
Mémoire de synthèse

Simulation Multi-Agents : Architecture, Ingénierie et Expérimentations

Rémy Courdier

Habilitation à diriger des recherches

Spécialité Informatique
Université de la Réunion

Soutenue le 28 août 2003, devant le jury ci-après :

Vincent CHEVRIER, Maître de Conférence HDR, Université de Nancy, Rapporteur

Pierre MARCENAC, Professeur, Université de la Réunion, Rapporteur

Bernard MOULIN, Professeur, Université Laval, Rapporteur

Joel QUINQUETON, Professeur, Université de Montpellier, Rapporteur

Henry RALANBONDRAINY, Professeur, Université de la Réunion, Examineur

« L'intelligence parcellaire, compartimentée, mécaniste, disjonctive, réductionniste, brise le complexe du monde en fragments disjoints, fractionne les problèmes, sépare ce qui est relié, unidimensionnalise le multidimensionnel. C'est une intelligence à la fois myope, presbyte, daltonienne, borgne; elle finit le plus souvent par être aveugle. Elle détruit dans l'œuf toutes les possibilités de compréhension et de réflexion, éliminant aussi toutes chances d'un jugement correctif ou d'une vue à long terme. Ainsi, plus les problèmes deviennent multidimensionnels, plus il y a incapacité à penser leur multidimensionnalité; plus progresse la crise, plus progresse l'incapacité à penser la crise; plus les problèmes deviennent planétaires, plus ils deviennent impensés. Incapable d'envisager le contexte et le complexe planétaire, l'intelligence aveugle rend inconscient et irresponsable. Dès lors on se rend compte qu'un problème clé est celui de compléter la pensée qui sépare par une pensée qui relie. Complexus signifie originellement ce qui est tissé ensemble. La pensée complexe est une pensée qui cherche à la fois à distinguer (mais non disjoindre) et à relier. »

Edgar Morin

Préambule

Avant-propos

Ce document constitue le mémoire de synthèse d'habilitation à diriger des recherches, il vise à répondre aux trois objectifs requis pour l'obtention de ce diplôme et caractérisés par : (i) la présentation d'une démarche originale dans un domaine scientifique, (ii) la maîtrise d'une stratégie autonome de recherche scientifique, (iii) la capacité d'encadrement de jeunes chercheurs.

Pour cela ce document s'appuie sur une organisation en 6 chapitres :

Le premier chapitre est un Curriculum Vitae particulièrement détaillé présentant de manière synthétique mais exhaustive les aspects propres à mon activité dans le domaine de la recherche scientifique. Cette section présente l'ensemble de mes activités en qualité de membre de conseils, comités scientifiques ou groupes de travail, elle dresse la liste des références de l'ensemble des publications scientifiques produites ainsi que les activités d'encadrement scientifique effectuées. Le lecteur trouvera également dans cette section l'ensemble des projets et programmes de recherche dans lesquels je me suis impliqué pour mener à bien mon activité scientifique. Enfin, les aspects relatifs à l'animation de manifestations à caractère scientifique sont présentés. Par son niveau de synthèse cette section offre un angle de vue global sur mon activité et constitue un premier niveau de réponse aux trois objectifs fixés par ce document.

Le second chapitre a pour objectif de présenter ma démarche scientifique en retraçant les motivations et activités de recherche développées depuis ma soutenance de thèse de doctorat jusqu'en 2003. Ce chapitre montre la cohérence de mon parcours associant la recherche dans le secteur privé et universitaire au sein du laboratoire IREMIA¹ de l'Université de la Réunion.

Les chapitres 3 à 5 développent mes activités de recherche réalisées au sein de l'équipe Multi Agent Systems Modelling And Simulations (MAS²) (<http://www.univ-reunion.fr/~mas2>) depuis 1996. La description des aspects originaux de mon travail théorique se situe dans le dernier axe plus spécifiquement dédié aux aspects d'ingénierie de conception de système de simulation par approche multi-agents et qui constitue le chapitre le plus développé de ce mémoire.

Dans le dernier chapitre, le lecteur trouvera ensuite un bilan des contributions et les perspectives de recherche sur la base de programmes actuellement en cours de démarrage où d'étude prospective.

Ce document se termine par une bibliographie complète des références considérées dans ce document, à l'exception de la bibliographie personnelle incluse dans le Curriculum Vitae de la première partie de ce mémoire. Enfin, une brève annexe propose des compléments en termes de schémas et figures.

Par ailleurs, deux documents annexes accompagnent ce mémoire, un document intitulé *Attestations* qui est constitué d'un ensemble de témoignages de personnalités attestant certains propos développés dans ce mémoire, et un document intitulés *Articles de référence*, regroupant une liste de publications sélectionnées identifiables dans le texte du document par l'utilisation du style « Gras » de la police employée lors de leur référencement.

¹ IREMIA : Acronyme pour Institut de Recherche En Mathématiques et Informatique Appliquées

Sommaire

Avant-propos	2
Curriculum Vitae détaillé : Volet Recherche	5
Etat civil.....	5
Ancienneté.....	5
Titre Universitaire	6
Membre de conseils, comités, groupes de travail, et jury	6
Publications scientifiques	8
Encadrement scientifique.....	11
Conduite et Participation à des programmes de recherche	11
Animations à caractère scientifique	13
Démarche et problématiques de recherche	14
Graphes sémantiques et d'objets pour la représentation de systèmes complexes.....	14
Systèmes d'automatisme répartis et approche Agent.....	15
La simulation agent comme outil d'analyse de systèmes complexes	16
Synthèse des objectifs de recherche et résultats des travaux.....	17
Architecture, fonctionnalités et optimisation de la plate-forme expérimentale Geamas	18
Aspects architecturaux	18
Enrichissement du modèle agent de Geamas	20
Le concept de rôle dans Geamas	20
Agents et objets situés dans Geamas	21
Conception de scénarios de simulation, contrôle et interprétation des résultats	21
Création de systèmes multi-agents de simulation	22
Contrôle d'une simulation	22
Suivi, validation et interprétation de résultats de simulation	23
Contrôle et optimisation des performances de Geamas	24
Méthodologie et ingénierie de conception de SMA pour la simulation	25
Méthodologie et Simulation Multi-Agents.....	25
Problématique	25
Propositions et résultats	26
Cadre formel uniforme pour la représentation des aspects statiques et dynamiques d'un SMA	29
Problématique	29
Propositions et résultats	29
Vers une méthodologie de sélection des motivations pour les agents hybrides.....	32
Des agents réactifs à l'éthologie artificielle	32
De l'éthologie artificielle aux motivations naturelles	33
Propositions et résultats	33

Expérimentations et transfert des résultats vers le monde professionnel	34
Simulation agent de la gestion collective d'effluents d'élevage	34
Problématique et objectifs	34
Description du projet	35
Résultats et perspectives	36
Gestion de ventes aux enchères avec Geamas	36
Problématique et objectifs	36
Description du projet	37
Résultats et perspectives	39
Etude par simulation agents de géorisques causés par l'activité de l'homme en environnement tropical	40
Problématique et objectifs	40
Description du projet et résultats	40
Intérêt scientifique et perspectives	41
Transfert de recherche – Monde professionnel	42
Problématique et objectifs	42
Description du projet	42
Résultats et perspectives	43
Perspectives et projet de recherche	44
Couplage du modèle multi-agents à d'autres approches et langages de description de connaissances	44
Architecture et approche Agent. . . vers la distribution et la co-construction	45
Vers une architecture de distribution des SMA	45
Vers une démarche de co-construction des SMA sur les réseaux	46
Renforcement des liens nationaux et internationaux	47
Références	48
Figures et schémas complémentaires	52
Schéma d'architecture du principe d'interfaçage Geamas/Système d'Information Géographique	52
Le traceur d'interactions de Geamas	52
Interface de conception du prototype AGCP-Net	53
Architecture générale du projet ETIC ³	53

Chapitre 1.

Curriculum Vitae détaillé : Volet Recherche**Etat civil****Rémy Courdier**

Né le 28 juin 1964 à Le Locle (Suisse)

Nationalité française, Vie maritale, 3 enfants

Adresse personnelle

17, Chemin du premier bras
La Bretagne
97490, Ste Clotilde
La Réunion - France
Tél. : 02 62 98 96 61
Email : Remy.Courdier@univ-reunion.fr

Adresse professionnelle

Laboratoire [IREMIA](#) - [Université de la Réunion](#)
15, avenue René Cassin
97715 St Denis Messag cedex 9
La Réunion - France
Tél. : 02 62 93 82 83 - Fax : 02 62 93 82 60

Ancienneté***Ancienneté professionnelle hors Université***

Ma carrière professionnelle s'est engagée dans un premier temps au sein de centres de recherche et développement de groupes industriels privés. Il me paraît important de souligner les 9 années exercées dans ce cadre professionnel :

- 1987-1988 DIGITAL EQUIPMENT CORPORATION Ferney Voltaire
2^{ème} constructeur informatique mondial dans les années 90,
Cadre position 1, Ingénieur de recherche & développement, conception d'un protocole expérimental de communication pour des applications réparties en technologie DCE.
- 1988-1996 GROUPE SCHNEIDER Sophia Antipolis
2^{ème} constructeur d'automatisme mondial,
Cadre position 2, Ingénieur de recherche & développement, conception de prototypes logiciels probatoires pour la configuration, le diagnostic et la programmation d'automates programmables. Expert Méthodologie et Architecture de développement des grands projets logiciels dans la division Automate programmable (94-96). Représentant du centre de Sophia-Antipolis au Pôle Informatique du Groupe Schneider.
- Les rapports scientifiques et techniques rédigés durant cette période sont internes à ces centres privés et n'ont pas fait l'objet de publications en revues ou colloques.

Ancienneté générale à l'Université

Maître de conférence à l'Université de la Réunion depuis le 1^{er} septembre 1996.

Classe Normale 5^{ème} échelon en septembre 2002

Titre Universitaire

Docteur en Informatique de l'Université de Nice-Sophia Antipolis

Obtenu avec mention très honorable et **félicitations du Jury** le 12 janvier 1993.

Titre de thèse

Représentation des connaissances pour les diagnostics de dysfonctionnements de Systèmes Intégrés de Production.

