population d'agents chargée de leur faire calculer 10!, et composée de la façon suivante : un agent factorielle F1 qui sait comment on calcule une factorielle, mais qui ne sait pas multiplier, et 3 agents multiplicateurs M1, M2, M3 qui connaissent les 4 opérations (à deux arguments). La difficulté est entièrement centrée autour de l'interaction. Dans cet exemple, les interactions entre agents ne sont pas évidentes à mettre en œuvre, tant le problème n'est pas un problème par nature « agent ». Le problème serait en effet plus aisé à représenter par une solution de type « blackboard ».

Nous avons néanmoins proposé une approche qui fait apparaître 3 micro-agents M1, M2, M3, possédant un comportement externe de multiplicateur entre deux nombres et un macro-agent F1, dont le comportement décrit l'algorithme du factoriel. Le document [Courdier et Marcenac 97b] décrit plus en détails la solution retenue. Elle a été ensuite implémentée en respectant scrupuleusement le modèle et l'architecture de GEAMAS en Java. Le code est téléchargeable à

l'url : <http://www.univ-reunion.fr/~geomas/PTO/facto.html>.

Enfin, pour valider les principes d'autonomie et de communication de GEAMAS V2, et servir de tests aux éditeurs de simulation de la couche GUI, nous travaillons actuellement au développement d'une application de type SCAO (les grains de sable).

6. Conception d'applications dans le cadre de GEAMAS

D'un point de vue conceptuel, travailler avec des agents fournit une division naturelle qui aide à réduire la difficulté de la conception d'applications orientées agents. Notre approche du développement par agents avec GEAMAS est structurée, et repose sur *l'analyse des rôles* des composants du monde réel et des relations qui les unissent. Elle consiste à répartir les rôles dans les trois types d'agents de l'organisation de GEAMAS. L'analyse des rôles a pour but l'étude du monde réel en vue de l'identification des agents de la future application. Dans le contexte de GEAMAS, cette tâche décrit une abstraction de l'univers, et consiste à donner une représentation informatique aux entités du monde réel (réification), suivant les trois types d'agents de l'organisation (macro, médium, micro).

La décomposition adéquate du domaine étudié est abordé sous un angle non fonctionnel, puisque les comportements de certains composants sont imprévisibles ; elle correspond donc plutôt à une description naturelle des composants du réel, sans chercher la représentation interne exacte, ce qui est fidèle à la vision de H. Simon [Simon 96]. La tâche de décomposition est dictée par les buts du système à construire et sa raison d'être, c'est-à-dire par les caractéristiques du problème abordé. En particulier, un composant logiciel est susceptible d'être un agent :

- S'il joue un rôle pour le système, indépendamment des sollicitations extérieures qu'il reçoit (principe d'autonomie et d'indépendance),
- S'il évolue dynamiquement, en fonction de la modification de son environnement (principe d'évolution),
- S'il interagit avec les autres agents (principe d'interaction et de communication asynchrone).

La distribution des rôles dans l'organisation de GEAMAS adresse le problème de la "*taskabilité*", c'est-à-dire du niveau de granularité où les activités et fonctions de l'agent doivent être décrites. Ce travail est délicat, car il détermine le niveau correct de complexité et de granularité pour l'application. Pour ce travail, trois étapes séquentielles sont proposées :

1. Commencer par construire la structure des micro-agents, qui n'inscrivent que le modèle d'agent, et où le concepteur peut être à même d'appréhender la compréhension et la modélisation des interactions des agents les uns avec les autres. Cette étape s'oppose ainsi à la conception du niveau macro, par son *atomisation*, c'est-à-dire l'expression d'un certain individualisme des composants du monde réel. Toute la difficulté de l'analyse est donc de trouver le juste niveau de complexité et de granularité. D'après notre approche, la limite de précision est atteinte lorsqu'il n'est plus possible d'exprimer le modèle d'agent, ou lorsque les mécanismes d'évolution, les comportements et les connaissances de l'agent n'ont plus de sens d'être décrits par rapport aux objectifs de l'application. Il est important de noter ici que l'on cherche le niveau de granularité le plus fin, et non à tout prix l'agent le plus réactif que l'on puisse décomposer sur le domaine considéré. La granularité du niveau micro peut être de n'importe quel type, pourvu que des primitives comportementales, ayant un sens pour le problème posé, puissent être identifiées. Ce qui importe dans cette recherche, c'est donc le rôle de l'agent dans le système, que l'agent obtenu puisse être considéré dans d'autres domaines comme cognitif ou non. Ainsi, un être humain peut être micro-agent si son rôle est de type réactif : c'est le *contexte conceptuel* qui prédomine dans le choix des micro-agents. [Brassac et Pesty 96] l'ont d'ailleurs entrevu dans leur exemple de « pelouse fourmilière », où le comportement d'un étudiant sur un campus est assimilé à un comportement réactif. Pour isoler les micro-agents, de telles conditions restreignent l'analyse à un nombre d'itérations relativement faible, où la "dissection" d'agents en agents de plus en plus fins

rendrait l'application non réaliste (ce qui reste par ailleurs un argument pour défendre une architecture à trois niveaux d'abstraction). Les comportements des micro-agents sont alors généralement simples et facilement isolables. De même les connaissances, qui reflètent les paramètres d'états devant ensuite mesurer la stabilité de l'agent, découlent aisément de cette analyse.

2. Décrire ensuite le macro-agent. À l'opposé des micro-agents qui modélisent des micro-comportements, le macro-agent modélise les macro-comportements, sous forme de résultats à observer. L'analyse est alors dirigée par les buts de l'application et conduit naturellement à la description des aspects externes, comme les paramètres et interfaces d'Entrée/Sortie, ainsi que la structure interne et les contraintes globales. Cette étape n'offre pas de difficulté majeure, exceptée pour la structure de la société, qui est guidée par la présence ou non de contraintes sur les possibilités d'interaction.
3. Décrire enfin les médium-agents. L'analyste doit se laisser conduire par une description naturelle et par les buts de l'application. Un médium-agent applique à la fois le modèle d'agent et de société, et il arrange les buts intermédiaires de l'application. Enfin, suivant les applications, la modélisation est vue comme ascendante ou descendante.

L'approche ascendante favorise la description des micro-agents et des relations que ceux-ci entretiennent avec la société. Dans ce cas, l'interprétation des messages de Recomposition doit centrer l'attention du concepteur, car il est important de concevoir ce niveau de distribution en restant très proche de l'objectif fixé par la simulation visée, et en adaptant la vision du monde à cet objectif. Ainsi le composant abstrait sera choisi de façon efficace pour l'objectif du système global, qui sera ensuite créé par la dynamique des interactions entre des composants élémentaires. Comme l'évolution d'un composant abstrait créé dynamiquement par l'auto-organisation varie selon des lois du domaine d'application abordé, il convient de le définir ici avec précision. Notamment, on devra prendre soin à l'interprétation qui doit être faite des paramètres d'un message de Recomposition, ainsi qu'à la rétro-propagation, tous deux mécanismes essentiels de l'auto-organisation que nous avons isolés dans GEAMAS.

L'approche descendante quant à elle, est ciblée sur des domaines d'application plus descriptifs, où les objectifs sont autres. En effet, elle permet de décrire les sous-structures comme des agrégations de micro-agents. Le choix des sous-structures agrégées est dépendant de l'objectif global du système. Il convient alors de concevoir ce niveau de distribution en restant proche de la réalité du système naturel, et des informations sûres dont on dispose. Ce type de conception transpose les composants réels dans le niveau de granularité adéquat de l'architecture, où la représentation de ses comportements y est la plus naturelle.

On peut regretter, comme je le souligne dans la dernière partie consacrée aux perspectives de recherche, que cette méthodologie ne soit qu'une ébauche, et constitue plus un ensemble de conseils pragmatiques plutôt qu'une démarche cartésienne. Ceci est principalement dû aux balbutiements des travaux actuels en la matière, comme cela a d'ailleurs longtemps été le cas des méthodologies objet, avant que les standards OMT et maintenant UML ne soient plus ou moins adoptés de tous.

PERSPECTIVES

Cette dernière partie nous permet de lister quelques enrichissements des travaux et les idées qui sont à creuser avec les étudiants que j'encadre actuellement et ceux à venir.

1. Auto-adaptation

L'auto-adaptation est une caractéristique qui permet à un agent de reproduire des comportements adaptés à son état et à celui de son environnement, à l'instant t . Dans les systèmes naturels, l'auto-adaptation est vue comme la modification d'un système lui permettant de survivre dans un environnement en constante évolution. Elle est donc fortement liée, sinon induite par l'évolution statique du système, comme l'apparition de structures auto-organisées par exemple.

Elle définit ainsi l'habileté du système, sa capacité à utiliser des connaissances acquises dans des situations similaires ou différentes, et à les appliquer à des situations nouvelles. Une place importante doit donc être faite, à la base, aux savoir-faire déjà constitués et à leur représentation. J. Ferber précise par ailleurs bien ce point de vue [Ferber 95 Page 59], en spécifiant que l'évolution est l'une des composantes de l'adaptation, l'autre composante étant l'apprentissage³⁰. La capacité d'apprentissage peut alors conférer aux agents la possibilité d'optimiser leur comportement pour accroître leur efficacité ou pour modifier leurs tendances comportementales, afin de mieux appréhender les changements brusques de l'environnement.

L'habileté du système peut ainsi être basée sur l'apprentissage de réflexes comportementaux par les agents eux-mêmes face à une situation. Elle requiert la présence d'un mécanisme de contrôle de qualité dans chaque agent pour raisonner et planifier son propre comportement. L'apprentissage constitue également la mise en oeuvre de comportements non prévus dans un agent. Il définit une capacité individuelle de l'agent, lui conférant une stature cognitive par le fait qu'il peut anticiper les événements futurs et s'y préparer en planifiant ses actions. Cette capacité est fort intéressante dans les applications de prévision (je pense en premier lieu aux phénomènes naturels, par rapport à notre expérience dans ce domaine).

Cette problématique actuellement en pleine expansion pose néanmoins quelques problèmes intéressants : la difficulté se concentre sur le mariage entre approche distribuée et apprentissage. L'apprentissage dans un système composé d'agents doit être distribué au sein des agents, c'est-à-dire localisé dans chaque agent, et opérant à partir des informations connues localement par l'agent qui l'abrite [Camps et Gleizes 96]. L'auto-adaptation impose également l'auto-évaluation de l'agent, où l'agent doit être en mesure d'observer son comportement et d'en tirer leçon. Il s'agit là d'un mécanisme réflexif capable de corriger un comportement par rétro-action, sorte de conscience de l'agent. La plate-forme GEAMAS, implantant un mécanisme de méta-contrôle de comportements à la fois dans l'agent et dans la société, a été conçue pour permettre l'intégration de telles stratégies.

L'un des étudiants doctorant que j'encadre actuellement, S. Calderoni, travaille à l'introduction de tels mécanismes en s'intéressant aux algorithmes génétiques [Dessalles 96]. Actuellement au début de cette recherche, S. Calderoni propose un couplage de la programmation génétique et du renforcement pour modéliser l'évolution des comportements des agents et en sélectionner ensuite les meilleurs [Calderoni et Marcenac 97b].

2. Méthodologie de conception orientée agent

³⁰ Au sens apprentissage automatique, et non au sens apprentissage humain.

La conception de l'expérimentation sur IO! [Courdier et Marcenac 97b] a soulevé des problèmes urgents dans la mise au point d'une « véritable » méthodologie de conception d'applications par agents. Ce problème n'est évidemment pas récent, et se pose actuellement comme une perspective de recherche de nombreux chercheurs qui travaillent sur les environnements de développement par agents. Mais que recouvre le terme « véritable » à nos yeux ?

- Tout d'abord, la représentation des connaissances et des mécanismes de base d'un agent. Un formalisme graphique, mettant en évidence les notions d'indépendance, d'autonomie, de communication a été proposé dans le cadre de l'expérimentation sur IO! et deux étudiants de Maîtrise en ont assuré une implémentation prototypale dans le cadre de la définition des éditeurs génériques de la plate-forme GEAMAS V2 [Poquet et Vidot 97]. Le formalisme doit être étendu en 1998 par R. Courdier, en vue de son utilisation dans l'éditeur générique d'applications de GEAMAS.
- Ensuite, la proposition d'une approche méthodologique claire et précise dans la phase d'analyse d'un problème, permettant de localiser les agents potentiels du monde réel, en repérant les composantes d'indépendance et d'autonomie.
- Enfin, la mise au point d'un outil de type Génie Logiciel Assisté par Ordinateur pourrait constituer une belle conclusion de ces travaux.

Dès l'année 1998, sera proposé un stage de DEA avec pour objectif une étude avancée de l'état de l'art des méthodologies de conception d'applications concurrentes, empruntées au domaine du temps-réel ou non. Une première liste des différences fondamentales entre conception concurrente et conception agent pourrait alors être proposée dans ce cadre.

3. Formalisation du modèle

Il m'a été récemment donné la possibilité d'amorcer une ouverture de mes travaux vers des études plus formelles, notamment par l'appui de la Logique et de l'algorithmique de graphes. En 1996, avec l'un de mes collègues F. Mesnard, nous avons regardé les possibilités offertes par le langage de programmation multi-paradigmes Oz, à travers la programmation du jeu RoboWar [Celestin et Picard 96]. L'objectif était de comprendre comment le mariage entre l'approche logique et concurrente pouvait permettre l'expression de modes de pensée agent. L'expérimentation menée avec une approche conceptuelle agent avait amorcé une ébauche du rapprochement. J'aimerais poursuivre ce rapprochement, en m'intéressant davantage à l'introduction de contraintes et sa formalisation pour gérer les mécanismes d'évolution dans GEAMAS.

Par ailleurs, il peut paraître fécond d'étudier l'adaptation des mécanismes d'extraction de connaissances dans les graphes dans le cadre de GEAMAS. En effet, la reconnaissance d'agents participant à un phénomène émergent pourrait ainsi s'en voir renforcé. Disposer alors d'un algorithme efficace, qui permettrait de préserver en outre la cohérence de l'organisation, me semble ici être une opportunité intéressante. Cette partie du travail pourrait permettre un rapprochement avec l'équipe IKBS de l'IREMIA, dirigée par N. Conruýt, et qui a amorcé un travail dans ce sens.

4. Des orientations nouvelles sur des domaines déjà abordés

Dans les Environnements Interactifs d'Apprentissage par Ordinateur (EIAO), domaine d'application que je connais particulièrement pour y avoir effectué mes travaux de doctorat, il est intéressant de proposer des extensions des travaux de la thèse de S. Leman sur le système TREMMA. Outre l'accentuation d'expérimentations dans un cadre réel (classe d'élèves de collège par exemple), j'aimerais y aborder la mesure du niveau de l'apprenant par des croyances au sens cognitif du terme, ainsi que l'intégration des travaux menés avec GEAMAS sur les SCAO et l'émergence. L'idée serait alors de considérer un système d'enseignement comme un

système émergent, en construisant le modèle de l'apprenant à partir des interactions, et en générant des structures émergentes pour y représenter le niveau de l'apprenant. Cette approche permettrait dans un premier temps de renforcer la validation des mécanismes d'auto-organisation sur un domaine différent de celui des phénomènes naturels, mais également d'ouvrir une nouvelle voie de recherche sur les connaissances de base qui peuvent déclencher chez l'individu des comportements intelligents lors de la résolution de problèmes.

5. Des environnements d'expérimentations nouveaux

Il est intéressant d'envisager des terrains d'expérimentation nouveaux dans le cadre de nos recherches :

- J'aimerais aborder dans un futur proche, une application visant à modéliser des organisations humaines, en particulier mettre en œuvre une application de l'auto-organisation de groupes d'élèves initialement non contraints et non existants. Ce travail rejoindrait les idées évoquées en conclusion de l'application des séismes, pour montrer qu'il est possible d'utiliser les mécanismes d'auto-organisation de GEAMAS pour créer des sociétés artificielles, à partir d'un ensemble d'individus qui peuvent rentrer en contact les uns avec les autres. Ainsi, les groupes s'organisent en fonction des échanges qu'ils ont les uns avec les autres et des affinités de chacun. Cette application pourrait également inspirer des travaux pour montrer que la dynamique de groupe peut naître de l'auto-organisation, ainsi que proposer une représentation différente des phénomènes organisés (par exemple les individus antagonistes).
- Dans le même ordre d'idée, j'aimerais explorer d'autres types de mécanismes de détection locale responsables du déclenchement de l'auto-organisation de GEAMAS. Ainsi l'approche par antagonisme semble bien servir le domaine des sciences sociales, et l'approche physique de l'action et champs de potentiels (comme celle présentée en [Ferber 95 Page 194]) semblerait plus adaptée aux SCAO. L'adaptation de cette approche pourrait permettre l'arrêt d'un phénomène émergent par convergence vers un vecteur potentiel, et la création des structures d'agents émergentes par la mise en évidence de champs potentiels attractifs.
- Je souhaite ensuite tester les idées développées dans GEAMAS dans un contexte de plus grande envergure. Dans cette optique, une collaboration de recherche est actuellement en cours entre l'IREMIA et le CSIRO à Sydney, que je rejoins pour 6 mois en 1998. L'objectif est de proposer les spécifications d'un système pour entraîner les contrôleurs aériens des grands aéroports australiens à des situations de risque. Il s'agira de proposer des canevas de situations complexes, qui seront ensuite présentés au personnel à former comme des situations de conflits à gérer, et dont la résolution requiert efficacité et rapidité d'action.
- Je souhaitais depuis longtemps approfondir la notion d'environnement, c'est-à-dire la modélisation de l'ensemble des agents du système et des objets avec lesquels ils évoluent. L'environnement est une notion prévue dans GEAMAS V2, mais qui a toujours été occultée dans nos expérimentations, du fait des domaines abordés ne le nécessitant pas. Pour cet axe, nous avons mis en place une collaboration avec le laboratoire de Géologie de l'Université de La Réunion. Cette collaboration a pour objectif l'application de GEAMAS à la construction d'un environnement de simulation de l'écoulement de fluides (écoulement de laves sur les pentes du volcan). Rejoignant alors l'idée développée dans l'équipe de J.P. Treuil [Treuil et al 97], nous proposons d'étudier l'interface entre GEAMAS et un SIG décrivant la cartographie du milieu naturel. Il s'agit alors de représenter, sous une forme agent, les données de l'environnement, afin qu'elles puissent être exploitées par les micro-agents, dont le comportement est modifié par les incidences du milieu. Se posent alors le problème des interactions entre les agents et leur environnement [Ferber et Müller 96]. Ce contexte est prometteur pour le développement futur d'une gamme plus étendue d'applications avec GEAMAS sur l'île de la Réunion, et intéresse de nombreux autres laboratoires de notre Université.
- Dans un autre registre, je suis toujours intéressé par le Télé-enseignement, que nous avons initié R. Courdier et moi-même dans le cadre de la Maîtrise d'Informatique en 1996/1997. Une collaboration entre le LICEF à Montréal et l'IREMIA a été récemment finalisée, dont

l'objectif est de développer des approches nouvelles dans l'enseignement à distance, domaine également prometteur en espace insulaire.

- Enfin, dans un contexte temps-réel, j'aimerais expérimenter et valider la priorité des messages asynchrones introduite sous la forme d'intensité de messages dans GEAMAS V2.

Résumé des Travaux

Ce document de synthèse résume des travaux centrés autour de la modélisation de systèmes complexes par agents. Un modèle d'agent, basé sur la définition de connaissances, comportements et mécanismes d'évolution dynamique est proposé. Les agents appartiennent à une société, également caractérisée par des connaissances, contraintes globales et mécanismes d'évolution dynamique.

Le modèle d'agent est inscrit dans une organisation, GEAMAS, décrivant une abstraction du monde réel suivant trois types d'agents. Cette organisation permet de mieux représenter la complexité des systèmes étudiés et d'explorer le lien entre l'expression de la complexité d'un système et l'émergence de solutions. L'organisation est caractérisée par sa capacité récursive, permettant d'unifier le modèle dans les différents types d'agents. Des mécanismes de base ont été isolés, comme la Décomposition et la Recomposition, facilitant l'introduction de mécanismes d'auto-adaptation et auto-organisation, et assurant à GEAMAS un mode de calcul puissant.

Pour implanter l'ensemble des mécanismes de GEAMAS, l'environnement de développement a, dans un premier temps, été réalisé à l'aide de ReActalk, une couche d'acteurs réflexifs développée au dessus de Smalltalk-80. GEAMAS y a tout d'abord été intégrée comme une couche supplémentaire, décrivant une plate-forme d'expérimentation par agents. GEAMAS a été complètement ré-écrite en Java au cours de l'année 1997, afin de disposer d'une base propre pour y intégrer de nouvelles fonctionnalités issues des travaux de jeunes chercheurs futurs.

Les travaux s'appuient sur des validations expérimentales de GEAMAS, à la fois du modèle et de l'architecture proposés. Des applications complètes ont été réalisées ; elles ont concerné, pour la plupart, les environnements d'apprentissage avec ordinateur et la simulation de phénomènes naturels. L'application aux environnements d'apprentissage avec ordinateur (TREMMA) décrit la modélisation des démarches de résolution de problèmes d'un utilisateur apprenant. Le modèle d'agent a été appliqué, et des connaissances typées (Agents S, D ou R) ainsi que des comportements spécifiques ("expertisation" pour la société, "recouvrement distribué", "propagation de la cohérence" pour l'agent) ont été implantés dans le cadre de la thèse de S. Leman soutenue en 1996. Les applications de simulation de phénomènes naturels ont été réalisées dans deux domaines différents : la Volcanologie (GEOMAS) et la Sismicité (SÉISMES). Ces domaines d'application valident plus particulièrement les mécanismes d'auto-organisation et auto-adaptation de GEAMAS.

Du côté des agents, les travaux ont porté sur les caractéristiques fondamentales des agents (autonomie, indépendance, communication, interaction) et leur implantation au sein de modules différents. Quant à l'étude de l'évolution d'un agent, elle a conduit à définir des principes de base liés à :

- L'évolution dynamique des connaissances tout d'abord, avec modification interne des connaissances ("recouvrement distribué", mise à jour de vecteurs d'états), mais aussi externe, par propagation de valeurs à des agents modélisant la même connaissance (dans TREMMA notamment). Cette propagation des valeurs de croyance, motivée par la préservation de la cohérence dans le système, aboutit à leur stabilité par convergence vers un seuil.
- L'évolution de la structure des agents, ou auto-organisation. Cette étude a été menée dans TREMMA avec la création des R-agents, mais surtout dans l'application SÉISMES, où des structures s'organisent par l'interaction d'agents cellules jusqu'à refléter un état stable.
- L'adaptation comportementale de l'agent. Cette adaptation, menée dans GEOMAS, est effectuée à partir de l'étude des propres connaissances de l'agent, ou à partir des modifications apportées dans la structure d'une société d'agents, observées par le mécanisme de Recomposition.

ANNEXE 1
HISTORIQUE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

1. Préambule

Du premier prototype développé en 1987 dans le cadre de mon DEA en Prolog II pour les besoins d'un système d'enseignement assisté, à EDDI [Marcenac 90], 4 ans de recherche dans le domaine de la représentation de connaissances pour des environnements d'apprentissage par ordinateur se sont écoulés. Il ne sera pas question de ces recherches dans cette annexe, qui est uniquement consacrée aux recherches postérieures à ce travail de doctorat. Néanmoins, les motivations initiales du projet, centrées autour de EDDI, en constituent la base de tout son déroulement.