Jury

D. Hérin, Docteur d'Etat, Prof. Université de Montpellier, Directeur de thèse

J-C. Boussard, Docteur d'Etat, Prof. Université de Nice-Sophia Antipolis, Prés. de Jury

J.P. Haton, Docteur d'Etat, Prof. Université de Nancy I, Rapporteur

B. Dubuisson, Docteur d'Etat, Prof. Université de Compiègne, Rapporteur

P. Cointe, Docteur d'Etat, Prof. Ecole Nat. Sup. des Mines de Nantes, Examinateur

J. Doussy, Chef de service Recherche & Dév, Telemecanique S.A., Examinateur

G. Favier, Directeur de recherche CNRS, Laboratoire I3S, Examinateur

Membre de conseils, comités, groupes de travail, et jury

Comités et conseils scientifiques

- Membre du Conseil Scientifique de l'Université de la Réunion.
- Membre du Conseil Scientifique du [CCSTIR](#) (Centre de Culture Scientifique Technique et Industrielle de la Réunion) depuis novembre 2001. Conseil qui a pour objectif de vérifier la validité scientifique des grands projets d'animation scientifique réalisés dans la Région Réunion.
- Membre du Conseil Scientifique de l'IUFM de la Réunion.
- Membre du comité de programme des Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents depuis 2001.
- Membre suppléant de la Commission de Spécialistes section 27 de l'Université de la Réunion.

Comités de lecture de revues et conférences internationales

- Rapporteur pour le numéro spécial consacré aux « Environnement de développement de systèmes multi-agents » de la revue TSI (Techniques et Sciences Informatiques), édité en 2001, Comité coordonné par Xavier Briffault, Zahia Guessoum et Michel Occello.
- Rapporteur pour la conférence internationale ECAI'2000 (14th European Conference on Artificial Intelligence), Berlin, Août 2000. Comité coordonné par Nick Jennings de l'Université de Southampton (UK).
- Rapporteur pour la Revue d'Intelligence Artificielle (RIA), éditée par Hermes Science, 2002. Comité coordonné par Jean-Charles Pomerol.

Groupes de travail

- Membre du groupe [ASA](#) (Approches par Sociétés d'Agents) du [GdR I3](#)² (Information-Interaction-Intelligence) affilié à l'Association Française d'Intelligence Artificielle ([AFIA](#)). Ce groupe vise à étudier les différentes approches proposées pour l'ingénierie des SMA : architectures, modèles, démarches et méthodes. Implication dans les projets d'étude et

² Le GdR I3 (<http://sis.univ-tln.fr/gdri3/>) est l'un des 5 GdR d'animation du département STIC du CNRS.

publication collectives de résultats. (ex. publication de l'étude comparative de plates-formes multi-agents en chapitre d'ouvrage collectif [ML02]).

- Membre du groupe [MIMOSA](#) du [GdR 13](#), qui est un groupe de travail français ayant pour objectif de produire des spécifications de modèles pour la simulation de systèmes complexes et de travailler à la réalisation d'un prototype probatoire de plate-forme générique de simulation multi-formalismes, multi point de vue et multi-niveaux. Cette initiative capitalise l'expérience des principales équipes de multi-agents des laboratoires de recherche français (<http://www-lil.univ-littoral.fr/Mimosa/>).

Jury de thèse

- Examineur de la thèse de Stéphane Calderoni intitulé « Ethologie Artificielle et Contrôle Auto-Adaptatif dans les Systèmes d'Agents Réactifs », présenté le 13 septembre 2002 à l'Université de la Réunion. Jury placé sous la présidence de Jean-Pierre Briot.

Publications scientifiques

Revues avec comité de lecture et ouvrages collectifs internationaux

- [CG+02a] R. Courdier, F. Guerrin, F.H. Andriamasinoro., J.M. Paillat. Agent-based simulation of complex systems: Application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS), Vol. 5, no.3, 30-Jun-2002 - jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/4.html
- [MC98] P. Marcenac, R. Courdier. Experimentation with an Agent-Oriented Platform in JAVA. *Chapitre de l'ouvrage collectif "Implementing Application Frameworks: Object-Oriented Frameworks at Work"*, Edité par Mohamed Fayad, Douglas Schmidt, et Ralph Johnson, (ISBN 0471252018), 672 pp avec CD-ROM, Wiley and Sons' book, juin 1999.

Revues avec comité de lecture et ouvrages collectifs nationaux

- [ML02] Comparaison des plates-formes SMA françaises à travers un Toy-problem, pages 207-240. *Chapitre de l'ouvrage collectif « Organisation et Applications des SMA »*. Edité par R. Mandiau et E. Lesturgeon, ISBN: 2-7462-0439-8, Ed. Hermes, 2002.
- [CCL02] N. Conruyt, R. Courdier, T. Lun-Kwok-Sui. Technologie de l'Information et de la Communication pour la valorisation et la diffusion de la Recherche, *Journal de la Nature*, pages 71-77, ISSN 0985-0856, Tome 14, N°1, Ed. Bourbon Sciences, 2002.
- [CMG98] R. Courdier, P. Marcenac, S.Giroux. Un processus de développement en spirale pour la simulation multi-agents. *Revue L'Objet*, Vol 4 - N°1, pages 73-86. Ed. Hermès, mars 1998.
- [CHG93] R. Courdier, D. Hérin-Aimé, R. Galera. Une démarche et un modèle de conception à base d'objets et de réseaux sémantiques. *Revue TSI*, Vol 12 - N°3/1993, pages 285-318. Ed. Hermès, 1993.
- [CG91] R. Courdier, F. Grzesiak. Expérimentation de l'apport des techniques système expert dans le contexte du diagnostic des automatismes répartis : Diagnostic d'installation unitelway avec le système CEDIAG. *Revue Intelligence Artificielle et Système Experts*, (ISSN 099205589), pp43-63, 1991.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- [COU03] R. Courdier, Briser l'isolement grâce aux nouvelles technologies : Un modèle d'apprentissage à distance en université reposant sur six années d'expérience, *International Conference on Open & Online Learning (ICOOL'2003)*, 7-13 décembre 2003, Réduit, Ile Maurice, 2003. *En soumission*.
- [AC02b] F.H. Andriamasinoro, R. Courdier, Integration of Generic Motivations in Social Hybrid Agent, *International Workshop on Regulated Agent-Based Social Systems: Theories and Applications (RASTA'02)* as part of the *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS' 2002)* Bologna, Italy, July 15 - 16, pp.71-91, 2002.
- [VC02b] J.-D. Vally, R. Courdier, CGP-Net to model Multi-Agent-Systems, In *International ICSC Congress on Autonomous Intelligent Systems*

- (ICAIS'2002), Geelong, Australia, February 12-15 , WSEAS³ Press, (ISBN 3-906454-30-4) et actes sous CDRom, 2002.
- [AC02a] F.H. Andriamasinoro, R. Courdier, The basic instinct of an autonomous cognitive agent: From individual to collective behavior, In International ICSC Congress on Autonomous Intelligent Systems (ICAIS'2002), Geelong, Australia, February 12-15 , WSEAS Press, (ISBN 3-906454-30-4) et actes sous CDRom, 2002.
- [VC02a] J.-D. Vally, R. Courdier, Hybrid Model to Design Proactivity and Multi-Agent-Systems, 2002 World Scientific and Engineering Society (WSES) Intern. Conference on evolutionary computations, Interlaken, Switzerland, February 11-15, pp. 198-204, (ISBN 960-8052-491), 2002.
- [AC01] F.H. Andriamasinoro, R. Courdier and E. Piquet, Enhancing a multi-agent system performance: from implementation to simulation analysis In CCGrid'01, IEEE Internat. Symp. on Cluster Computing and the Grid, May 16-18, Brisbane, Australia, IEEE Computer Society Press, pp. 464-469, 2001.
- [AC00] F.H. Andriamasinoro, R. Courdier, A model of virtual competition between remote agents In MAMA'2000, Internat. ICSC Symposium on Multi-Agents and Mobile Agents in Virtual Organizations and E-Commerce, December 11-13, Wollongong, Australia, 2000.
- [VC99] J.D. Vally, R. Courdier. A Conceptual 'Role-Centered' Model for Design of Multi-Agent Systems. Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Vol. 1599, pp. 33-46, (ISBN 3-540-65967-6), 1999.
- [SM+98] J.-C. Soulié, P. Marcenac, S. Caldéroni, R. Courdier. GEAMAS v2.0: An Object Oriented Platform for Complex Systems Simulations. In J. Gil, M. Singh, B. Meyer, R. Riehle & R. Mitchell eds, *Proceedings of the 26th International Conference on Technology of Object-Oriented Languages and Systems*, TOOLS 26, , Santa Barbara, USA, 3-7 August. IEEE Computer Society, pp. 230-242, 1998.
- [MC+98] P. Marcenac, R. Courdier, S. Calderoni, and J. C. Soulie. Towards an Emergence Machine for Complex Systems Simulations, Lecture Notes in Computer Science, Springer-verlag, Vol. 1416, pp. 785-794, 1998
- [CMC98a] R. Courdier, P. Marcenac, S. Caldéroni, J.-C. Soulié. Zooming on a multiagent simulation system: from the conceptual architecture to the interaction protocol. *Proceedings of 3rd Internat. Conference on Multi-Agent Systems*, ICMAS'98, Paris, 3-7 July, pp. 411-412. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [CM+98b] S. Caldéroni, P. Marcenac, R. Courdier, J.-C. Soulié, Genetic Encoding for Agent Behavioral Strategy, *Proceedings of 3rd International Conference on Multi-Agent Systems*, ICMAS'98, Paris, 3-7 July 1998, pp. 403-404. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [CH88] R. Courdier, D. Hérin. Un moteur d'inférence basé sur des objets. *Actes du premier congrès européen d'Intelligence Artificielle et Formation*, APPLICA'88, Lille, octobre 1988.
- [CH89a] R. Courdier, D. Hérin. Moteur d'inférence et formalisme objet. *In Proceedings of the International workshop on cognitive informatics*

³ World Scientific and Engineering Academy and Society

applied to organisations, ICO'89, Québec city, juin 1989.

- [CH89b] R. Courdier, D.Hérin. Object-Based Knowledge and reasoning designed for diagnostics. *In Proceedings of the International workshop on advancing information processing in automatic control*, AIPAC89, Nancy, juillet 1989.

Conférences nationales avec actes et comité de lecture

- [VC02c] J.-D. Vally et R. Courdier. Uniformisation des mécanismes de conception des SMA. *Actes des Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'02)*, Lille, France, Hermès, pp. 155-158, (ISBN 2-7462-0555-6), octobre 2002.
- [AC01] F.H. Andriamasinoro et R. Courdier. Un modèle dynamique de comportement agent à base de besoins. *Actes des JFIADSMA'01*, Montréal, Québec, Canada, Hermès, pp-351-353, novembre 2001.
- [GC+98a] F. Guerrin, R. Courdier, S. Calderoni, J.-M. Paillat, J.-C. Soulié, J.-D. Vally. Conception d'un modèle multi-agents pour la gestion des effluents d'élevage à l'échelle d'une localité rurale. *Actes des JFIADSMA'98*, Pont-les-moussons, Hermès, novembre 1998.
- [GC+98b] F. Guerrin, R. Courdier, S. Calderoni, J.-M. Paillat, J.-C. Soulié, J.-D. Vally. Biomass : un Modèle Multi-Agents pour aider à la Gestion Négociée d'Effluents d'Elevage. *Actes du 1er Colloque CEMAGREF sur les Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires*, Clermont-Ferrand, France, Cemagref éditions, pp. 359-378, octobre 1998.
- [CCL+97] S. Calderoni, R. Courdier, S. Leman, P. Marcenac. Construction expérimentale d'un modèle multi-agents. *JFIADSMA'97*, La Colle-sur-Loup (Alpes-Maritimes), avril 97, Hermès pp. 109-123, avril 97.