Nos recherches ont suivi une méthodologie de projet en spirales récursives, suivant le cycle <Objectifs, Expériences, Abstraction, Application> présentée dans [Courdier et Marcenac 97a]. Le projet se découpe naturellement de façon chronologique en quatre étapes qui ont enrichi, au fil des expérimentations, le modèle et l'organisation actuels :

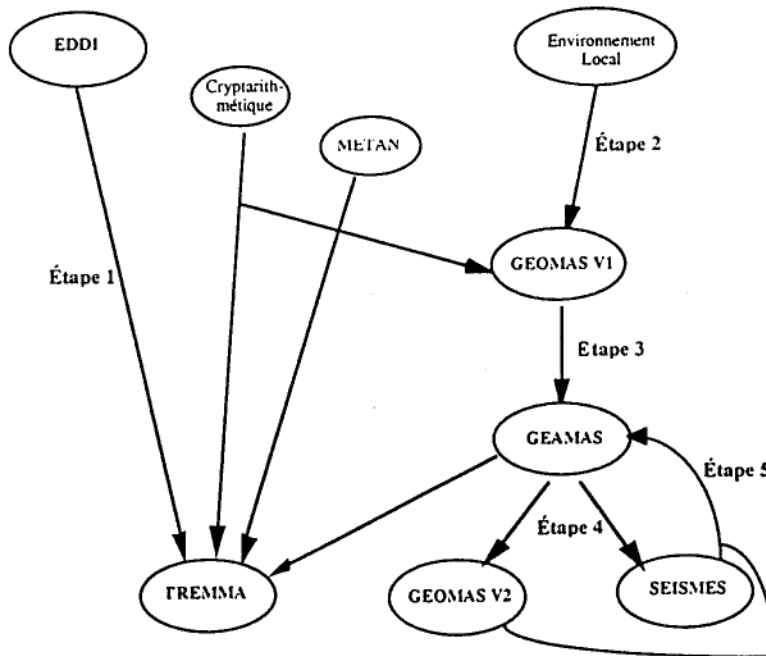


Figure 1 : Vue chronologique des travaux

2. Étape 1 : de EDDI à TREMMA

2.1 Le système EDDI

Mes travaux de doctorat [Marcenac 90] étaient pleinement intégrés dans le projet de recherche DEMO, dirigé par Danièle Héryn à l'Université de Nice-Sophia Antipolis.

L'originalité principale du projet DEMO était centrée autour de la définition d'un modèle de représentation des connaissances par objets [Marcenac et Héryn 88c], suffisamment riche pour permettre la mise en œuvre d'applications cognitives par les systèmes résultants (c'est-à-dire construits sur le modèle) [Marcenac et Héryn 88a]. EDDI décrit une extension du modèle de DEMO, sur lequel des Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur (EIAO) peuvent être définis [Marcenac 92c], [Marcenac et Héryn 91]. Une différence est introduite ici entre *application* et *domaine d'application*. Le domaine d'application abordé ici est celui du transfert d'expertise machine-utilisateur, alors que l'application constitue le système résultant, c'est-à-dire construit pour une expertise.

Le cœur du modèle EDDI décrit donc des composants génériques, c'est-à-dire indépendantes de l'expertise, et représentant des stratégies de transfert de l'expertise de la machine vers différents utilisateurs qualifiés *d'apprenants*. Le système repose sur le modèle de représentation objet de DEMO [Marcenac et Héryn 88d] et [Marcenac et Héryn 88e].

EDDI se veut donc être une architecture informatique, décrivant un modèle de représentation de connaissances nécessaires au transfert d'expertise basé sur une approche objet [Marcenac et Héryn 88b]. Ce modèle puise sa source dans le Génie Logiciel par :

- la description de trois niveaux de représentation (un niveau méta, un niveau expertise et un niveau faits) et
- le souci de classification des composants nécessaires au transfert d'expertise, en particulier la classification des stratégies tutorielles (types d'interaction, stratégies tutorielles de décision, stratégies tutorielles d'application [Marcenac et Héryn 90]) et la classification des connaissances de l'apprenant (connaissances statiques-conceptuelles, dynamiques-procédurales et de savoir-faire [Marcenac 92b]).

Le modèle de représentation des composants tutoriels de EDDI a été implanté à l'aide du langage LOOPS, dans lequel j'ai utilisé les facilités de multi-héritage et surtout de méta-classes propres aux langages à objet hérités du XEROX-PARC. Le prototype EDDI ainsi décrit, a servi à implanter un système de transfert d'une expertise médicale sur la Tuberculose, travail que j'ai mené fin 1989 en collaboration avec l'Hôpital Pasteur à Nice et une équipe de médecins spécialistes. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans [Marcenac 92a].

Sans toutefois que soit prouvée la validité du modèle tout entier sur des expertises d'un autre type que le diagnostic, des expériences similaires, notamment celles du projet METAN validant la classification des stratégies tutorielles et des connaissances [Wybo et al. 94], me confortent alors dans l'idée qu'une approche générique est féconde dans toute démarche de modélisation.

Les Limites du Système EDDI

Dans EDDI, l'élément clé est le modèle de l'apprenant, car c'est lui qui permet au système entier, en s'appuyant principalement sur la connaissance qu'il a de l'apprenant et des hypothèses qu'il peut faire sur ses plans, de le faire progresser [Marcenac et Héryn 88f]. Or, la représentation que le système a de l'apprenant est construite, au fur et à mesure des sessions, par recouvrement partiel [Carr et Goldstein 77]. Cette technique bien connue offre l'avantage d'être générale et de ne pas nécessiter d'autres connaissances, à l'opposé de l'approche par catalogues d'erreurs par exemple [Brown et Burton 78], où il est nécessaire de recenser au préalable les erreurs les plus classiques de l'apprenant sur le domaine considéré.

Cependant, l'approche par recouvrement suppose que l'apprenant suive l'expert dans sa

résolution, en lui étant fidèle. Dès que l'apprenant ne suit plus l'expert, il s'écarte alors de la démarche de résolution du système, et il devient alors très difficile d'en déduire des informations sur le bien-fondé de son savoir-faire. Pourtant, l'on comprend bien qu'un expert humain ne suit pas toujours un raisonnement cohérent du début à la fin de la résolution d'un problème, tant son expérience peut l'aider à résoudre des problèmes mieux et plus vite, en sautant les étapes de résolution qu'il va juger les plus triviales.

EDDI ne peut fournir de bons résultats dans ce cas car, d'une part il ne possède pas de solution globale du problème et ne peut donc pas explorer plus loin la comparaison de la démarche de résolution de l'apprenant avec celui d'un expert, et d'autre part, il ne dispose pas de points de vues différents sur la façon dont se résout le problème, limitant ainsi la richesse du système.

2.2 TREMMA

La modélisation de la reconnaissance de processus de résolution de problèmes qu'un apprenant peut mettre en œuvre se poursuivra, dès le début de l'année 1993, par un travail de doctorat. Pour satisfaire les contraintes du domaine d'application (modélisation de trois types de connaissances - statique, dynamique et savoir-faire -) ainsi que les exigences de coexistence de points de vue multiples, je me suis intéressé à une approche distribuée pour modéliser l'apprenant.

J'ai alors mené en 1992 une première étude dans le but de comparer trois environnements de développement pouvant offrir des atouts pour l'implémentation d'aspects distribués. Ainsi Plasma II (d'après les travaux de P. Sallé à Toulouse), Actalk (d'après les travaux de J.P. Briot à Paris VI) et Lacte (d'après les travaux de J.P. Regourd à Nice) ont été comparés. Une première expérimentation concernant la résolution de problèmes de Cryptarithmétique a alors été menée et implantée avec Actalk [Leman et Marcenac 93]. Ces travaux ont constitué la première année de la thèse de doctorat de S. Leman.

Suite à la venue de S. Giroux en études post-doctorales, avec qui, à travers des échanges très riches, j'ai pu développé une collaboration féconde, ReActalk [Giroux 93] fut choisi comme environnement d'expérimentation du projet SMA. ReActalk, construit comme une couche au dessus de Smalltalk-80, fut apprécié pour ses qualités de plate-forme évolutive et disposant de toutes les fonctionnalités de Smalltalk-80, ce qui a permis de réaliser par la suite un prototypage rapide.

Le cœur de TREMMA (acronyme pour TRansfert d'Expertise avec un Modèle Multi-Agents), basé sur une approche *multi-experts distribuée*, a ensuite été défini dans les deux dernières années de la thèse de S. Leman. Une telle approche nécessite, d'une part que plusieurs solutions du même problème puissent y être représentées, et d'autre part que chacune des solutions soit représentée de façon distribuée par des composants (agents), possédant chacun une partie de l'expertise, une partie du modèle de l'apprenant et une partie des stratégies tutorielles du système.

Le travail a abouti à un modèle de représentation des connaissances basé sur les agents, s'appuyant sur les graphes (appelés *graphes de raisonnements* en raison de leur contexte d'utilisation), où chaque nœud constitue un agent et chaque arc ses relations d'accointances. Le modèle obtenu a ensuite été instancié sur le domaine des environnements d'apprentissage par ordinateur. Des connaissances spécifiques à ce domaine d'application ont donc été définies pour en assurer sa validation :

- connaissances d'un agent, grâce à des types d'agents et des valeurs de croyance,
- comportement d'un agent, conduisant à l'évolution des valeurs de croyance de manière interne à l'agent (algorithme de "recouvrement distribué"),
- comportement d'un agent, conduisant à la préservation de la cohérence dans le système, grâce à l'évolution des valeurs de croyance de manière externe à l'agent ; la cohérence est

alors assurée par propagation dynamique des valeurs de croyance entre les agents concernés, et l'étude de la stabilité par convergence vers un seuil,

- évolution dynamique de la structure des agents dans la société, par création de nouveaux agents (algorithme "d'expertisation"),
- et enfin, comportement spécifique à la société d'agents pour le recueil des actions de l'apprenant, par "espionnage", ce dernier point ayant été réalisé en collaboration avec S. Giroux, F. Pachet et G. Paquette, d'après les travaux qu'ils menaient sur EpiTalk [Pachet et al. 94].

TREMMA a donné lieu à une thèse de doctorat soutenue en juillet 1996 [Leman 96], à une publication dans une revue nationale [Leman et al. 96a], des publications dans des conférences internationales [Marcenac et al. 94], [Leman et al. 95a], [Leman et al. 95b], [Leman et al. 96b] et dans des conférences nationales [Leman et al. 94a], [Leman et al. 96c], [Marcenac et al. 96c].

3. Étape 2 : impact de l'environnement local - GEOMAS V1

Un autre élément moteur du projet SMA fut l'environnement scientifique local, et en particulier l'Observatoire Volcanologique de la Réunion. Dans cet environnement, se pose la problématique de la prévision des éruptions du volcan du Piton de la Fournaise, le volcan actif de la Réunion, qui se caractérise par une activité répétée. Ses éruptions ne constituant que peu de dangers pour l'homme, ce type de volcan fournit un terrain d'expérimentation riche pour la compréhension des mécanismes qui régissent de tels phénomènes naturels par simulation.

Jean-Robert Grasso, alors Directeur de l'Observatoire, et avec qui nous avons développé par la suite une collaboration dans le cadre de la mise en œuvre de simulations de phénomènes naturels, avait une vision très "anticonformiste" du fonctionnement d'un volcan, considérant que la compréhension des mécanismes qui régissent les éruptions ne pouvait se faire qu'en considérant l'état critique de celui-ci. Cet état critique implique alors qu'un événement minime peut déclencher une catastrophe. Cette vision, faisant ainsi défaut à la mécanique classique, est basée sur des idées issues des travaux de D. Sornette à Nice [Sornette et al. 1993], cité, pour la petite histoire, comme prétendant au prix Nobel¹.

Le lien avec TREMMA s'explique de façon naturelle. Après des études plus avancées du monde réel (en relation avec des géologues de l'Université) et l'étude de faisabilité qu'avait menée Sylvain Giroux pendant son travail post-doctoral, deux caractéristiques semblaient se dégager : d'une part, certains composants pouvaient avoir des comportements autonomes (notamment des "lentilles de magma", qui peuvent conduire à des éruptions isolées), et d'autre part, le volcan imposait à sa structure une activité constante interne, pas nécessairement visible de l'extérieur.

J'ai été intéressé de vérifier l'hypothèse de J.R. Grasso en utilisant comme dans TREMMA une approche distribuée ; l'expérimentation sur les problèmes de Cryptarithmétique m'avait déjà convaincu de son intérêt dans des univers pour lesquels il n'existait pas de démarche de résolution, et où l'étude des interactions entre les composants était source de résolution. Le modèle de TREMMA, qui me semblait bien adapté à ce type de modélisation, fut enrichi, et le principe d'autonomie des agents ainsi que leurs capacités d'interactions y furent étudiés en détail.

L'application résultante fut dénommée GEOMAS V1 (acronyme pour GEOphysics and MultiAgent Systems), en raison de sa pluridisciplinarité. Du point de vue géophysique, l'objectif initial était de proposer une modélisation informatique pour simuler le fonctionnement de l'édifice volcanique, et observer puis comparer les résultats avec les données réelles répertoriées (l'isolement de paramètres et processus mécaniques jouant un rôle dans une

¹ Information néanmoins non vérifiée (bruit de couloir ...)

éruption constituant également l'un des objectifs en arrière pensée).

Comme dans TREMMA, le modèle a été instancié sur le domaine d'application (la simulation de phénomènes naturels dans le cas présent) et des comportements spécifiques ont été définis au niveau de chaque agent, comme par exemple l'expression des comportements soumis à des sollicitations extérieures par discrétisation des événements en entrée, et ce pour laisser le temps à chaque agent de traiter les informations et coordonner ainsi les actions. Au niveau de la société d'agents, l'organisation fut enrichie du degré de communication - appelé *connectivité*- variable, permettant au système de fixer un nombre de relations avec ses accointances en rapport avec une certaine topologie dans le graphe.

Retombées de l'expérimentation

Les résultats de ce premier prototype ont validé, d'une part l'hypothèse géophysique avancée, et d'autre part, du point de vue informatique, le modèle d'agent. Plus de 200 simulations, comportant des paramètres différents, ont été menées sur GEOMAS V1. Chaque simulation a été traitée sur SUN Solaris 2, pendant un intervalle de temps variant de 8 à 10 heures, avec environ 7500 agents en parallèle. Les données réelles initialement observées ont été retrouvées et partiellement expliquées, ce qui n'avait encore jamais été réalisé dans le contexte de la Géophysique. Les résultats complets de GEOMAS V1 ont été publiés dans [Lahaie et al. 96].

Dans ReActalk, l'efficacité a été travaillée, et un ramasse-miettes performant a été implanté, ainsi qu'une solution pour optimiser la circulation des messages entre les agents. Le gain de performance en temps obtenu a été de l'ordre de 30 à 40% par rapport aux premiers essais effectués dans l'environnement initial de ReActalk. Par ailleurs, une interface graphique sophistiquée, implémentée à l'aide des classes graphiques de Smalltalk, est venue compléter ce premier prototype. Elle comprend des fenêtres de saisie de paramètres de la simulation, un traceur de courbes pour les résultats, ainsi que la projection graphique de l'évolution des éruptions au cours de la simulation "en temps réel".

La méthodologie, avec laquelle la conception du système a été réalisée, fut l'un des grands apports de cette expérimentation. Cette méthodologie, initialement empruntée aux méthodes d'analyse et de conception objet [Rumbaugh et al. 91] et [Coad et Yourdon 91], a permis, en adaptant certains de leurs principes, de construire un système distribué adéquat.

Ce travail a donné lieu à un stage de DEA [Aimelet 95], un stage de DESS [Grosser 95], deux stages d'ingénieur [Lahaie 95] [Rougé 95], et un stage de Maîtrise d'Informatique [Calderoni et Valcares 95a], ainsi qu'à la publication de deux articles dans des conférences internationales, l'un sur l'approche conceptuelle [Marcenac et al. 96b], et l'autre sur l'architecture du système [Giroux et al. 96b]. Un manuel d'utilisation du prototype a été rédigé pour en faciliter l'approche [Calderoni 95]. Il a également permis un début de collaboration avec J. Quinqueton du LIRMM.

4. Étape 3 : vers un modèle plus générique - GEAMAS

La dynamique créée autour de la précédente expérimentation m'a alors encouragé à poursuivre les réflexions selon deux axes principaux :

- Aspects génériques : je me suis intéressé à vérifier que les concepts mis en œuvre dans GEOMAS V1 et TREMMA pouvaient être appliqués dans des univers similaires liés aux systèmes naturels. J'ai donc étudié les aspects génériques du modèle utilisé dans les expérimentations précédentes.
- Introduction d'une granularité plus fine : L'expérimentation GEOMAS V1 s'est surtout focalisée sur la modélisation d'agents représentant des lentilles de magma, laissant aux roches environnantes un comportement très simpliste de type réactif. Or, il est clair que la

roche, après avoir subi des déformations, ne peut plus se comporter de la même façon, et par ailleurs, son comportement, complexe, ne peut plus être assimilé à des stimuli/réactions. Il paraît clair également qu'il est difficile de ne pas tenir compte de l'évolution dynamique de la structure de l'édifice volcanique sous l'action des contraintes subies et des déformations engendrées.

L'impossibilité à prendre en compte les effets des catastrophes antérieures, et donc à produire un comportement réaliste et cohérent, m'a alors incité à étudier comment modéliser la complexité structurelle et comportementale d'un agent. GEAMAS (acronyme pour Generic Architecture for Modelling with Agents and Simulating) est donc né de ces orientations que j'ai alors données au projet SMA. Pour satisfaire les objectifs de modélisation de la complexité structurelle et comportementale, l'organisation d'agents a été enrichie par des agents intermédiaires (d'où le terme *architecture* que l'on retrouve dans l'acronyme GEAMAS). Par ailleurs, le modèle d'agents a lui aussi été enrichi pour prendre en compte la sémantique des interactions entre les différents agents de l'organisation et leurs capacités d'évolution et d'adaptation. De plus, pour faciliter la conception d'applications dans un tel cadre, la récursivité du modèle a été introduite.

GEAMAS fut conçue au cours de l'année 1994/1995, et son implantation achevée à la fin du mois de Décembre 1995. Au cours de cette implantation, dans le but d'accroître sensiblement son appréhension, un remaniement de ReActalk a été opéré, et des couches logicielles ont alors été isolées et classifiées séparément du reste de l'environnement. Durant cette période, j'ai encadré un stage de chercheur associé sur ce thème. Deux articles résument les principes et l'organisation de GEAMAS [Marcenac et Giroux 98] et [Marcenac 97b].

5. Étape 4 : validations de GEAMAS - GEOMAS V2 et SÉISMES

5.1 GEOMAS V2

Dès le début de l'année 1996, j'ai voulu valider les principes généraux définis dans GEAMAS. L'expérience que j'avais acquise en Géophysique précédemment m'a naturellement conduit à poursuivre une expérimentation dans ce domaine d'application.

L'hypothèse avancée était que les contraintes imposées par la complexité n'influenceraient pas le résultat global des simulations. Après une étude plus détaillée des systèmes critiques en collaboration avec P. Bachèlery (Maître de Conférences à l'Université de la Réunion), l'expérimentation GEOMAS V2, faisant suite à celle de GEOMAS V1, fut donc réalisée.

Trop peu de simulations ont été menées avec GEOMAS V2 pour pouvoir exploiter des résultats et vérifier cette hypothèse. Néanmoins, d'un point de vue informatique, cette expérimentation a validé les principes d'auto-adaptation énoncés dans GEAMAS, ainsi que les trois types d'agents de son organisation.

5.2 SÉISMES

Pour compléter la validation de GEAMAS, j'ai également voulu valider les principes d'auto-organisation que j'avais introduits. Une nouvelle expérimentation, proposée par J.R. Grasso, a alors été menée sur l'étude de zones sismiques à risque, au cours de l'année 1996. A la différence de la volcanologie, la sismicité est beaucoup mieux comprise, et la nécessité d'auto-adaptation des agents y est donc moins prononcée. Par contre, sous certaines contraintes connues, des failles se créent dans certaines zones géologiques, dont la forme et la composition ne peuvent être connues au préalable. Seuls les comportements de ces failles sont connues, mais une fois le phénomène passé. Cette expérimentation était donc idéale pour valider les principes d'auto-organisation.

Cette expertise a permis de développer la création dynamique de structures, dans des univers

perturbés, où seules les interactions entre composants de granularité inférieure produisent des phénomènes émergents. D'un point de vue géophysique, l'application produit en sortie des courbes, permettant de mesurer le degré de risque de la zone simulée.

Cette dernière expérimentation a fait l'objet d'un stage de DEA [Calderoni 96] ainsi que d'un stage d'ingénieur [Bergeron 96]. Les mécanismes principaux mis en œuvre dans GEOMAS V2 ont été publiés dans [Giroux et al. 96a] et [Marcenac et al. 96a], et ceux mis en œuvre dans l'application SÉISMES sont décrits dans [Calderoni et Marcenac 97a] et [Marcenac 98b].

6. Étape 5 : GEAMAS en JAVA

Au cours de l'année 1997, la plate-forme GEAMAS a été ré-écrite entièrement en Java. Tout d'abord étudié par curiosité, et puis, il faut bien le dire, par effet de mode, Java nous est apparu sous bien des aspects comme un langage très intéressant pour implanter nos travaux. Les raisons essentielles qui ont poussé ce choix sont les suivantes :

- D'abord, GEAMAS, dans sa version ReActalk, était devenue un véritable environnement, dont l'empilement des couches successives qui étaient envisagées dans ReActalk nuisait à sa clarté et son efficacité. Dans le but de pouvoir intégrer plus facilement les travaux des jeunes chercheurs futurs, il devenait urgent de construire sa propre base, en implantant l'ensemble des concepts fidèlement la conception.
- Ensuite, l'environnement JDK 1.1 offre des possibilités intéressantes de développement. Citons entre autres les aspects graphiques, interfaces, ... Le langage lui-même est un langage objet propre, reprenant toutes les caractéristiques essentielles des langages objets. Java nous est donc apparu comme une base saine pour construire des environnements de plus haut niveau.
- Enfin, la notion d'applet est, dans notre contexte éloigné, un avantage certain : mise à disposition rapide des applications développées à nos partenaires.

Ainsi, la plus grosse partie de mes travaux de recherche en 1997 a été orientée vers la prise en main de Java (j'ai créé à l'IREMIA un groupe de travail à cette occasion), puis l'analyse et la conception de la nouvelle plate-forme, qui sont reportées dans [Marcenac 98a].

J'ai ensuite proposé, puis encadré, avec l'aide de mon collègue R. Courdier, 5 stagiaires chargés de son implémentation. Ainsi, le noyau de GEAMAS a été l'objet d'un stage de DESS [Soulié 97], les éditeurs d'application et de simulation l'objet de 2 stages de Maîtrise d'Informatique [Poquet et Vidot 97], [Soupayapoulé et Vally 97].

ANNEXE 2 :
LISTE DES PUBLICATIONS
PERSONNELLES

Note : les publications sont classées en revues, conférences internationales et nationales, journées françaises ou workshops, publications internes et encadrements de travaux. Les publications jointes comme travaux à ce dossier sont en gras.

1- Publications dans des revues et chapitres de livre

1.1 Articles acceptés dans une revue internationale avec comité de lecture

1998

[Marcenac et Giroux 98] : P. Marcenac, S. Giroux, "GEAMAS: A Generic Architecture for Agent-Oriented Simulations of Complex Processes", *International Journal of Applied Intelligence*, 42 Pages, à paraître en 1998.

[Marcenac 98a] : P. Marcenac, "A computer-simulation tool for evolutionary systems", *International Journal of Knowledge-based Intelligent Engineering Systems*, à paraître en 1998.

1997

[Marcenac 97a] : P. Marcenac, "The multiAgent approach : Complex simulations that spew realistic behaviors require independent acting variables", *IEEE-Potentials*, February/March 1997, Pages 19-23.

1996

[Marcenac 96a] : P. Marcenac, "Emergence of Behaviors in Natural Phenomena Agent-Simulation", *Complexity International Review*, Vol. 3, version revue et étendue de [Marcenac 96b], <http://www.csu.edu.au/ci/vol3/cs964/cs964.html>, 1996.

1.2 Articles acceptés dans une revue nationale avec comité de lecture

1997

[Marcenac 97b] : P. Marcenac, "Modélisation de systèmes complexes par agents", *TSI*, 24 Pages, à paraître en Octobre 1997.