Rapports scientifiques

- [CG+02b] R. Courdier, F. Guerrin, F.H Andriamasinoro, J.M Paillat. Simulation agent de la gestion collective d'effluents d'élevages : Mise en œuvre des concepts génériques de la plate-forme Geamas au sein de l'application Biomass. *In : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion*, F. Guerrin et J.-M. Paillat (Eds), séminaire des 19-20 juin, Montpellier (F), CD-Rom, 2002.
- [CVL+00] R. Courdier, I. Veloarisoa, N. Larrousse, J.J. Pierrat, O. Robinson. Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication au service de la Formation à Distance dans les îles de l'Océan Indien : Application à un module d'apprentissage des mécanismes de la programmation. *Rapport de Recherche IREMIA*, 2000.
- [CM97a] R. Courdier, P. Marcenac. Rapport Méthodologie de développement du projet MAS2. *Rapport de recherche IREMIA No 3151*, 15 Pages, Avril 1997.
- [CM97] R. Courdier, P. Marcenac. Application de la plate-forme GEAMAS à la résolution du problème de factoriel. *Rapport de recherche IREMIA No 3153*, 13 Pages, Juin 1997.

Encadrement scientifique

Direction de thèses

- Co-direction scientifique (30%) du travail de thèse de Jean-Christophe Soulié, ayant obtenu le titre de docteur de l'université de la Réunion en **décembre 2001**, la direction administrative étant sous la responsabilité de Pierre Marcenac, professeur, habilité à diriger des recherches.
- Suivi final du travail de thèse de Stéphane Calderoni, ayant soutenu le titre de docteur de l'université de la Réunion en **septembre 2002**, la direction administrative étant sous la responsabilité de H. Ralambondrainy, professeur, habilité à diriger des recherches.
- Direction scientifique du travail de thèse de Jean-Dany Vally, doctorant à l'IREMIA, la direction administrative étant sous la responsabilité de Pierre Marcenac.
- Direction scientifique du travail de thèse de Fenintsoa Andriamasinoro, doctorant à l'IREMIA, la direction administrative étant sous la responsabilité de Pierre Marcenac.
- Direction scientifique du travail de thèse de Mahmoud Gangat, doctorant à l'IREMIA, la direction administrative étant sous la responsabilité de Pierre Marcenac.

Direction de Stagiaire 3^{ème} Cycle DEA/DESS & Maîtrise

- Direction scientifique du stage de DEA de Jean-Dany Vally, à l'IREMIA, 97/98.
- Encadrement des stages de 3^{ème} cycle :
 - Institut de Mathématiques Appliquées - Angers, Julien Briton, mai à juillet 2000.
 - DESS Réseau-Multimédia-Internet - Université de la Réunion, Fenintsoa Andriamasinoro, Iremia/Cirad, 98/99.
 - DESS Conception & Administration de Systèmes de Communication Homme-Machine, Université d'Avignon, Jean-Christophe Soulié, IREMIA, 96/97.
 - Ecole Supérieur des Sciences Informatiques - Université de Nice-Sophia Antipolis, A. Michel, Groupe Schneider, 95/96.
 - DESS Informatique et Sciences de l'Ingénieur - Université de Nice-Sophia Antipolis, E. Bricca, Groupe Schneider, 89/90.
 - DESS Informatique et Sciences de l'Ingénieur - Université de Nice-Sophia Antipolis, C. De Santis, Groupe Schneider, 89/90.
- Encadrement de travaux d'étude et de recherche de maîtrise (TER) :
 - Encadrement régulier d'au moins un projet d'étude et de recherche de maîtrise informatique chaque année depuis 1997.

Responsable de 3^{ème} Cycle et Ecole d'ingénieurs

- Coordinateur du comité de pilotage pour la mise en place à la Réunion d'une Ecole d'ingénieurs sur les applications avancées de l'Internet, 2003.
- Fondateur et Responsable de la formation 3^{ème} Cycle DESS Réseau-Multimédia-Internet du Département Mathématiques et Informatique de l'Université de la Réunion, 1996-2003.

Conduite et Participation à des programmes de recherche

Coopérations inter-laboratoires au sein de l'Université de la Réunion

- *Programme Pluri-Formations ETIC, 2002-2006*

Membre du comité directeur du programme Pluri-Formations [ETIC](#) (Environnement Tropical Insulaire et Technologie de l'Information et Communication) et responsable scientifique du thème « modèles, outils de modélisation et représentation des connaissances » au sein de la

plate-forme universitaire conçue dans le cadre de ce programme (<http://etic.univ-reunion.fr>).

Action sur une durée de 4 années commencée en sept. 2002. (financement de 174 K€ globalement sur cette action).

■ **Programme Pluri-Formations MER (PPF Mer), 1999-2001**

Co-Responsable scientifique en collaboration de N. Conruyt du thème N° 9 "Système d'information dégradations" du Programme Pluri-Formations MER (PPF Mer) de l'Université de la Réunion.

Cette action s'inscrivait le contrat quadriennal de l'université visant à la mise en œuvre d'un système d'informations dédié à l'environnement du littoral, la biodiversité et les ressources marines dans le sud-ouest de l'Océan Indien.

Action qui s'est déroulée sur 4 années (financement de l'ordre de 30 K €).

Coopérations Régionales

■ **Institut d'Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA), 2002-2004**

Projet « Etude par simulation agents de géorisques causés par l'activité de l'homme en environnement tropical : application à la dégradation des terres et des forêts à Madagascar ».

Action qui s'étend sur une durée de 3 années (financement 27 K€).

■ **CIRAD-Réunion, Programme « Porcherie Verte », 2002-2004⁴**

Pilote de la réalisation d'un ensemble d'expérimentations par simulation multi-agents sur données réelles de terrain, collectées par le CIRAD sur la localité de Grand-Ilet.

Ce programme de recherche inter-institutionnelles et pluridisciplinaires partage les compétences suivantes : l'équipe Gdor (agronomie système/aide à la décision, J.-M. Médoc et modélisation F. Guerrin), l'équipe Field de l'UMR Inra-Ensar Sol Agronomie Spatialisation (agronomie, J.-M. Paillat et P. Leterme), l'université de la Réunion (modélisation par systèmes multi-agents, R. Courdier) et le Cirad-Tera/université de Pretoria Afrique du Sud (économie de l'environnement, S. Farolfi).

Action qui s'étend sur une durée de 2 années (financement 10 K€ env.).

■ **Groupe Bourbon, 2001-2004**

Suivi scientifique d'un projet R&D intégrant une approche multi-agents avec le groupe Bourbon, premier groupe réunionnais de distribution agro-alimentaire. Ce projet se concrétise par un encadrement de thèse en convention CIFRE avec une soutenance prévue en 2005.

Action qui s'étend sur une durée de 3 années (financement 12 K€ env.).

■ **Enseignement Supérieur - Madagascar**

Dans le cadre du projet PRESUP : formation et encadrement sur la thématique Système Multi-Agents. Plusieurs personnes ont été prises en charge : M. Thomas Mahatody, professeur assistant de l'ENI de l'Ecole Nationale d'Informatique de Madagascar, Mme Fara RAZAFY de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA).

Actions ponctuelles de support et formation dans le domaine multi-agents.

■ **CIRAD-Réunion, ATP 99/60, 1997-2001**

Responsable scientifique du thème : "Couplage systèmes dynamiques et systèmes multi-agents" de l'Action Thématique Programmée (ATP) "Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité" pilotée par F. Guerrin et J.-M. Paillat du CIRAD-Réunion.

Cette collaboration CIRAD/Iremia a donné lieu à 34 Réunions de travail de 3 heures avec compte-rendus (80 pages), la publication de 3 articles de recherche, la proposition d'un stage de

⁴ CIRAD : Acronyme pour Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

DEA, un stage de DESS. D'autre part, un simulateur basé sur la modélisation multi-agents et la modélisation à base de systèmes dynamiques est opérationnel.

Action qui s'est déroulée sur une durée de 3 années⁵ (financement 10 K€ env.).

Coopérations Internationales

■ **Indian Institute of Information Technology de Bangalore, Inde – depuis 2001**

Initiateur d'une collaboration avec l'IIIT-B <http://www.iiitb.ac.in> et l'Université de la Réunion pour l'échange d'enseignants-chercheurs et d'étudiants 3^{ème} cycle. Collaboration établie depuis mars 2001 avec le Professeur Sadagopan, directeur de l'institut. 7 étudiants de 3^{ème} cycle DESS sous ma responsabilité ont profité de cet échange et une possibilité de post-doctorat à l'Indian Institute of Science de Bangalore est en cours d'établissement pour J.D Vally (thésard en fin de parcours que j'encadre).

Action non limitée dans le temps.

■ **CSIRO, Australie, 2000**

Projet d'établissement d'une coopérative virtuelle à base de Systèmes multi-agents pour la gestion collective des stocks de pièces de bois à la Réunion. Projets de transfert recherche / Industrie spécifié par l'IREMIA la société AbleWood et Leila Alem membre du CSIRO's Artificial Intelligence in E-Business (AIEB) <http://www.cmis.csiro.au/aieb>, équipe CMIS (Mathematical and Information Sciences), situé à North Ryde en Australie.

Action qui s'est déroulée sur une durée de 3 mois.

■ **Télé-université de Québec (Canada), 1996-1998**

Responsable du projet Télé-Apprentissage Réparti sur les Réseaux : PROJET TR2, dans lequel une collaboration avec la Télé-université de Québec (Canada) et l'IREMIA a été établie. Evaluation d'un nouveau thème de recherche sur le télé-enseignement au sein de l'IREMIA. Accueil de Richard Hotte puis de Jacques Bordier à l'IREMIA avec organisation de conférences publiques et de séminaires de formation aux techniques d'enseignement à distance.

Action sur 3 ans (financement de l'ordre de 10 K€).

Animations à caractère scientifique

Organisation de colloques et actions de valorisation de la recherche

- Conférence sur les applications à bases de systèmes multi-agents aux 2^{ème} Colloque sur la Recherche Scientifique à Réduit (Ile Maurice) en avril 2001.
- Vice-président du comité d'organisation des septièmes Journées Francophones pour l'intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'99), colloque scientifique national organisé en novembre 1999.
- Présentation des travaux de recherche en relation avec le CIRAD à la commission « Aménagement, environnement et déplacement » de la Région Réunion. Hôtel de Région Pierre Lagourgue, 30 Novembre 1999.
- Animateur de la journée de travail sur la modélisation d'interactions au travers de systèmes multi-agents lors du séminaire "Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité", organisé par le CIRAD-Réunion, Maison de la Recherche des Sciences et de la Technologie (MRST), St Denis, 7-13 avril 1999.
- Conférence sur les systèmes multi-agents et de leurs applications lors des Journées de la recherche 1998, Faculté des Sciences, Université de la Réunion, 1998.

⁵ Cf. Document annexe *Attestation*, F. Guerrin, INRA/CIRAD

Chapitre 2.

Démarche et problématiques de recherche

Ce chapitre présente une synthèse de mon parcours scientifique en établissant en préambule un fil conducteur entre les travaux présentés en soutenance de thèse de doctorat jusqu'aux motivations actuelles des recherches menées dans le domaine des systèmes multi-agents.

Ce parcours peut se structurer en trois phases successives ayant influencées mes travaux sur la thématique de l'intelligence artificielle distribuée et plus particulièrement de la représentation de systèmes complexes au travers de l'approche multi-agents ([Erceau J. et Ferber J., \[EF 91\]](#))⁶ ; Ces trois phases sont les suivantes :

- Une première étape faisant suite à mon travail de doctorat de définition d'architecture à base de graphes sémantiques et d'objets pour la représentation de systèmes complexes ;
- La seconde étape m'a conduit à appréhender les aspects de modélisation et de simulation d'architectures d'applications pour les systèmes d'automatisme répartis et de faire le lien avec l'approche agent ;
- L'étape actuelle, où je présente la problématique des axes de recherche que je mène au travers de mes travaux dans le domaine de la modélisation et simulation agent comme outil d'analyse de systèmes complexes.

Graphes sémantiques et d'objets pour la représentation de systèmes complexes

Lors de mes travaux de thèse (cf. [Curriculum Vitae détaillé](#)), j'ai travaillé sur une approche systémique basée sur la modélisation de données pour la spécification de systèmes de diagnostic dans le domaine des Systèmes Intégrés de Production Industriel. Ce domaine est confronté à une complexité croissante suite à la généralisation des architectures de systèmes distribués d'automatismes programmables connectés sur les réseaux et le plus souvent couplés avec des opérateurs humains. L'approche proposée repose sur la modélisation cognitive à différents niveaux d'abstraction des connaissances par l'intermédiaire de modèles sémantiques. Cette approche permet alors de rendre explicite les interactions entre les entités du système grâce à l'étiquetage des arcs. Du point de vue informatique, un prototype probatoire a été implanté par une architecture objet à trois niveaux : (i) un niveau méta-classe pour la description du méta-modèle (graphe sémantique étendu), (ii) un niveau classe pour la modélisation d'une installation, (iii) un niveau instance d'objet pour la représentation du réel et de sa dynamique.

L'une des particularités de ce travail repose sur les mécanismes de raisonnement associés aux graphes conceptuels de description de la connaissance utilisée. Ce mécanisme repose sur le parcours d'un réseau d'objets interconnectés par des relations sémantiques bidirectionnelles typées. Les stratégies de raisonnement de chaque nœud du réseau sont alors définies par des connaissances de comportement exploitées au moyen d'un moteur d'inférence lui-même implémenté par un réseau sémantique défini avec les concepts de notre modèle de représentation des connaissances.

A l'issue de ces travaux de thèse, j'ai développé différents prototypes probatoires (SysDiag, AppliDiag, FastDiag) dans le cadre du Groupe Schneider (www.schneider.com). Cette expérience m'a permis d'appréhender le domaine du diagnostic comme une facette d'un système de production. Une démarche plus globale de conception des systèmes automatisés devait permettre d'aller beaucoup plus loin dans la démarche de diagnostic. Je me suis alors tourné vers la proposition d'une démarche et d'un modèle de conception hybride à base d'objets et de réseau sémantique pour la conception d'architectures distribuées de systèmes intégrés de production.

⁶ Les références externes à mes travaux de recherche et qui ne figurent pas dans le curriculum Vitae détaillé, sont décrites en fin de documents. Elles seront, dans la suite du mémoire, accompagnées du nom des auteurs sous la forme (noms des auteurs, [référence]) .

Systèmes d'automatisme répartis et approche Agent

La structuration de tels systèmes distribués était alors réalisée essentiellement à partir d'outils issus de l'approche fonctionnelle tels que SADT ([Dickover M.E., \[DIC 77\]](#)), GEMMA ([Adepa, \[ADE 82\]](#)) ou GRAFCET ([Grepas, \[GRE 85\]](#)). Ces derniers s'intéressent essentiellement à la structuration des activités de systèmes (traitements, fonctionnalités), mais de manière beaucoup moins précise à sa sémantique intrinsèque (objets, relations, structures).

J'ai alors introduit et favorisé l'adoption, au sein du service Recherche & Développement de Schneider de Sophia-Antipolis, d'une démarche de modélisation sémantique orientée objet proche de celle proposée dans mon travail de doctorat pour la spécification d'applications de génie automatique distribué. Ces applications sont constituées de nombreux composants programmables interdépendants communiquant au travers de réseaux de terrains et ayant en règle générale leur propre unité de traitement (cas des réseaux d'automates programmables).

Dans l'article de synthèse [\[CHG 93\]](#) annexé à ce mémoire, nous présentons le résultat de ce travail notamment la présentation d'un méta modèle à la fois simple et suffisamment général pour la spécification à différents niveaux d'abstraction des entités et de leurs inter-relations pour la spécification de tels systèmes.

Suite à cette phase principalement conceptuelle, basée sur quelques prototypes expérimentaux, mes travaux se sont alors portés sur la spécification de l'architecture objet de ce qui allait devenir le futur atelier de génie d'automatisme de Schneider (actuellement commercialisé sous le nom de PL7Junior et PL7micro, comportant plus de 1 million de lignes de code C++, cf. [Document annexe Attestations, Rousseau R.](#)). De nombreux composants de cette architecture ont alors été modélisés au travers du formalisme présenté dans [\[CHG 93\]](#).

Ces travaux nous ont alors conduit à la définition du « Concept d'Automatisme » représentant la notion d'automate programmable qui est une entité autonome, proactive et communicante participant à un système intégré de production. Avec une approche semblable à celle de la notion de « Point de Vue » introduite dans l'article de synthèse référencé précédemment, nous avons alors cherché à décrire différentes facettes d'un système, tel que le diagnostic mais également celle de la simulation de systèmes automatisés.

De par la nature de ces travaux, je me suis alors tourné vers les contributions apportées par le nouveau souffle de l'intelligence artificielle distribuée et notamment le domaine des systèmes multi-agents dont les concepts généraux se rapprochent de ceux que l'on cherche à appréhender dans de tels Systèmes.

Un automate programmable industriel (API) peut alors être représenté par un Agent d'après la définition donnée par Jacques Ferber ([Ferber J., \[FER 95\]](#)) ; en effet, (1) il est capable d'agir dans l'installation par le contrôle de pré-actionneurs pilotant les parties opératives de l'installation (les actionneurs) ; (2) il peut communiquer avec d'autres API ; (3) il a un objectif à réaliser dans son temps de cycle ; (4) il possède ces propres ressources CPU et de communication qui lui permettent de percevoir son environnement (5) notamment par la possibilité de lecture de valeurs de capteurs de l'installation ; (6) il ne dispose que d'une connaissance partielle de l'installation globale ; (7) il offre des compétences et des services au travers des cartes électroniques avec lesquelles il est physiquement configuré.

Le Système Intégré de Production Distribué est alors représenté par un SMA. En effet, (1) il dispose d'un environnement constitué par l'installation de production et ces composants physiques ; (2) Il dispose d'un ensemble d'objets O passifs perçus par les agents. Ces objets sont principalement des objets capteurs et pré-actionneurs physiquement implantés dans l'installation mais ne disposant pas d'intelligence de communication propre ; (3) Il dispose d'un ensemble d'agents A qui sont les automates programmables correspondant à des entités actives du système ; (4) Il existe un ensemble de relation R entre les entités (Objets et Agents) du système, en effet si le système est conçu de manière distribuée, il existe naturellement des liens entre les données traitées par un automate et celles traitée par d'autres automates du système ; (5) Il existe un ensemble d'opérations Op permettant aux Agent API d'accéder et de transformer les valeurs des objets de type capteur ou pré-actionneur ; (6) Enfin, il existe des lois de l'univers permettant d'inscrire les modifications des objets dans le système, ces lois correspondent à l'effet produit sur les actionneurs de l'installation (perceuse, vérin...).

Ces travaux qui conduisent à concevoir un système intégré de production selon une approche agent, de par leur nature confidentielle, n'ont fait l'objet d'aucune publication scientifique. Cependant des collaborations avec le monde universitaire étaient naturellement entretenues en permanence ([cf. Document annexe Attestations Pr. Prunet F., ; Pr. Hérin D.](#)).

La simulation agent comme outil d'analyse de systèmes complexes

La conduite de ces recherches dans le cadre de laboratoires privés m'a ainsi ouvert la voie vers l'utilisation de l'approche agent comme cadre conceptuel pour la représentation de systèmes complexes hautement communicants. Par ailleurs, comme mentionné plus haut, la problématique de la simulation de tels systèmes, qui constitue une des facettes des systèmes intégrés de production, participait alors pleinement de mes préoccupations... Mes liens entretenus avec le monde universitaire m'ont alors permis d'intégrer en septembre 1996 l'équipe système multi-agents de l'Université de la Réunion dirigée par Pierre Marcenac, et dont la problématique de recherche était en parfaite concordance avec mes motivations. En effet, l'axe de recherche de cette équipe pointe sur le mariage entre complexité des systèmes et approches agents, dans le cadre de la modélisation de systèmes complexes naturels et sociaux pour les applications de simulation.

De tels systèmes font l'objet de nombreuses études afin d'appréhender leurs caractéristiques dynamiques et comprendre leur fonctionnement. Ils sont caractérisés par une grande variété d'interactions entre les entités qui les composent et, bien souvent, l'existence de phénomènes collectifs qui font apparaître des propriétés émergentes à des niveaux divers ([Costanza R. & al., \[CWF+ 93\]](#) ; [Drogoul A. & Ferber J., \[DF 94\]](#)). La simulation consiste alors à réaliser une représentation informatique d'un système et de son comportement au moyen de modèles dont les données correspondent à une image fidèle du système réel au cours du temps ; cette démarche s'avère particulièrement appropriée dès qu'un système n'est pas accessible directement à l'observation ou à la mesure, soit parce qu'il ne peut être reproduit⁷ soit qu'il ne peut pas faire l'objet d'expérimentations directes⁸ ([Conte R. & Gilbert N., \[CG 95\]](#)).