1996

[Lahaie et al. 96] : F. Lahaie, J.R. Grasso, P. Marcenac, S. Giroux, "Modélisation de la dynamique auto-organisée des éruptions volcaniques : application au comportement du Piton de la Fournaise, Réunion", *comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris (CRAS), Géophysique interne, France, Tome 323, Série II.a, Pages 569-574, 1996.*

[Leman et al. 96] : S. Leman, P. Marcenac, S. Giroux, "Un modèle multi-agents de l'apprenant", *Revue AFCET STE, Sciences et Techniques Educatives, Hermès, Vol. 3, N°4, 1996, Pages 465-483.*

1992

[Marcenac 92a] : P. Marcenac, "EDDI : Un prototype de système auteur pour des "didacticiels

intelligents" décrivant un niveau générique des stratégies tutorielles", Revue Génie Éducatif de l'AFCEP, N° 4 et 5, Pages 38-47, Septembre et Décembre 1992.

1.3 Article soumis pour chapitre de livre

[Marcenac 97c] : P. Marcenac, "A report on the design and implementation of a Java agent-oriented development environment", Object-Oriented Applications Frameworks, Wiley eds, 1997.

1.4 Articles soumis à une revue internationale avec comité de lecture

[Courdier et Marcenac 97a] : R. Courdier, P. Marcenac, "Steps towards the realization of computer-simulation tools: the recursive spiral approach", soumis à Software Process, Wiley eds, 1997.

[Marcenac et al. 97] : P. Marcenac, R. Courdier, S. Calderoni, JC Soulié, "A model of asynchronous message passing in Java", soumis à ACM Computing Surveys, 1997.

1.5 Article soumis à une revue nationale avec comité de lecture

[Courdier et al. 97] : R. Courdier, P. Marcenac, S. Giroux, "Application d'une méthodologie en spirale au développement d'une plate-forme multi-agents en Smalltalk", soumis à la revue l'objet, Numéro spécial - Smalltalk en France : état de l'art et de la pratique, Décembre 1997.

2- Communications dans des conférences

2.1 Articles publiés dans une conférence internationale avec comité de lecture

1998

[Marcenac 98b] : P. Marcenac, "Modeling MultiAgent Systems as Self-Organized Critical Systems", 31st Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS-31, IEEE Computer Society Press, à paraître en Janvier 1998.

1997

[Calderoni et Marcenac 97a] : S. Calderoni, P. Marcenac, "Emergence of Earthquakes by MultiAgent Simulation", Proceedings of ESM'97, 11th European Simulation Conference, Istanbul, Turquie, 1-4 Juin 1997, SCS Int. Publishers, Pages 665-669.

1996

[Giroux et al. 96a] : S. Giroux, P. Marcenac, J. Quinqueton, J.R. Grasso, "Modelling and Simulating Self-Organized Critical Systems", ESM'96, 10th Annual European Simulation Multiconference'96, Budapest, Hongrie, Pages 1072-1076, 2-6 Juin 1996.

[Giroux et al. 96b] : S. Giroux, P. Marcenac, S. Calderoni, D. Grosser, J.R. Grasso, "A report of a Case Study with Agents in Simulation", PAAM'96, International Conference on Practical Applications of Intelligent Agents and MultiAgent Technology, Londres, UK, Pages 295-310, 22-24 Avril 1996.

[Leman et al. 96b] : S. Leman, P. Marcenac, S. Giroux, "A Generic Architecture for ITS based on a MultiAgent Model", International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS-96, Montréal, Canada, Springer-Verlag, Vol. 1060, C. Frasson, G. Gauthier et A. Lesgold eds, 10-12 juin 1996, Pages 75-83, Juin 1996.

[Marcenac 96b] : P. Marcenac, "Emergence of Behaviors in Natural Phenomena Agent-Simulation", Complex Systems 96, From local interactions to global phenomena, IOS-Press, R. Stocker, H. Jelinek, B. Durnota & T. Bossomaier eds, Albany, Australie, Pages 284-289, Juillet 1996.

[Marcenac et al. 96a] : P. Marcenac, S. Giroux, J.R. Grasso, F. Lahaie, "Simulating Emergent Behaviors: An application to Volcanoes", SCSC'96, 1996 Summer Computer Simulation Conference, The Path Through the Forest, organized by the Society for Computer Simulation International, Portland, Oregon, USA, 21-25 Juillet 1996.

[Marcenac et al. 96b] : P. Marcenac, S. Giroux, J.R. Grasso, "Designing and Implementing Complex Systems with Agents", in Software Engineering for Parallel and Distributed Systems, Berlin, Germany, I. Jelly, I. Gorton and P. Croll eds, Chapman & Hall, Pages 27-38, Mars 1996.

1995

[Leman et al. 95a] : S. Leman, S. Giroux, P. Marcenac, "A Multi-Agent Approach to Model Student reasoning Process", AI-ED'95, 7th World Conference on Artificial Intelligence in Education, Washington, DC USA, Pages 258-265, 16-19 Août 1995.

[Leman et al. 95b] : S. Leman, P. Marcenac, S. Giroux, "When the Student Surpasses the Master", CAEE'95, 3rd International Conference on Computer-Aided Engineering Education, Bratislava, Slovakia, Pages 22-28, 13-15 Septembre 1995.

1994

[Marcenac et al. 94] : P. Marcenac, S. Giroux, S. Leman, "A Multi-Agent Approach to Student Modelling", EW-ED'94, East-West Conference on Computer Technologies in Education, Crimea, Ukraine, Vol. 1, Pages 148-153, 19-23 Septembre 1994.

[Wybo et al. 94] : J.L. Wybo, E. Darque-Ceretti, P. Marcenac, P. Crescenzo, "METAN: a learning system for training of engineers to material observation and analysis", CALISCE'94, International Conference on Computer Aided Learning and Instruction in Science and Engineering, Paris, France, Septembre 1994.

1992

[Marcenac 92b] : P. Marcenac, "Mise en oeuvre d'un modèle de l'apprenant générique dans le système EDDI", International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS-92, Montréal, Canada, Springer-Verlag, Vol. 608, Pages 459-466, Juin 1992.

[Marcenac 92c] : P. Marcenac, "An authoring system for ITS which is based on a generic level of tutoring strategies", 4th International Conference on Computers And Learning, ICCAL'92, Wolfville, Canada, Juin 1992.

1990

[Marcenac et Héryn 90] : Pierre Marcenac, Danièle Héryn-Aime, "A structural modelling of tutoring strategies", actes du congrès AFCET COGNITIVA'90, Madrid, Espagne, Vol. 1, Pages 23-29, Novembre 1990.

1988

[Marcenac et Héryn 88a] : Pierre Marcenac, Danièle Héryn-Aime, "A cognitive model including tutoring capacities", First international conference on industrial & engineering applications of Artificial Intelligence & Expert Systems, organized by ACM, Tennessee, USA, Juin 1988.

[Marcenac et Héryn 88b] : Pierre Marcenac, Danièle Héryn-Aime, "Une approche orientée objet pour les tuteurs intelligents", International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS-88, Montréal, Canada, Pages 342-349, Juin 1988.

[Marcenac et Héryn 88c] : Pierre Marcenac, Danièle Héryn-Aime, "Transferring knowledge in an object oriented context", Fifth International Conference on Technology and Education, Edimbourg, Écosse, Vol. 1, Pages 456-460, Mars 1988.

2.2 Article soumis à une conférence internationale avec comité de lecture

[Calderoni et Marcenac 97b] : S. Calderoni, P. Marcenac, « Using Genetic Programming as a

Generic Process of Behavioral Evolving in Agent-Based Simulation », soumis à AGENTS'98, Minneapolis, USA, Mai 98.

2.3 Articles publiés dans une conférence nationale avec comité de lecture

1996

[Leman et al. 96c] : S. Leman, P. Marcenac, S. Giroux, "Reconnaissance et modélisation du Raisonnement d'un Apprenant. Une Approche Multi-Agents", RFIA'96, 10^{ème} congrès de Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle, AFCET-AFIA, Rennes, Vol. 1, Pages 367-376, 16-18 Janvier 1996.

[Marcenac et al. 96c] : P. Marcenac, S. Leman, S. Giroux, "Cooperation and Conflicts Resolution in MultiAgent Systems", 34th ACM SouthEast Conference, Tuskegee, Alabama, USA, K.H. Chang and J.H. Cross eds, Pages 289-291, 17-19 Avril 1996.

1995

[Leman et al. 95c] : S. Leman, S. Giroux, P. Marcenac, "Modélisation du raisonnement d'un Apprenant : Apport de l'Approche Multi-Agents", RPO'95, Représentations par Objets : Objets et XAO, Montpellier, 29-30 Juin 1995.

1994

[Leman et al. 94a] : S. Leman, S. Giroux, P. Marcenac, "A Generic Distributed Method for Cognitive Modelling", AI'94, 7th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence - sowing the seeds for the future, Armidale, Australie, Pages 127-134, Novembre 1994.

1991

[Marcenac et Hérim 91] : Pierre Marcenac, Danièle Hérim-Aime, "Towards authoring facilities for ITS", 8th International Conference on Technology and Education, ICTE'91, Toronto, Canada, Mai 1991.

1988

[Marcenac et Hérim 88d] : Pierre Marcenac, Danièle Hérim-Aime, "Représentation des connaissances par objets et systèmes experts pour l'enseignement", ERGO-IA-88, AFCET, Biarritz, Pages 222-232, Octobre 1988.

[Marcenac et Hérim 88e] : Pierre Marcenac, Danièle Hérim-Aime, "Systèmes experts pour l'enseignement assisté par ordinateur et approche par objets", actes des huitièmes journées internationales "Les systèmes experts et leurs applications", Avignon, Vol. 2, Pages 71-86, Juin 1988.

[Marcenac et Hérim 88f] : Pierre Marcenac, Danièle Hérim-Aime, "Gestion de plans dynamiques dans les tuteurs intelligents", actes du congrès APPLICA-88, Lille, Pages 157-165, Octobre 1988.

2.4 Articles soumis à une conférence nationale avec comité de lecture

[Calderoni et Marcenac 97c] : S. Calderoni, P. Marcenac, « Genetic-Programming for Collective learning in agent-based simulation », soumis à 3rd Australian Workshop on DAI, Perth, Australie, Décembre 1997.

2.5 Articles publiés dans des Journées Françaises ou Actes de PRC

1997

[Calderoni et al. 97] : S. Calderoni, R. Courdier, S. Leman, P. Marcenac, "Construction expérimentale d'un modèle multi-agents", JFIADSM, La Colle-sur-Loup (Alpes-Maritimes), Avril 1997, Pages 109-123.

[M.R. Jean 97] : M.R. Jean, groupe de travail « Collectif » IAD/SMA de l'AFCET-AFIA, (S.

Pesty, E. Batard, C. Brassac, L. Delépine, M.P. Gleizes, P. Glize, O. Labbani, C. Lenay, P. Marcenac, L. Magnin, J.P. Müller, J. Quinqueton, P. Vidal), "Emergence et SMA", JFIADSMA, La Colle-sur-Loup (Alpes-Maritimes), Avril 97, Pages 323-341, disponible à l'url http://www-iiia.unie.ch/IA.GRP/publications/version_ps/jfiadsma972.ps.gz.

1996

[Leman et al. 96d] : S. Leman, S. Giroux, P. Marcenac, "Auto-similarité d'un modèle d'agents. Application à la modélisation d'un utilisateur", journées françaises sur les systèmes multi-agents, JF-IAD-SMA, Sète, Article présenté en Poster, Avril 1996.

[Leman et al. 96e] : S. Leman, P. Marcenac, S. Giroux, "Maintien dynamique de la cohérence d'un modèle de l'apprenant par coopération d'agents cognitifs", Journée thématique du PRC-IA sur les systèmes multi-agents, Toulouse, Pages 93-103, Février 1996.

1993

[Leman et Marcenac 93] : S. Leman, P. Marcenac, "Modélisation sous forme d'Agents et Implantation en Acteurs d'une Expertise Arithmétique Complexe", Actes des journées Systèmes Multi-Agents du PRC-IA, Montpellier, 17 Décembre 1993.

1989

[Marcenac et Hérim 89] : Pierre Marcenac, Danièle Hérim-Aime, "Modélisation orientée objet pour un système d'EIAO", Actes des Journées EIAO du PRC-IA, Cachan, Pages 45-48, Décembre 1989.