La simulation multi-agents offre un modèle informatique qui vise à représenter directement les entités, leurs comportements propres et leurs interactions. De cette manière, il devient possible d'analyser un phénomène comme le résultat d'interactions entre des entités autonomes, nommées agents. La simulation multi-agents permet de construire de véritables micro-mondes artificiels dont on peut contrôler tous les paramètres (quantitatifs ou qualitatifs) et cela à tous les niveaux du système, qu'il s'agisse de l'entité, du groupe, de la société ou au niveau des effets externes sur l'environnement. L'un des intérêts majeurs des systèmes multi-agents (SMA) tient à ce que l'on puisse expérimenter directement sur des modèles réduits de sociétés les théories ou alternatives que l'on souhaite étudier ([Calderoni R., \[CAL 02\]](#)).

A ce niveau, se posent les problèmes fondamentaux pour tout chercheur du domaine : *Quel modèle agent* pour acquérir la possibilité d'articuler et d'organiser les informations sur de tels systèmes complexes ? *Quelle architecture informatique* associer à ce modèle afin d'implanter explicitement les mécanismes agents de pro-activité, de communication, d'interactions, etc. ? Et enfin, *quelle méthodologie* adopter pour la gestion du cycle de vie complet de tels systèmes multi-agents ?

De nombreux projets de recherche s'intéressent à ces trois dimensions qui s'avèrent intimement liées ; parmi les plus aboutis on peut citer ([Ferber J. & al. \[FG 98\]](#) / [Gutknecht O., \[GUT 01\]](#) ; [Bellifemine F. & al., \[BEL 99\]](#) ; [Moulin B. & al., \[MIB 02\]](#)). Cependant, aucun d'entre eux n'a obtenu aujourd'hui un niveau de maturité suffisant et l'élaboration de systèmes multi-agents est en général délicate.

⁷ Ex. la simulation de systèmes virtuels ou de simulation prévisionnelle

⁸ Ex. la simulation de phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques

Synthèse des objectifs de recherche et résultats des travaux

De par mon expérience en méthodologie de conception de systèmes complexes, j'ai axé ma problématique de recherche sur les aspects d'ingénierie de conception de système de simulation par approche multi-agents avec une démarche d'intégration de cette technologie comme réponse à des besoins émanant de partenaires scientifiques, dans lesquels interviennent des facteurs naturels, humains et sociaux. Les SMA constituent alors une méthodologie de modélisation et de simulation pour l'aide à la validation d'hypothèses scientifiques et l'aide à la décision.

Ma démarche de travail s'est alors appuyée sur différents axes en parallèle :

(1) La prise en charge depuis 1997 de l'évolution de la plate-forme GEAMAS⁹.

Cet axe a pour objectif de permettre de mener une approche expérimentale du problème d'ingénierie de conception au travers d'applications développées dans le cadre de partenariats. Geamas, qui à la base était un noyau minimum agents, s'est ainsi enrichi de nombreuses fonctionnalités afin de devenir un véritable prototype probatoire opérationnel. Ainsi Geamas peut être assimilé à un laboratoire virtuel expérimental permettant de simuler des systèmes complexes. Ce travail a conduit à l'enrichissement du modèle agent proposé par Pierre Marcenac dans [\[MAR 97\]](#). Les extensions apportées traduisent l'évolution de notre réflexion sur la représentation des connaissances, les contraintes et les mécanismes globaux, ainsi que la représentation de certaines organisations des agents au travers notamment de la notion de *rôle dynamique*.

Cet axe d'étude a fait l'objet de 7 publications majeures : 5 articles en conférence internationale avec actes et comité de lecture [\[CM+98a\]](#) [\[CM+98b\]](#) [\[SM+98\]](#) [\[VC99\]](#) [\[AC01\]](#), une contribution à un chapitre d'ouvrage collectif national intitulé « Organisation et Applications des SMA » Ed. Hermes [\[ML02\]](#), un chapitre en ouvrage collectif international intitulé « Implementing Application Frameworks : Object-Oriented Frameworks at Work » Ed. Wiley [\[MC98\]](#).

(2) La réalisation d'expérimentations et le développement d'applications « partenaire ».

Trois formes d'expérimentation ont été menées : avec des partenaires internes à l'université, des équipes de recherche non universitaires et du monde professionnel. Ainsi, les expérimentations internes ont fait l'objet de réalisations de prototypes de systèmes de vente aux enchères avec des groupes d'étudiants de deuxième et troisième cycles. Des collaborations soutenues ont été établies avec le CIRAD Réunion sur des actions thématiques programmées pour mener des expérimentations sur des données et problèmes concrets. Le transfert Recherche/Industrie s'est concrétisé par un projet avec un grand groupe industriel réunionnais, sur lequel une thèse en convention CIFRE est en cours sous ma responsabilité sur le plan de l'encadrement scientifique.

Ce travail a fait l'objet d'un rapport scientifique CIRAD [\[CG+02b\]](#) et de 4 principales publications : 3 articles en conférence nationale avec actes et comité de lecture [\[CCL+97\]](#) [\[GCC+98a\]](#) [\[GCC+98b\]](#), une publication dans la revue internationale avec comité de lecture JASSS (Journal of Artificial Societies and Social Simulation) [\[CG+02a\]](#).

(3) La proposition de démarches méthodologiques en ingénierie de conception de SMA pour la simulation.

La philosophie de mes travaux pourrait se résumer à celle proposée par Grady Booch, qui considère qu'une application complexe qui donne de bons résultats est invariablement fondée sur une application simple qui donnait de bons résultats ([Booch G., \[BOO 91\]](#)). Cette suggestion est à la base de la méthodologie de développement en spirale ([Boehm B.W., \[BOE 86\]](#)), et mise en œuvre par notre équipe dans le contexte des systèmes multi-agents. Cette opération a conduit à la proposition de la méthode <Objectifs, Expériences, Abstraction, Application>. Notre approche repose sur deux niveaux en spirale, une « macro-spirale projet » et une « micro-spirale d'expériences ». Le modèle énonce alors un ensemble de phases de conception bien délimitées par des Points de Contrôles (CP) précis. Le but est d'enrichir, par nos différentes expériences, d'une part les possibilités d'abstraction

⁹ GEAMAS : Acronyme pour GEneric Architecture for MultiAgent Simulation

de l'architecture objet sous-jacente à GEAMAS, et d'autre part la puissance d'abstraction des mécanismes utiles pour la modélisation des connaissances des phénomènes à simuler.

Ce premier travail sur ce thème a mis en évidence certaines limites qui ont suscité de nouveaux questionnements, m'invitant à ouvrir d'autres voies de recherche au sein de l'équipe :

- Comment comprendre le fonctionnement d'un SMA constitué de centaines d'agents pro-actifs et autonomes ? En effet, on constate que les phases de validation et d'exploitation du cycle de vie d'un système multi-agents sont bien souvent dépourvues de mécanismes adaptés. Seules les traces d'événements sont exploitables. Ces traces sont alors extraites de leur contexte et de leur ensemble, elles ne portent plus les liens et les intercommunications avec l'environnement, ce qui brise la systémicité (la relation d'une partie au tout) et la multi-dimensionnalité des phénomènes produits par le système. Cette étude nous a conduit à proposer l'utilisation d'un formalisme de modélisation reposant sur un modèle théorique de graphe conceptuel et de réseau de Petri gardant la mémoire des interactions sur lequel des opérations de manipulation et d'interrogations complexes et formelles peuvent être définies.
- Comment intégrer la modélisation de la composante humaine dans de tels systèmes ? Modéliser et simuler un acteur humain participant à un système comme un agent semble être une base intéressante. Cependant, on constate que la complexité de la prise de décision propre à l'Homme implique l'utilisation de modèles cognitivistes basés sur des agents intentionnels ([Georgeff P.M. & al., \[GBM 98\]](#)) particulièrement difficiles à construire. Cette voie nous a conduit à approfondir le concept d'agent hybride à la fois réactif et cognitif, en travaillant sur une dimension issue de travaux du domaine de la psychologie comportementale de l'humain.

Ce nouvel axe d'étude de notre équipe a fait l'objet du rapport IREMIA N° 3153 [CM97] et de 8 publications : 2 articles en conférence nationale avec actes et comité de lecture [AC01] [VC02c], 5 articles en conférence internationale avec actes et comité de lecture [AC00] [VC02a] [AC02a] [VC02b] [AC02b], et une publication dans la revue *L'Objet*, Ed. Hermès [CMG98].

Chapitre 3.

Architecture, fonctionnalités et optimisation de la plate-forme expérimentale Geamas

Aspects architecturaux

Geamas est un environnement de développement générique de systèmes multi-agents basé sur le langage Java développé par l'équipe MAS2 (Multi-Agents Systems Modelling and Simulation) de l'Université de la Réunion ([Marcenac P., \[MAR 97\]](#)). Cette plate-forme est fondée sur quatre couches logicielles : Objet, Noyau, Application et Simulation. Une application multi-agents développée avec *Geamas* est implantée comme la couche *Application* de *Geamas*, à partir de laquelle les simulations sont réalisées. Une telle application est en fait une spécialisation du noyau de *Geamas* qui implante le modèle générique d'agent. Ce noyau est doté d'une interface bien définie, indispensable au développement d'applications spécifiques, au travers de trois éléments de structuration fondamentaux : le *micro-agent*, le *medium-agent* et le *macro-agent*.

A mon arrivée au sein de l'équipe MAS2, une version de la plate-forme en Smaltalk implémentait le noyau minimal de la plateforme. L'architecture de ce noyau générique permettait de valider les concepts du modèle sur des cas d'école mais ne constituait en aucune sorte les bases d'une plate-forme susceptible de jouer le rôle de laboratoire virtuel de simulation. Je me suis alors appuyé sur mon expérience de conception de logiciels afin de proposer une architecture ouverte et extensible pour *Geamas* en repensant son architecture logicielle.

Une architecture intégrant trois dimensions a ainsi   t  e conçue : *MultiAgent Systems (MAS) software design*, *MAS knowledge abstraction* et *MAS services dimension*. Chacune de ces dimensions est implémentée dans des couches logicielles modulaires avec un couplage logiciel minimum.

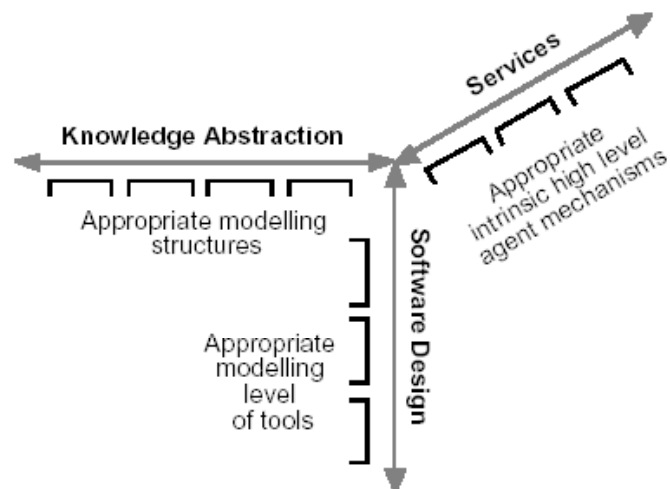


Fig. 1. Les trois dimensions conceptuelles de l'architecture de GEAMAS

Partant de la structuration en couches, chaque dimension est alors décomposée en couches de niveau plus fin. L'objectif de ce nouveau niveau de structuration vise à séparer les bibliothèques et éléments de langage informatique du modèle agent, ainsi que de la couche interface homme-machine. La figure ci-dessous illustre l'architecture obtenue.

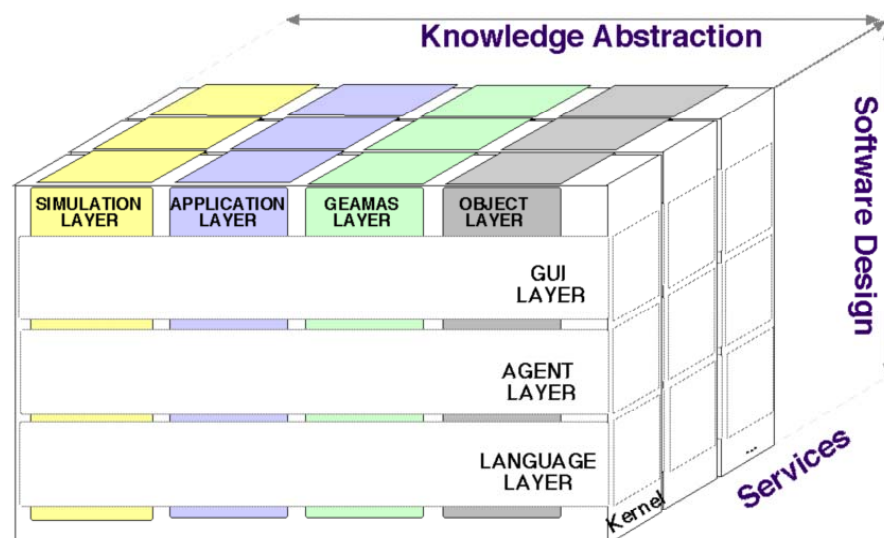


Fig. 2. L'architecture en couches de GEAMAS

Les articles « *Zooming on a multiagent simulation system: from the conceptual architecture to the interaction protocol* » et « *Experimentation with an Agent-Oriented Platform in Java* », annexés à ce mémoire, illustrent tout particulièrement l'architecture logicielle globale de la plateforme. Le premier [CM+98a] présente tout particulièrement (i) de quelle manière ces différentes dimensions peuvent contribuer à la définition d'outils adaptés pour la conception de systèmes multi-agents (ii) comment la définition de niveau d'abstraction de connaissances favorise l'implantation de modèles de traitement pour les SMA (iii) et de quelle manière la prise en compte d'une dimension *Services* autorise l'enrichissement de la plate-forme par l'intégration de concepts fournissant des services d'extension tels que l'apprentissage, la prise en compte de l'aspect multi-

environnements, etc. Cette architecture a notamment servi de base aux travaux de Jean Christophe Soulié dans le cadre d'une thèse soutenue en 2001 ([Soulé J.-C., \[SOU 01\]](#)). Le second article [[MC98](#)], couvre plus particulièrement de quelle manière la couche du noyau du système Geamas a été implantée.

Enrichissement du modèle agent de Geamas

Cet aspect concerne la couche « Geamas Layer » de l'architecture générale de Geamas. Plusieurs concepts utiles aux nouvelles expérimentations réalisées avec la plate-forme ont été introduits dans le modèle agent afin d'en augmenter les capacités de représentation des connaissances.

Le concept de rôle dans Geamas

Les besoins des applications modélisant des organisations sociales développées au sein de notre équipe, nous ont conduit à l'introduction de la notion de rôle dans la plate-forme Geamas, jusqu'alors vouée à la représentation de processus géophysiques. Comme dans le modèle Aalaadin ([Ferber J. & Gutknecht O., \[FG 98\]](#)), un rôle correspond dans Geamas à une fonction assurée par certains agents. Cette notion permet la description d'aspects fonctionnels susceptibles d'évoluer au cours du temps. Ainsi, on peut simuler dynamiquement l'évolution des rôles tenus par les agents selon des règles ou contraintes spécifiées dans le modèle (un agent peut jouer son rôle puis en changer selon certaines circonstances). Un rôle est défini par quatre éléments [[VC 99](#)] :

[Rôle=<But, Propriétés, Ressources, Etat>]

Un *But* est modélisé par la fonction de satisfaction de l'agent associé au rôle.

Une *Propriété* peut correspondre à un attribut, un comportement (méthodes permettant de réagir à des messages spécifiques au rôle), ou un rôle plus élémentaire. Elle peut être :

- *Préexistante* : lorsque l'agent doit posséder cette Propriété pour être à même de tenir le rôle considéré.
- *Dépendante* : lorsque la Propriété est attribuée temporairement à l'agent pour qu'il puisse tenir le rôle ; elle n'est utilisable que dans le cadre de ce rôle et disparaît si l'agent vient à l'abandonner.
- *Persistante* : lorsque la Propriété est conférée de manière permanente à un agent lorsqu'il joue un rôle donné ; ce type de propriété a été introduit principalement comme support de mécanismes d'apprentissage.

Une *Ressource* correspond à un objet situé ou à un agent subordonné nécessaire à l'accomplissement du rôle. De la même façon qu'une Propriété, une Ressource peut être Préexistante, Dépendante ou Persistante. Ce concept permet de prendre en compte les objets de l'environnement dans les rôles tenus par les agents.

L'*Etat* d'un agent permet de spécifier des pré-conditions pour qu'il puisse tenir un rôle donné.

Parmi les notions spécifiées dans Geamas, existe celle de hiérarchie de rôles. Elle permet de spécifier des rôles très généraux puis de les spécialiser en sous-rôles, de façon semblable aux hiérarchies d'objets. L'approche retenue permet également la construction de relations maître/esclave. Les agents maîtres peuvent distribuer des rôles à des agents subordonnés ; ces derniers peuvent solliciter un agent maître pour jouer un rôle à un instant donné. Un agent acquiert automatiquement un rôle s'il possède l'ensemble des Ressources et Propriétés nécessaires pour le tenir. S'il s'agit d'un agent subordonné, il doit d'abord solliciter l'accord de l'agent maître dont il dépend. Un agent perd son rôle dans les situations suivantes : soit il perd les Ressources ou Propriétés nécessaires, soit l'agent maître qui lui a donné le rôle décide de le lui retirer. A chaque rôle est associé une notion de *protocole* qui représente une *ontologie* permettant aux agents de communiquer et de définir dynamiquement des comportements propres en fonction des messages reçus.

Pour plus de précision, le lecteur se reportera à l'article « *A conceptual role-centered model for design of multi-agent systems* » volume 1599 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, pages 33–46 [VC 99], donné en annexe de ce mémoire.

Agents et objets situés dans Geamas

Le modèle agent, tel que défini par [MC98], offre un environnement dont l'objectif est de servir de support à la communication entre agents. Cet environnement est à la base de l'organisation sociale d'un SMA construit avec Geamas. Cette architecture atteint ses limites lorsque les entités du système participent à un environnement fortement spatialisé. La problématique retenue au sein de notre équipe étant principalement liée à la simulation de phénomènes naturels complexes dans lesquels l'espace joue un rôle important, il est alors pénalisant de rester dans une approche cognitive purement abstraite. Les principaux travaux sur le sujet relèvent du domaine de la robotique reposant sur une approche d'intelligence artificielle située (Clancey W.J.[CLA 97] ; Tschacher W., Dauwalder J.-P., [TD 99]). Un travail a alors été mené afin d'introduire cette dimension au sein de la plate-forme et d'associer une représentation spatiale à toute entité participant à l'environnement d'un SMA modélisé avec notre plate-forme.

Les entités représentées dans Geamas sont modélisées sous la forme d'agents et d'objets situés. On parle d'agent, lorsque l'entité exerce, avec une relative autonomie de décision, un pouvoir ou une action sur d'autres entités (objets situés ou autres agents). Dans le cas contraire on parle d'objet situé, même si un tel objet est capable d'imposer des contraintes à l'action des véritables agents.

Mais ces contraintes statiques sont d'un autre ordre que les relations entre agents (négociation, décision, action). Elles s'apparentent à la relation d'agrégation de type *has_a*, appelée dans Geamas *Relation de Ressource*. Ainsi, tout agent Geamas peut être associé à un objet situé lui permettant d'inscrire son action dans l'environnement. Un objet situé est donc considéré comme une entité externe à l'agent portant l'ensemble des attributs relatifs à l'environnement dans lequel il évolue.

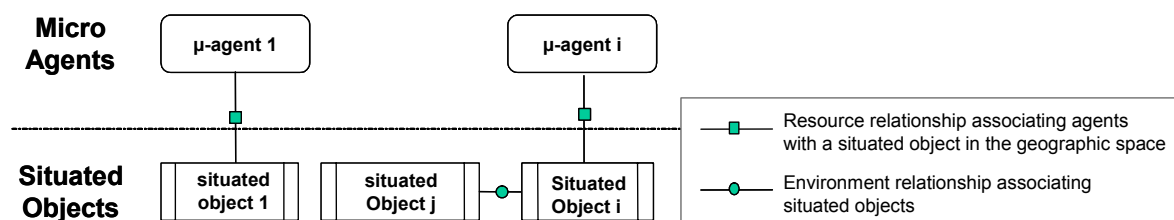


Fig. 3 Liens entre agent et objet-situé dans Geamas

La manière dont est utilisé le concept d'Objet-Situé au sein de Geamas est décrite au travers d'un exemple dans le paragraphe « *Modeling Structural Aspects in Biomass* » de l'article « *Agent-based simulation of complex systems: Application to collective management of animal wastes* ». Article annexé à ce document et publié dans la revue JASSS *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [CG+02a].