2.6 Articles publiés dans une conférence nationale sans comité de lecture

[Marcenac et Hérim 88g] : P. Marcenac, D. Hérim-Aime, "Systèmes experts et enseignement", Assises de la formation et de l'Intelligence Artificielle, Paris, Mai 1988.

2.7 Articles publiés dans un Workshop International

[Marcenac et Calderoni 97] : P. Marcenac, S. Calderoni, « Self-organization in agent-based simulation », Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW'97, Ronneby, Suède, Article présenté en poster, M. Boman, W Van de Velde and S. Hägg eds, Chapmanskolans tryckeri eds, Sweden, Mai 1997, Pages 116-131.

[Giroux et al. 96c] : S. Giroux, S. Leman, P. Marcenac, "Representing Organizational Student Models: A Generic Concurrent Coordination", International workshop on Architectures and methods for Designing Cost-effective and Reusable ITSS, partie de ITS-96, International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Montréal, Canada, 12 pages, Juin 1996.

[Grasso et al. 95] : J.R. Grasso, S. Giroux, P. Marcenac, "A MultiAgent Approach for Volcano Behavior Simulation", Application of Artificial Intelligence Computing in Geophysics, International Union of Geodesy and Geophysics, Boulder, Colorado, USA, Juillet 1995.

[Leman et al. 94b] : S. Leman, P. Marcenac, M. Aubé, A. Senteni, "MultiAgent Models for Cryptarithmic Problem Solving", CWDAI'94, Canadian Workshop on Distributed Artificial Intelligence, Banff, Alberta, Canada, Mai 1994.

3. Publications internes à l'IREMIA

1997

[Courdier et Marcenac 97b] : R. Courdier, P. Marcenac, "Application de la plate-forme GEAMAS à la résolution du problème de factoriel", rapport de recherche, 13 Pages, Juin 1997, ref# RCPM/PT0/9706, IREMIA N° 3153. Egalement disponible sur le Web à l'url <http://www.univ-reunion.fr/~geomas/PT0/facto.html>.

[Courdier et Marcenac 97c] : R. Courdier, P. Marcenac, "Méthodologie de développement du projet MAS2", rapport de recherche, 15 Pages, Avril 1997, ref# RCPM/ATAL/9704, IREMIAN° 3151.

[Marcenac 97d] : P. Marcenac, "Analyse, conception et implémentation de GEAMAS V2.0.", rapport de recherche, 24 Pages, Mai 1997, ref# PM/GEAMAS/9705, IREMIAN° 3150.

1995

[Marcenac 95] : P. Marcenac, "PROJET GEOMAS, Modélisation des Volcans par des agents : Première phase - Problématique et descriptif des recherches, état et analyse du prototype GEOMAS V1", 45 Pages, rapport de recherche, Avril 1995.

1994

[Giroux et Marcenac 94a] : S. Giroux, P. Marcenac, "Extraction d'indices dans des images numériques et modélisation du piton de la Fournaise, applications envisagées dans le cadre du projet SMA", 17 Pages, rapport préliminaire de recherche, Mai 1994.

[Marcenac 94a] : P. Marcenac, "Le projet SMA : Fondements, Bilan et Perspectives", 73 Pages, rapport de recherche, Avril 1994.

[Marcenac 94b] : P. Marcenac, "Quelques propositions pour l'implantation d'une maquette de STI dans le cadre du projet METAN", 16 pages, rapport préliminaire de recherche, Février 1994.

1993

[Marcenac 93] : P. Marcenac, "Projet de base de données scientifique l'Herbier de la Réunion, Phase 1 : définition du cahier des charges, Objectifs, justification de l'approche envisagée et plan de travail", 11 pages, rapport préliminaire de recherche, 11 Octobre 1993.

4. Autres Publications (Thèse)

[Marcenac 90] : P. Marcenac, "EDDI : Contributions aux Environnements de Développement de DIIdacticiels", Thèse de Doctorat en Sciences, Mention Informatique, Université de Nice-Sophia Antipolis, 205 pages, Décembre 1990.

5. Encadrements de travaux

1997

[Poquet et Vidot 97] : J. Poquet, N. Vidot, "Création d'un éditeur d'applications multi-agents", Maîtrise d'Informatique, Université de la Réunion, Juin 1997, 31 pages.

[Soulié 97] : J.C. Soulié, "Conception et implantation d'une plate-forme d'agents en JAVA", Mémoire de DESS, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Septembre 1997, 90 pages.

[Souprayapoulé et Vally 97] : D. Souprayapoulé, J.D. Vally, "Éditeur de simulation pour GEAMAS V2.0", Maîtrise d'Informatique, Université de la Réunion, Juin 1997, 26 pages.

1996

[Bergeron 96] : C. Bergeron, "Un automate cellulaire pour l'interaction fluide, roche et sismicité", mémoire d'ingénieur de l'École et Observatoire de Physique du Globe, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Novembre 1996, 88 pages (co-encadrement avec J.R. Grasso du LGIT).

[Calderoni 96] : S. Calderoni, "Auto-organisation dans une architecture multi-agents - Application à la Modélisation de Systèmes Complexes", DEA d'Informatique, Université de Montpellier II, 60 pages, Juin 1996.

[Celestin et Picard 96] : B. Celestin, P. Picard, "Programmation de RoboWar en Oz", Maîtrise

d'Informatique, 90 pages, Juin 1996 (co-encadrement avec F. Mesnard de l'IREMIA).

[Leman 96] : S. Leman, "TREMMA : Transfert d'Expertise avec un Modèle Multi-Agents - Un modèle Multi-Agents pour la représentation dynamique des connaissances et des raisonnements d'un apprenant", Thèse de Doctorat en Sciences, Mention Informatique, Université de la Réunion, 240 Pages, Juillet 1996.

1995

[Aimelet 95] : M.L Aimelet, "GEOMAS : Les multi-agents et le volcan de la Fournaise", DEA d'Informatique, Université de Montpellier II, 35 pages, Juin 1995.

[Calderoni 95] : S. Calderoni, "GEOMAS Version 1.2, Manuel de l'utilisateur", 42 pages, Septembre 1995.

[Calderoni et Valcares 95a] : S. Calderoni, E. Valcares, "Développement d'un environnement de simulation pour la modélisation d'édifices géophysiques", Maîtrise d'Informatique, 37 pages, Juin 1995.

[Grosser 95] : D. Grosser, "GEOMAS Version 1.2, Rapport de stage", DESS d'Informatique, Génie Logiciel et Applications, Université de Paris VI, 65 pages, Septembre 1995.

[Lahaie 95] : F. Lahaie, "Modélisation de la complexité des processus volcaniques : validation, sur les éruptions du Piton de la Fournaise, Réunion", mémoire d'ingénieur de l'École et Observatoire de Physique du Globe, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 91 pages, Septembre 1995 (co-encadrement avec J.R. Grasso du LGIT).

[Rougé 95] : P. Rougé, "Rapport de stage GEOMAS", École Supérieure de Mécanique de Marseille, 45 pages, Septembre 1995 (co-encadrement avec J.R. Grasso du LGIT).

ANNEXE 3 :
BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE

- [Anderson 83] : J.A. Anderson, "The architecture of cognition", Harvard University Press, 1983.
L'auteur décrit ici les structures cognitives d'individus en phase d'apprentissage. Ces travaux constituent la base de nombreuses modélisations dans le domaine des sciences cognitives.
- [Arlabosse 94] : F. Arlabosse, "ARCHON and its Environment", dans *Distributed Software Agents and Applications*, 6th European Workshop on Modelling Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW'94, Lecture Note in Artificial Intelligence (LNAI), Springer-Verlag, J.W. Perram & J.P. Müller eds, 1994.
Une présentation de la plate-forme ARCHON, à la fois en temps que modèle et organisation.
- [Aubé 93] : M. Aubé, "Différentes 'Pièces de Connaissances' utilisées pour résoudre mentalement des problèmes de cryptarithmétique relatifs à la représentation décimales des fractions", Rapport interne de l'Université de Sherbrooke, Canada, 1993.
Michel Aubé, actuellement doctorant à l'Université de Sherbrooke (Canada), est un ancien enseignant de Mathématiques. Il a été amené à s'intéresser à des problèmes typiques de l'Arithmétique, comme la "Cryptarithmétique", où des lettres à trouver remplacent les digits. Ce travail liste les règles d'un expert permettant de raisonner sur la connaissance pour résoudre de tels problèmes.
- [Baeijs et Demazeau 96] : C. Baeijs, Y. Demazeau, "Les organisations dans les Systèmes Multi-Agents", *Journée thématique du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, Toulouse, France, Pages 35-46, Février 1996.
Un article fort intéressant, centré autour de la notion d'organisation d'agents, et des différentes façons de l'envisager. L'article permet de classifier ainsi sa propre organisation par rapport aux grands schémas proposés.
- [Bak et al. 87] : P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld, "Self-Organized criticality: An explanation of 1/f Noise", dans *Physical review Letter*, 59:4, Pages 381-384, 1987.
L'un des articles de base qui présente les systèmes géophysiques comme des systèmes critiques auto-organisés (SCAO ou SOC en terminologie anglo-saxonne). Une version française est disponible dans [Bak et Chen 91].
- [Bak et Chen 91] : P. Bak, K. Chen, "Les Systèmes Critiques Auto-Organisés", *Revue Pour la Science*, N°161, Pages 52-61, Mars 1991.
Cet article couvre une version française et allégée de [Bak et al. 87].
- [Benhamou et al. 92] : P. Benhamou, B. Biron, J. Rezzouk, "IDEAL : un outil de développement de systèmes multi-agents pour la supervision de systèmes complexes", *Journée thématique du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, Nancy, France, Décembre 1992.
Cet article présente un bon exemple de système d'agents naturellement distribué dans le cadre militaire, où la conception est ici entièrement guidée par les contraintes du monde réel, la structure du système en découlant alors aisément.

[Bonabeau et al. 95] : E. Bonabeau, J.L. Dessalles, A. Grumbach, "Characterizing emergent phenomena (1) and (2): A critical review", *Revue Internationale de Systémique*, Vol. 9(3), Pages 327-346 et Pages 347-371, 1995.

Un article de synthèse dans le domaine de l'émergence que j'ai beaucoup apprécié par sa clarté et le nombre de références intéressantes qu'il expose et propose au lecteur. L'émergence est ici abordée avec une vision systémique.

[Bonabeau et Bourguine 94] : E. Bonabeau, P. Bourguine, "Artificial Life as it could be", *World Futures*, Vol. 40, Pages 227-249, 1994.

Cet article présente les bases de la vie artificielle et les domaines d'application sous-jacents. En particulier, on retiendra la présentation des systèmes critiques auto-organisés sous l'angle épistémologique.

[Bouron 92] : T. Bouron, "Structures de communications et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents", Thèse de l'Université de Paris VI, 17 Novembre 1992.

Thierry Bouron s'intéresse dans son travail à l'application des actes de langages comme protocole de communication dans les systèmes multi-agents.

[Brassac et Pesty 96] : C. Brassac, S. Pesty, "La « Pelouse Fourmilière » - De la Coaction à la Coopération", 4èmes Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, JFIADSMA'96, Sète, France, Hermès eds, Pages 251-263, 1996.

Cet article tente de différencier coaction dans les systèmes réactifs et coopération dans les systèmes cognitifs. Au delà du problème posé et des directions de recherche proposées, l'article présente un exemple fort significatif de comportement collectif, la « pelouse fourmilière ». Les auteurs entrevoient ici l'importance du contexte conceptuel lors de la création du Système Multi-Agents, c'est-à-dire ce que j'appelle le rôle des agents. Cette vision de la conception préconise de porter ses efforts sur ce que doit apporter l'agent pour le système plutôt que de se focaliser sur la différenciation cognitif-réactif.

[Bratman et al. 88] : M.E. Bratman, D.J. Israël, M.E. Pollack, "Plan and Resource-bounded practical reasoning", *Computational Intelligence*, Vol. 4, Pages 349-355, 1988.

Cet article présente le modèle d'agent de IRMA, basé sur une approche de type BDI (Belief-Desire-Intention), définie par Rao et Georgeff, et dont une bonne référence peut être trouvée dans les actes de ICMAS'95.