Conception de scénarios de simulation, contrôle et interprétation des résultats

Cet aspect concerne principalement les concepts introduits dans la couche « GUI Layer » de l'architecture de la plate-forme Geamas. Cette couche a pour objectif de masquer la complexité informatique de l'application modélisée et de permettre à tout utilisateur non informaticien de définir et jouer des scénarios de simulation grâce à une collection de types d'agents préalablement conçus pour cette application.

Cette couche peut être considérée comme le « laboratoire virtuel » de Geamas qui permet la création des agents, l'affectation d'objets situés aux agents et leur positionnement dans l'espace figurant l'environnement, la définition de relations d'acointance éventuelles, la saisie des valeurs des attributs par défaut. Elle permet également

l'obtention de traces de simulation textuelles et de graphiques représentant l'évolution des variables numériques, de façon globale ou locale à chaque agent.

De nombreux aspects recoupant les différents cas d'utilisation d'une telle plate-forme de simulation ont été ainsi étudiés. Ces travaux ont été menés conjointement avec des partenaires par la construction de scénarios utilisateurs établis sur la base de leur démarche de travail et résultats attendus. Ainsi, la couche *GUI Layer* de Geamas a été enrichie avec différents concepts et outils associés pour les trois étapes :

- de création de systèmes multi-agents de simulation,
- de contrôle et suivi d'une simulation,
- de validation et interprétation de résultats de simulation.

Création de systèmes multi-agents de simulation

Un environnement graphique complet a été conçu afin de permettre à un utilisateur de créer des agents et objets situés participant à une application, d'éditer les valeurs initiales de chaque agent et de construire si besoin des liens d'accointance initiaux entre éléments du système. Cette interface permet d'associer un objet-situé sur une surface géo-référencée à tout agent requérant un repérage dans l'espace.

Un interfaçage de Geamas avec des bases de données relationnelles a été réalisé. Cet outil consiste à extraire les informations de tables pertinentes afin de les exploiter dans le modèle d'agent de l'application définie dans Geamas. On peut ainsi créer automatiquement un grand nombre d'agents et d'objets situés et initialiser leurs attributs à partir de données réelles. A titre d'exemple, Biomas (cf. § [Expérimentation et transfert des résultats vers le monde professionnel](#)) fonctionne en interfaçage avec une base de données d'exploitations agricoles qui contient les résultats des enquêtes réalisées par le Cirad-Réunion depuis 1995 (environ 200 exploitations). Les aspects d'ouverture du système vers d'autres outils sont également étudiés, une première étude a été menée afin de coupler la plate-forme à des outils de type Système d'Information Géographique (cf. [figure en Annexe ; Schneider S., \[SCH98\]](#)).

Contrôle d'une simulation

Le contrôle de l'exécution d'une simulation est un point sur lequel nous avons investi de manière significative car cet aspect joue un rôle de premier plan sur les potentialités fonctionnelles de la plate-forme pour un utilisateur. En effet, il est important de pouvoir interrompre à tout moment la simulation afin d'étudier un phénomène, puis de relancer l'exécution sans mettre en cause l'intégrité des résultats fournis par la simulation. Sachant que les agents Geamas utilisent largement le temps pour gérer leur activité (se mettre en veille 2 jours en temps simulé, répondre dans un jour si...), nous avons intégré des mécanismes de gestion du temps propres à Geamas, comprenant une horloge de gestion du temps simulé, garantissant la synchronisation de l'ensemble des tâches s'exécutant concurremment dans la plate-forme au cours d'une simulation (cf. § [Contrôle et optimisation des performances de Geamas](#)).

Il est alors possible de lancer une simulation jusqu'à une date déterminée de fin, d'interrompre à tout moment la simulation, de respecter un rapport temps simulé/ temps machine (par exemple 1 heure simulée = 10ms machine) ou d'optimiser la gestion du temps en déroulant le temps plus rapidement suivant le niveau d'activité des agents. Ces caractéristiques ont permis de réduire de manière très significative (facteur 10) les durées de simulations qui rendaient, dans sa version initiale, l'utilisation du système rédhibitoire à certains partenaires pour lesquels il est nécessaire de simuler le système étudié sur de longues périodes (plusieurs années) avec un pas de simulation fin (de l'ordre de l'heure).

Suivi, validation et interprétation de résultats de simulation

Afin d'avoir différents degrés d'observation du système : macro-observation de l'état du SMA ou observation détaillée d'agents ou de groupe d'agents en interactions, nous avons introduit la définition de plusieurs niveaux de vues pour le suivi d'une simulation : vue générale agent, vue située détaillée, vue synthétique située. Des calques de visualisation permettent alors de filtrer les sorties graphiques individuelles selon le type d'agents ou de caractéristiques souhaitées. Il est possible à tout moment au travers de ces vues, de créer de nouveaux agents ou objets situés et de modifier leurs attributs, ainsi que de sauvegarder l'état instantané de la simulation.

Dans l'objectif de procéder à des interprétations visuelles rapides, il nous a également semblé intéressant dans ces différentes vues, de représenter qualitativement l'état d'un agent par le biais d'un indicateur basé sur un code de couleurs. Pour cela, les icônes représentant les agents dans l'interface de Geamas sont dotées d'une case prenant la couleur correspondant à l'état qualitatif de l'agent concerné, en se basant sur la valeur de son degré de satisfaction. La conversion numérique-symbolique s'effectue sur la base de la valeur du degré de satisfaction δ . Par exemple, les fonctions de conversions pour les agents sont par défaut : $\delta < 0.2 \rightarrow$ rouge, $0.2 \leq \delta < 0.8 \rightarrow$ orange, $\delta \geq 0.8 \rightarrow$ vert. Le noir est utilisé pour indiquer un état non significatif de l'agent. D'autre part, l'étude organisationnelle du système a été facilitée par la visualisation des réseaux d'acointances entre agents, dont l'épaisseur des arcs est pondérée par le volume de messages échangés. On peut ainsi facilement identifier les sous-ensembles d'agents en forte interaction.

Pour le suivi détaillé de l'activité d'un agent, la notion d'*inspecteur d'agent* a été introduite dans la plate-forme. Cette entité participant à la couche *GUI Layer* interagit avec un agent implanté dans la couche *Agent Layer*. L'objectif de cet inspecteur consiste à gérer et mémoriser l'ensemble des informations utiles à un utilisateur du système : état de l'agent, valeurs de données, trace des messages échangés, historique de valeurs de données pour le tracé de courbes, etc.

Lorsque la population d'agents simulée est importante (plusieurs dizaines d'agents), il est rarement possible d'analyser et d'interpréter l'ensemble des données d'une simulation en temps réel lorsque celle-ci se déroule. Ce travail d'analyse est réalisé une fois la simulation achevée. L'inspecteur d'agent permet une étude de données agent par agent par l'examen de tous les graphiques ou traces individuels ce qui est alors très insuffisant pour une compréhension globale du système. Des graphiques de représentation des résultats collectifs de simulation sont alors salutaires pour visualiser la dynamique du système au niveau de la population d'agents. L'ensemble des interactions entre agents est mémorisé au sein du système au cours de la simulation afin de servir au processus de validation du modèle et d'interprétation. Le nombre important d'interactions entre agents rend ces informations particulièrement difficiles à analyser. Il est alors important de disposer de critères autorisant à filtrer les interactions à étudier. C'est l'objectif d'une part de la notion de scénario d'interaction qui permet de repérer des enchaînements logiques d'échanges de messages et d'un outil « traceur d'interactions », développé au sein de notre plateforme, capable de prendre en compte de nombreux critères dans l'affichage des traces d'interactions entre agents (scénario, type de message, groupe d'agents, date et heure d'envoi en horaire simulé, etc.).

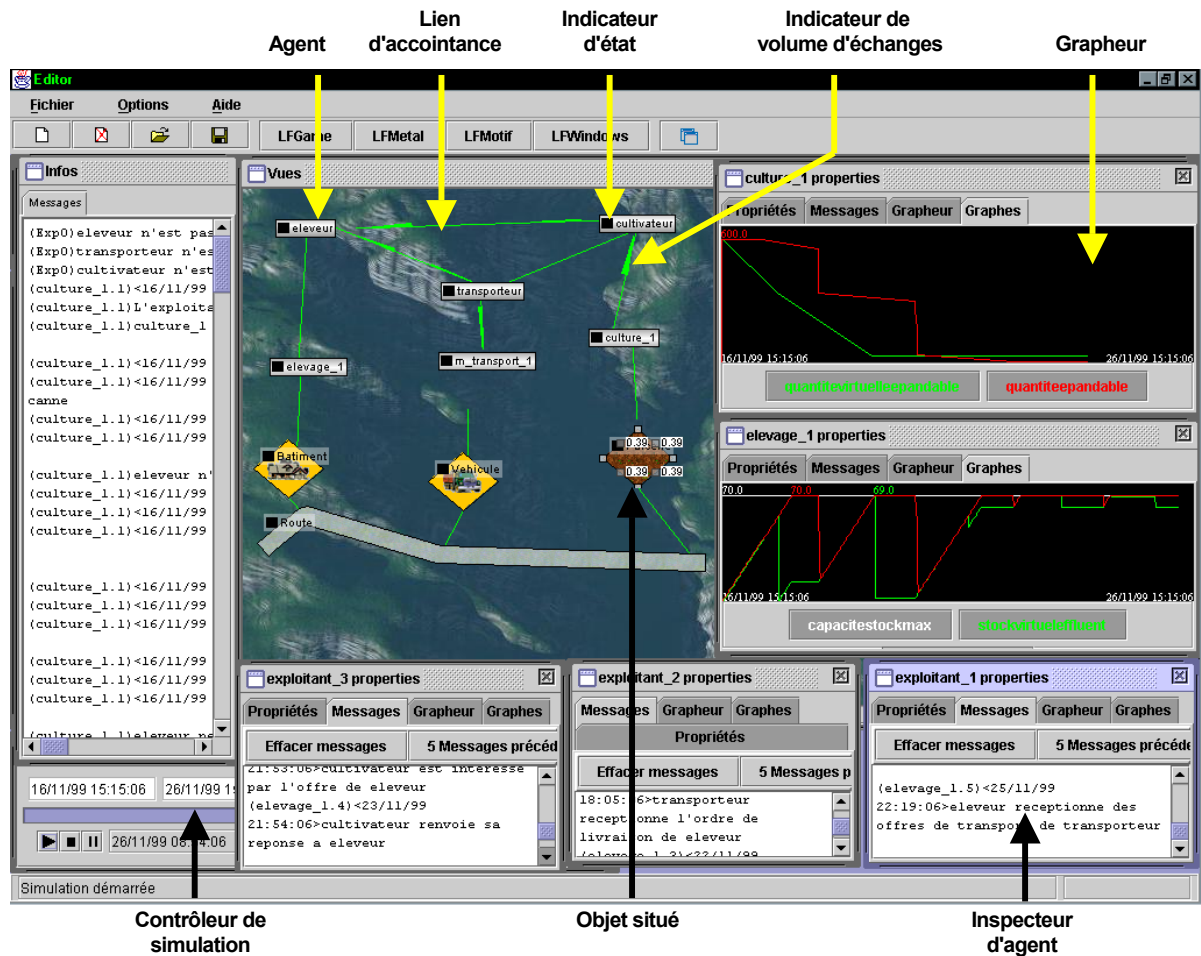


Fig. 4 Contrôle et suivi de simulation avec Geamas

En annexe, quelques compléments graphiques à ce paragraphe sont présentés. Par ailleurs, dans l'article « *Agent-based simulation of complex systems: Application to collective management of animal wastes* » [CG+02a] annexé à ce document, nous présentons l'utilisation des différents outils de contrôle et d'interprétation des résultats pour les besoins de cette application.