[Briot 89] : J.P. Briot, "Actalk: a testbed for classifying and designing actor languages in the smalltalk-80 environment", ECCOP'89, European Conference on Object-Oriented Programming, Cambridge, England, 1989.

Cet article présente les travaux de J.P. Briot sur le langage Actalk, couche acteur au dessus de Smalltalk-80 pour explorer les modèles d'acteurs tel le modèle de G. Agha.

[Brodie et Ceri 92] : M.L. Brodie, S. Ceri, "On intelligent and cooperative information systems : a workshop summary", *International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, Vol. 1(2), 1992.

L'une des références de bases des systèmes d'informations coopératifs, dans lesquels un agent est vu comme un système entier devant coopérer et souvent négocier avec les autres pour résoudre les conflits existants.

[Brown et Burton 78] : J.S. Brown, R. Burton, "Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills", *Cognitive Science*, Vol. 2, Pages 155-192, 1978.

Les auteurs présentent ici une approche classique de modélisation de l'apprenant par catalogue d'erreurs, où il s'agit, à chaque écart de l'apprenant par rapport à la résolution donnée par l'expert, de l'apparenter à l'une des erreurs répertoriées dans le catalogue. Cette démarche ne peut être intéressante que dans des expertises déterministes, mais est considérée

comme trop réducteur dans de nombreux domaines d'application.

[Brooks 89] : R.A. Brooks, "A Robot that Walks: Emergent Behaviors From a Carefully Evolved Network", *AI memo*, Vol. 1091, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1989.

Une référence de base des systèmes d'agents réactifs dans l'univers de la Robotique, où le modèle d'agents retenu est la fameuse architecture de subsomption.

[Cambier et al. 97] : C. Cambier, E. Perrier, J.P. Treuil, P. Preux, "Action physique et espace géométrique - Contribution à une réflexion sur l'utilisation des modèles multi-agents pour la simulation de processus physiques - Application RIVAGE", 5èmes Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, JFIADSMAS'97, La Colle sur Loup, Alpes Maritimes, France, Page 89, Avril 1997.

Cet article est très intéressant dans le cadre de nos travaux : les auteurs ont le même souci commun de modéliser des systèmes complexes touchant à des phénomènes naturels (ici l'écoulement de l'eau). Leurs travaux amènent à décrire la complexité structurelle du domaine par une approche descendante, en différents niveaux d'organisation abstraits. La relation des agents avec l'environnement est extrêmement enrichissante, elle convient bien au type de domaine abordé.

[Camps et Gleizes 96] : V. Camps, M.P. Gleizes, "Réflexions sur l'apprentissage en univers Multi-Agents", *Journée thématique du PRC-IA sur les systèmes multi-agents*, Toulouse, pages 59-68, Février 1996.

Cet article précise quelques idées sur les travaux en apprentissage et Systèmes Multi-Agents.

[Carr et Goldstein 77] : B. Carr, I. Goldstein, "Overlays, a theory of modelling for CAI", *AI memo*, Vol. 406, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1977.

Les auteurs présentent ici l'un des articles les plus cités de la modélisation de l'apprenant. Il s'agit de la technique de recouvrement distribué ou "overlays", qui consiste à modéliser la résolution de l'apprenant comme un sous-ensemble de celle de l'expert, et de chercher donc à recouvrir la résolution de l'expert.

[Casti 97] : J.L. Casti, *Would-be Worlds: how simulation is changing the frontiers of sciences*, Wiley Publishers, London, 1997.

Un ouvrage agréable à lire, où l'on peut avoir une vision générale et non informatique des systèmes complexes et de leur propriété. On retiendra en particulier les nombreux exemples naturels illustrant les phénomènes émergents.

[Cerri et Loia 97] : S. Cerri, V. Loia, "A concurrent, distributed architecture for diagnostic reasoning", *Journal of user Modelling and User Adapted Interaction*, 1997.

Cet article traite de la faisabilité de modélisation du raisonnement diagnostic concurrent avec un modèle d'acteurs.

[Coad et Yourdon 91] : P. Coad, E. Yourdon, "Object-Oriented Analysis", "Object-Oriented Design", Yourdon Press, Prentice Hall, 1991.

L'un des premiers ouvrages présentant l'analyse et la conception objet du logiciel sous la forme de décomposition des rôles dans le système.

[Coveney et Highfield 95] : P. Coveney et R. Highfield, *Frontiers of Complexity: The search for Order in a Chaotic World*, 1995.

Une définition intéressante sur la complexité dans les univers chaotiques, vue comme l'étude du comportement d'une collection macroscopique de composants atomiques (microscopiques) qui évoluent dans le temps, dont les interactions conduisent à un comportement collectif cohérent.

- [Dessalles 96] : J.L. Dessalles, *L'ordinateur génétique*, éditions Hermès, 1996.
Cet ouvrage présente les travaux sur les algorithmes génétiques et leur intérêt fondamental dans la Systémique.
- [Drogoul et al. 91] : A. Drogoul, J. Ferber, E. Jacopin, "Viewing cognitive modeling as Eco-Problem-Solving : The Pengi Experience", Rapport N° 2/91 du LAFORIA, Université de Paris VI, France, Janvier 1991.
L'article décrit et illustre le principe de l'éco-résolution.
- [Drogoul et Ferber 94a] : A. Drogoul, J. Ferber, "Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies", dans *Simulating Societies: the computer simulation of social phenomena*, N. Gilbert & J. Doran eds, North-Holland, UCL Press, Pages 127-142, 1994.
Une très intéressante vision de la notion d'émergence comportementale dans les univers de simulation.
- [Drogoul et Ferber 94b] : A. Drogoul, J. Ferber, "Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies", dans *Artificial Social Systems*, Vol. 830, C. Castelfranchi & E. Werner eds, Springer-Verlag, Pages 3-23, 1994.
Les auteurs présentent dans cet article une description du système MANTA.
- [Ferber 89] : J. Ferber, "Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communication en Intelligence Artificielle", Thèse d'État, Université de Paris VI, France, Juin 1989.
La base des travaux de Jacques Ferber sur les agents.
- [Ferber 94] : J. Ferber, "La Kénétique : Des Systèmes Multi-Agents à une Science de l'Interaction", *Revue Internationale de Systémique*, Vol.8, N°1, Pages 13-27, 1994.
Cet article propose une analyse des Systèmes Multi-Agents selon les interactions entre agents et l'émergence de structures organisationnelles qui en découlent. Il présente le problème de la relation entre comportements individuels et collectif, en centrant le débat sur l'émergence de structures, comme le résultat des interactions entre agents. Au delà de cette considération, l'article montre l'intérêt d'architectures à trois niveaux de représentation, et amorce les principes de conception descendante ou ascendante du niveau intermédiaire.
- [Ferber 95] : J. Ferber, "Les Systèmes Multi-Agents - vers une intelligence collective", collection iia, Inter-Éditions, Paris, France, 1995.
Le seul ouvrage français traitant du domaine des agents. Une mine de richesse pour le domaine.
- [Ferber et Müller 96] : J. Ferber, Jean-Pierre Müller, "Influences and Reaction : a Model of Situated Multiagent Systems", ICMAS'96, Kyoto, Décembre 1996.
Cet article décrit des travaux sur les agents situés et l'environnement d'un système multi-agents, et en particulier montre comment les interactions entre agents et environnement peuvent se percevoir en terme d'action.
- [Fergusson 92] : I. A. Fergusson, "Towards an architecture for adaptative, rational, mobile agents", dans *Decentralized Artificial Intelligence-3*, 3rd European Workshop on Modelling Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW'91, Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam, Hollande, Pages 249-262, 1991.
Innes Fergusson présente ici ses travaux de Ph-D sur la plate-forme Touring machine, utilisant un modèle d'agent hybride.
- [Forrest 90] : S. Forrest, "emergent computation: Self-organizing, Collective, and Cooperative

Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks”, introduction to the proceedings of the ninth annual CNLS Conference, dans *emergent computation*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, Pages 1-11, 1990.

Cet excellent ouvrage, “emergent computation”, est un recueil de travaux sur l’émergence, du chaos à la vie artificielle. Il reprend les plus grands articles parus dans la revue Physica-D. L’article de Stéphanie Forrest est plus particulièrement axé sur le calcul émergent et l’auteur explique comment un résultat de calcul peut être envisagé comme l’émergence d’une situation à partir d’interactions entre toutes les variables du calcul.

[Frasson et al. 92] : C. Frasson, G. Gauthier, G. Imbeau, “Architecture d’un système tutoriel basé sur un curriculum”, *Génie Éducatif*, Vol. 4 et 5, Pages 23-37, Décembre 1992.

Les travaux effectués à cette époque dans le projet Heron par Claude Frasson ont consisté à définir une modélisation du “curriculum”, c’est-à-dire du cursus d’enseignement en fonction d’un objectif pédagogique particulier. Ils offrent alors une vue globale de ce que pourrait être un environnement interactif d’apprentissage par ordinateur pour l’enseignement traditionnel.

[Fox 88] : M.S. Fox, “An Organizational View of Distributed Systems”, in Proc. Readings in Distributed Artificial Intelligence, Bond & Gasser eds, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA, 1988, pp. 140-150.

Un article sur l’organisation dans les systèmes multi-agents. On retiendra les idées de réduction de complexité assignée à la présence de niveaux d’abstraction, proposée dans la théorie des systèmes, et reprise dans cet article pour en effectuer la comparaison avec Hearsay II. Néanmoins, nos travaux ne rentrent pas dans ce cadre, car la nécessité de coordination n’est pas une caractéristique fondamentale de GEAMAS, à cause des domaines d’application abordés.

[Gilbert et Doran 94] : N. Gilbert, J. Doran, “Simulating Societies: the computer simulation of social processes”, N. Gilbert et J. Doran eds, UCL Press, 1994.

Ce livre regroupe les actes de l’un des deux derniers workshops sur la modélisation des sociétés artificielles et présente des travaux sur l’émergence dans cette classe de problème. Le deuxième workshop ([Gilbert et Conte 95] : N. Gilbert, R. Conte, « Artificial Societies: the computer simulation of social life », N. Gilbert et J. Doran eds, UCL Press, 1995), qui est plus récent, en constitue la suite.

[Giroux 93] : S. Giroux, “Agent et Acteurs : une nécessaire unité”, Thèse de l’Université de Montréal, Québec, Canada, Mars 1993.

La thèse de Sylvain Giroux présente l’environnement ReActalk, basée sur la notion d’écosystème, ainsi que les applications développées dans ce cadre.

[Gisolfi et Loia 94] : A. Gisolfi, V. Loia, “Designing complex systems within distributed architectures: an ITS perspective”, *Applied Artificial Intelligence*, Vol 8 N°3, pages 393-411, 1994.

Un des trop rares articles décrivant une application de modélisation concurrente (au sens de la programmation orientée objet concurrente) dans le domaine des environnements d’apprentissage par ordinateur. Un très bon article riche en espoir pour le domaine.

[Guessoum 96] : Z. Guessoum, “Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents”, Thèse de doctorat, Université de Paris VI, Mai 1996.

On peut trouver dans cette thèse un exemple de vision statique permettant d’assurer la cohérence dans un système distribué, par la gestion d’un graphe de dépendances.

[Guessoum et al. 97] : Z. Guessoum, J.P. Briot et M. Dojat, “Des objets concurrents aux agents autonomes”, 5èmes Journées Francophones sur l’Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, JFIADSMA’97, La Colle sur Loup, Alpes

Maritimes, France, Pages 93-107, Avril 1997.

Cet article présente une extension de la plate-forme Actalk de J.P. Briot [Briot 89], décrivant des objets actifs, pour intégrer la notion d'agent autonome. Le principe d'autonomie des agents impose le contrôle des activités de l'agent. La solution présentée consiste à définir un méta-comportement pour superviser les interactions entre les agents.

[Jennings 93] : N.R. Jennings, "Specification and implementation of a belief desire joint-intention architecture for collaborative solving problems", *Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, Vol. 2(3), Pages 289-318, 1993.

Cet article offre au lecteur une vue de l'architecture de GRATE, basée sur les intentions et l'approche BDI (Belief-Desire-Intention).

[Kanada et Hirokawa 94] : Y. Kanada, M. Hirokawa, "Stochastic Problem Solving by Local Computation based on Self-organization Paradigm", 27th Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS'94, Pages 82-91, 1994.

L'article présente un exemple de calcul émergent à travers le système CCM, qui montre comment sont résolus des problèmes classiques de calcul par émergence, comme les tris par exemple.

[Kampis 91] : G. Kampis, "Self-modifying Systems in Biology and Cognitive Science", Pergamon Press, Oxford, Angleterre, 1991.

George Kampis propose ici une réflexion sur le principe des propriétés émergentes. Il spécifie notamment qu'une fois la propriété créée, celle-ci existe indépendamment des composants et facteurs qui lui ont donné naissance.

[Lardjane 93] : P. Lardjane, "SPIRIT : une plate-forme multi-agents dédiée aux systèmes complexes", *Journée thématique du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, Montpellier, France, Décembre 1993.

Un autre exemple que celui de [Benhamou et al. 92], présentant un système naturellement distribué dans le cadre nucléaire.

[Lenay 94] : C. Lenay, "Intelligence Artificielle Distribuée : Modèle ou Métaphore des Phénomènes Sociaux", *Revue Internationale de Systémique*, Vol.8, N°1, Pages 1-11, 1994.

L'article de Charles Lenay est centré autour de la notion d'émergence en sciences cognitives. Il rejoint les considérations des systèmes multi-agents, en montrant que l'émergence de comportements cohérents dans un groupe résulte d'une activité collective échappant en partie à chacun des agents qui composent le système. La notion d'observateur interne est très intéressante : elle y est présentée comme une forme d'ignorance interne, dont on sent intuitivement qu'il convient de la définir précisément dans le système.

[Lenay 96] : C. Lenay, "Coopération et intentionnalité", dans les Journées Françaises sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, JFIADMSA'96, Sète, France, Pages 265-272, Avril 1996.

Charles Lenay expose ici la notion d'attracteur ou de phénomène attracteur pour rattacher au concept de l'observateur les résultats de l'auto-organisation.

[Langton 89] : C.B. Langton, "Artificial Life", dans *Artificial Life, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*, Vol. VI, Addison-Wesley publishers, Pages 1-48, 1989.

Christopher Langton a beaucoup œuvré pour la vie artificielle, avec la plate-forme Swarm qu'il a développé à Santa-Fé. Cet ouvrage est l'une des références sur la vie artificielle.

[Lorigny 92] : J. Lorigny, "Les systèmes autonomes : Relation aléatoire et sciences de l'esprit", AFCET systèmes, Dunod eds, 1992.

Jacques Lorigny présente dans ce livre une excellente analyse de l'observateur de

l'émergence dans un système artificiel, en spécifiant que le hasard n'existe pas, et que le résultat de phénomène émergents est apparemment hasardeux, ce qui définit la relation aléatoire.

[Maes 92] : P. Maes, "Learning Behavior Networks from Experience", dans *1st European Conference on Artificial Life*, Paris, France, F. Varela & P. Bourguin eds, MIT Press, Cambridge, MA, USA, Pages 48-57, 1992.

Pattie Maes présente ici une approche de l'auto-adaptation, consistant à sélectionner l'action de l'agent de façon ascendante. Les stimuli externes des agents sont quant à eux basés sur l'existence de motivations internes, ce qui rend ce mécanisme plus complexe que celui que nous retenons dans GEAMAS, qui n'a pas de dimension de motivation.

[MARCIA 96] : Groupe MARCIA, "Auto-organisation:=évolution de structure(s)", *Journée thématique du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, Toulouse, France, Pages 139-152, Février 1996.

Cet article est l'une des premières références qui précise la notion d'auto-organisation et caractérise l'ensemble des mécanismes en jeu. Ce travail permet de situer ses propres mécanismes dans la classification proposée.

[Minar et al. 96] : N. Minar, R. Burkhart, C. Langton and M. Askenazi, "The SWARM Simulation System: a Toolkit for Building Multi-agent Simulations", <http://www.santafe.edu/projects/swarm/>, Juin 1996.

L'un (des rares !) articles accessibles sur le Web décrivant la plate-forme Swarm.

[Mitchell et Hofstadter 90] : M. Mitchell, D.R. Hofstadter, "The emergence of understanding in a computer model of concepts and analogy-making", dans *emergent computation*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, Pages 322-334, 1990.

Les auteurs proposent ici une vision objective de l'émergence, précisant que l'émergence ne peut s'expliquer que par le manque de connaissances humaines sur les mécanismes intrinsèques mis en jeu dans les résultats surprenants qu'elle peut produire. Je reste très proche de cette idée dans mes travaux, au point de proposer de l'appeler "émergence construite".

[Müller 96] : Jörg P. Müller, "A Markovian Model for Interaction among Behavior-based Agents", dans *Intelligent Agents*, Proceedings of the Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, ATAL-95, M. Wooldridge, J.P. Müller & M. Tambe eds, Springer-Verlag, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), Vol. 1037, Pages 376-391, 1996.

Jörg P. Müller présente ici une adaptation des modèles de Markov pour la prise de décision comportementale, lors de l'auto-adaptation. Les travaux sont ici appliqués à sa plate-forme InteRRap, dans le monde de la Robotique. Des modèles probabilistes, pour lesquels la distribution de la probabilité conditionnelle satisfait la propriété de Markov, ont été intégrés dans le modèle d'agent.

[Newell et Simon 72] : S. Newell, H.A. Simon, "Human Problems Solving", Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1972.

Newell et Simon sont à la base de l'explication de certains mécanismes de résolution de problèmes chez l'Homme. Ils proposent dans cet ouvrage un modèle qui est encore beaucoup appliqué en sciences de l'éducation, faisant office de référence.

[Pachet et al. 94] : F. Pachet, S. Giroux, G. Paquette, "Pluggable Advisors as Epiphyte Systems", *CALISCE 94*, Paris, France, Septembre 1994.

Cet article présente EpiTalk, un environnement basé sur l'introduction d'agents espions pour capter les interventions de l'utilisateur et les transmettre à l'application sous-jacente, sans la déranger.

- [Pachet 97] : F. Pachet, "Représentation de connaissances et langages à objets", Habilitation à Diriger des Recherches, mémoire de synthèse, Université de Paris VI, Mai 1997.
Ce rapport décrit les travaux de François Pachet au Laforia.
- [PLEIAD 92] : J.Y. Antoine, O. Baujard, O. Boissier, B. Caillot, M. Chaillot, Y. Demazeau, S. Pesty, J. Sichman, M.H. Stéfanini, D. Ziébelin, Groupe PLEIAD, "Vers un taxinomie du vocabulaire pour les Systèmes Multi-Agents", Journée thématique du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents, Nancy, France, Décembre 1992.
Un article de référence qui présente la base du vocabulaire du domaine des systèmes multi-agents, à travers les différents domaines scientifiques qui les joutent. On trouvera notamment des définitions sur l'émergence, sans toutefois que soit mentionnée la nécessité de niveaux de granularité différents.
- [Quinqueton et Arques 95] : J. Quinqueton, D. Arques, "Informatique et génomes : 1. obtention de séquences", "Informatique et génomes : 2. Interprétation de séquences", *Technique et Science Informatiques*, Vol. 14 (1), 1995, pp. 7-8 et Vol. 14 (2) 1995, pp. 111-112.
Ces deux articles résument les travaux menés au LIRMM sur la modélisation de systèmes complexes. L'émergence y est vue comme un moyen de formuler des hypothèses sur les solutions du système.
- [Rumbaugh et al. 91] : J. Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, W. Lorenzen, Object-Oriented Modeling and Design, Prentice Hall, 1991 ; OMT, Modélisation et Conception Orientées Objet, édition Française revue et augmentée par A.B. Fontaine, G.P. Reich, V. Zaïm, éditions Masson, Paris, France, 1994.
L'ouvrage de base présentant la méthode standardisée OMT, méthode d'analyse et de conception objet.
- [Searle 92] : J.R. Searle, La redécouverte de l'esprit, Gallimard, 1992.
J.R. Searle, philosophe, a travaillé sur la conscience, en temps que propriété émergente de l'esprit. Il introduit alors deux niveaux d'émergence, forte et faible, pour indiquer la présence ou l'absence de mécanismes de contrôle dans les processus émergents. Il conclut en spécifiant que la conscience ne peut être émergente.
- [Simon 96] : H. Simon, "The Sciences of the Artificial", 3rd edition, MIT Press, 1996.
Où l'on trouve une excellente étude montrant la différence entre un système artificiel et naturel : peu importe si la composition interne n'est pas fidèle à la réalité, si le comportement externe observable est lui en osmose.
- [Sornette et al. 1993] : D. Sornette, P. Cowie, P. Miltenberger, A. Sornette, C. Vanneste, "Organization of Rupture", *Journal of Geophysical Research*, Janvier 1993.
Les travaux de D. Sornette à Nice présentent une application géophysique des systèmes critiques auto-organisés dans le domaine de la Sismicité.
- [Sornette 91] : A. et D. Sornette, "Commentaire de l'article de P. Bak et K. Chen", *Revue Pour la Science*, N°161, Page 62, Mars 1991.
Ce commentaire apporte quelques précisions sur les définitions de P. Bak et K. Chen [Bak et Chen 91], notamment concernant les fondamentaux des systèmes critiques auto-organisés : nombreux degrés de liberté du système (système non contraint initialement), dynamique non-linéaire, ...
- [Stewart et Varela 94] : J. Stewart et F. Varela, "L'intelligence collective des lymphocytes : le système immunitaire est-il cognitif ?", dans *Intelligence collective*, E. Bonabeau et G. Theraulaz eds, Hermes, 1994.

Ce chapitre du livre d'Éric Bonabeau et Guy Theraulaz illustre des travaux de l'émergence dans les systèmes vivants. Il est intéressant de constater que dans ce domaine de la vie artificielle, les préoccupations informatiques se rejoignent, comme les auteurs le citent Page 153 : « Cependant, l'intelligence collective des lymphocytes ne sera réellement acquise que dans la mesure où les mécanismes qui conduisent à ce résultat peuvent être identifiés. ».

[Taylor 91] : C. Taylor, "Fleshing out Artificial Life II", dans *Artificial Life II*, C. Langton, C. Taylor, D. Farmer & S. Rasmussen eds, Addison-Wesley, 1991.

C. Taylor travaille dans le domaine de la vie artificielle. Il présente l'émergence comme un aspect dynamique du système, impliquant qu'un phénomène émergent est plus que la somme des interactions locales entre ses composants. Ces idées rejoignent également celles de George Kampis sur l'émergence.

[Treuil et al. 97] : J.P. Treuil, E. Perrier, C. Cambier, "Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques spatialisés", 5èmes Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, JFIADSMA'97, La Colle sur Loup, Alpes Maritimes, France, Pages 211-228, Avril 1997.

Cet article pose le problème de la transposition de phénomènes réels (ici des processus physiques) dans un monde d'agents. L'article s'attache à montrer la pertinence des caractéristiques des agents (autonomie, interactions) dans le monde de la Physique. L'article laisse apparaître la différence d'un système réel avec la modélisation informatique que l'on en fait dans un but de simulation. Notamment, s'il paraît peu utile de considérer l'autonomie et la communication comme essentiel d'un processus physique, il est tout à fait intéressant d'en parler au niveau des programmes qui les représentent.

[Wilson 90] : S.W. Wilson, "Perceptron redux: emergence of structure", dans *emergent computation*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, Pages 249-256, 1990.

S.W. Wilson qui travaille dans le domaine de la Socio-Biologie en vie artificielle, montre ici comment pourrait fonctionner le mécanisme d'auto-organisation dans un ensemble vivant d'insectes.

[Wooldridge et Jennings 95] : M. Wooldridge, N.R. Jennings, "Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey", dans *Intelligent Agents*, Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, ATAL-94, M. Wooldridge & N. R. Jennings eds, Springer-Verlag, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), Vol. 890, Heidelberg, Germany, Pages 1-39, 1995.

L'un des articles de synthèse dans le domaine des agents. Cet article a le mérite de comparer tout un ensemble de travaux se rapportant à la fois à la théorie des agents, aux modèles (architectures), et aux langages de développement par agents.