Contrôle et optimisation des performances de Geamas

Un agent est une entité informatique proactive qui interagit avec les autres agents constituant le SMA. Lors de son exécution, une application multi-agents composée de centaines d'agents cognitifs, nécessite alors des ressources systèmes importantes (processeur, mémoire, etc.). En effet, pour respecter au mieux la propriété de pro-activité tout agent devrait théoriquement posséder ses propres ressources processeurs afin de permettre aux différents agents d'agir et d'interagir de manière concurrente.

La distribution d'agents sur des différents processeurs au travers d'une architecture de stations de travail en réseau est l'architecture la plus adaptée et de nombreux travaux se sont intéressés à l'analyse et l'optimisation des performances de tels systèmes agents ([Bivens A. & al., \[BGH+99\]](#) ; [Muthukrishnan C.R. & Suresh T.B., \[MS 99\]](#) ; [Rana O. F., \[RAN 00\]](#) ; [Rubinstein M. G. & Duarte O. C., \[RD 99\]](#)).

Geamas est un système de simulation multi-agents conçu pour s'exécuter sur une machine, voir plusieurs stations en réseau ([cf. le chapitre Perspectives et projet de recherche](#)) mettant en relations différents SMA coopérants. Ce choix d'architecture impose que le facteur de performance soit considéré comme un aspect critique du système.

Ce travail d'optimisation, a pris d'autant plus d'importance que nous arrivions aux limites du système au travers des expérimentations sur données réelles réalisées avec l'application *Biomass*, où des pertes de messages pouvaient être constatées. Par ailleurs, la gestion mémoire laissée aux mécanismes standards des bibliothèques du langage java conduisait à des phénomènes de saturation rapide sur des stations de travail de type PC de nos partenaires.

Les points nécessitant un travail d'optimisation tout particulier sont les suivants :

- La capacité de la plate-forme à accueillir et gérer un nombre important d'agents, en considérant des approches similaires à celle utilisée dans les systèmes de temps partagé ([Ritchie D.M. & Thompson K., \[RT 78\]](#)) pour l'allocation de ressources processeur aux agents. Un paramétrage adapté au domaine de la simulation a été analysé et implanté dans la plate-forme ;
- La minimisation du temps de simulation, aspect très important pour les utilisateurs et leur motivation à utiliser notre plate-forme agent ;
- Les aspects d'optimisation de l'utilisation de la ressource mémoire notamment dans la gestion de traces et données d'analyses mémorisées par le système en cours d'exécution. Geamas fournit trois types de données pour l'utilisateur : les valeurs des propriétés des agents, les différentes interactions ayant lieu entre chaque entité du système, ainsi que les informations de paramétrage de la simulation. Toutes ces données sont mémorisées durant la simulation afin qu'une interprétation des résultats puisse être réalisée une fois la simulation terminée. Ceci nécessite des structures de stockage adaptées.

Dans l'article « *Enhancing a Multi-agent System Performance: From Implementation to Simulation Analysis* » [AC 01], nous avons montré une synthèse des choix réalisés au sein de la plate-forme afin d'améliorer ses performances en développant et discutant l'ensemble de ces points.

Chapitre 4.

Méthodologie et ingénierie de conception de SMA pour la simulation

Méthodologie et Simulation Multi-Agents

Problématique

La conception d'applications prototypes telles que Mufins ([Soulié J.-C., Guyomard D. et Desruisseaux, \[SGD 01\]](#)) ou Biomass ([cf. chapitre Expérimentation](#)) soulève des problèmes relatifs à la mise au point d'une véritable méthodologie de conception d'applications Agent. Une première approche est proposée dans le cadre de la *Foundation for Intelligent Physical Agents* (www.fipa.org/specs/fipa00001, [FIPA 00]), il ne s'agit que de spécifications préliminaires, centrées principalement sur l'interopérabilité des systèmes d'agents distribués. D'autres travaux, dont l'objectif est de définir une démarche reproductible permettant d'obtenir des résultats fiables, sont actuellement menés par de nombreux chercheurs sur les environnements de développement Agent ([El-Fallah A. & Haddad S., \[EH 96\]](#) ; [Collinot A., Ploix L. & Drogoul A., \[CDB 96\]](#) ; [Guillemet A. & al., \[GHM+ 99\]](#), [Mezura A. & al., \[MOD+ 99\]](#) ; [Ferber J. & Gutknecht O., \[FG 98\]](#)). Différents aspects sont abordés : Comment modéliser et construire un SMA ; De quelle manière manipuler les modèles en définissant des langages ou des notations graphiques adaptées ? Quelles règles de mise en œuvre doivent être utilisées ?

La faible maturité du domaine implique néanmoins que la construction d'un système multi-agents est une tâche complexe, le savoir-faire de mise en œuvre des modèles n'est pas encore clairement formulé, ce qui rend difficile la reproductibilité. Les modélisateurs sont confrontés à de nombreux problèmes récurrents : comme par exemple

« jusqu'où faut-il descendre dans le niveau individuel pour permettre à un SMA, représentatif du niveau collectif, de fonctionner ? » Le risque de dérive vers une description essentiellement fondée sur les entités du système et non sur leurs interactions est important, surtout que dans bien des situations l'on dispose d'une forte connaissance au niveau individuel et de bien peu d'éléments au niveau collectif.

Certaines approches ([Lahaie F., \[LGM+ 96\]](#)), proposent une base méthodologique adaptée pour la modélisation d'une expertise en un système multi-agents. De telles approches permettent d'implanter un système en considérant un moteur de simulation s'appuyant sur des mécanismes opératoires bien déterminés. L'originalité de notre démarche tient à l'intégration, mais surtout à la formalisation de ce cycle de conception de systèmes de simulation spécifiques, dans un cadre plus large de développement d'un outil logiciel générique.

Ceci explique que nous avons construit notre approche méthodologique sur les bases de travaux issus du génie logiciel, avec comme référence principale Grady Booch. Celui-ci considère qu'une application complexe qui donne de bons résultats est invariablement fondée sur une application simple qui donnait de bons résultats ([Booch G., \[BOO 91\]](#)). Nous nous sommes également inspirés de la méthodologie de développement en spirale proposée par B.W. Boehm, qui définit un cadre méthodologique de développement incrémental largement adopté en génie logiciel objet ([Boehm B.W., \[BOE 86\]](#)).

Cependant, deux aspects caractérisent notre contexte de travail pour lesquels de telles approches nécessitent d'être adaptées. Tout d'abord, le fait que l'ensemble des spécifications à considérer pour réaliser la simulation de phénomènes complexes est rarement connu et clairement énoncé en début de projet. En effet, il s'agit en règle générale de phénomènes en cours d'étude dans des laboratoires de recherche. Le deuxième point, porte sur le faible niveau de maturité des modèles et mécanismes opératoires des environnements de simulation par agents. Il s'agit d'un domaine de recherche où toute nouvelle application de simulation abordée oblige à affiner les mécanismes opératoires des moteurs de simulation.

Propositions et résultats

La méthodologie proposée repose sur deux niveaux en spirale, une « macro-spirale projet » et une « micro-spirale d'expériences ». La « macro-spirale projet » fait référence au cycle de développement de génie logiciel. Elle est utilisée comme un modèle de développement incrémental pour la plate-forme Geamas. Le but étant d'enrichir, par nos différentes expériences, d'une part les possibilités d'abstraction de l'architecture sous-jacente à Geamas et d'autre part la puissance d'abstraction des mécanismes utiles pour la modélisation des connaissances des phénomènes à simuler. La « micro-spirale d'expériences » quant à elle, fait référence aux méthodologies de développement utilisées en ingénierie des connaissances. Elle sert au contrôle du processus de développement de l'application à simuler.

Le cycle <Objectifs, Expériences, Abstraction, Application> de la macro-spirale projet prend naissance lorsque la connaissance de certains mécanismes d'évolution d'un système complexe peut être enrichie par simulation, avec le support de la plate-forme Geamas. Notre modèle en spirale définit alors quatre phases principales :

1. La phase « Objectifs » définit les objectifs généraux à atteindre en terme de caractéristiques fonctionnelles à supporter par la plate-forme agent et en terme de résultats attendus par le système de simulation considéré. Pour cela, cette phase intègre la définition d'un ensemble de plans d'expériences permettant de valider les prototypes probatoires et le système final.
2. La phase « Expériences » est une phase d'acquisition par raffinements successifs des connaissances relatives au système complexe étudié. Cette phase conduit au développement de prototypes probatoires très avancés du système complexe. La phase se termine lorsque les plans d'expériences peuvent être déroulés avec succès.

3. La phase « Abstraction » permet à l'équipe en charge de la plate-forme de généraliser, d'optimiser ou de mettre en évidence certains mécanismes informatiques internes à Geamas, par l'analyse des prototypes de simulation réalisés lors de la phase « Expériences ». Seuls les éléments complètement génériques au problème de la simulation par agents sont retenus dans cette phase. Les mécanismes génériques au domaine d'application considéré sont identifiés mais feront l'objet quant à eux d'un composant logiciel défini dans la phase « Application ». La phase « Abstraction » conduit à la fourniture d'une nouvelle version logicielle de Geamas.

4. Enfin, la phase « Application » correspond à l'instanciation du système complexe considéré avec la nouvelle plate-forme Geamas. Cette phase inclut une procédure de validation des résultats des séquences de simulation réalisées, ainsi que d'analyse des performances de la plate-forme de simulation.

La spirale est représentée graphiquement par la figure ci-après. Elle est divisée en quartiers, chacun d'entre eux représentant une phase du cycle. Chaque quartier ou phase de la spirale s'achève par un Point de Contrôle (CP), représenté par un losange. Un Point de Contrôle doit être validé pour passer d'une phase à une autre. Notre approche est donc basée sur une démarche récursive avec une première spirale commençant au centre d'un cercle et suivie par une série de cycles qui s'enchaînent en spirales de même centre.

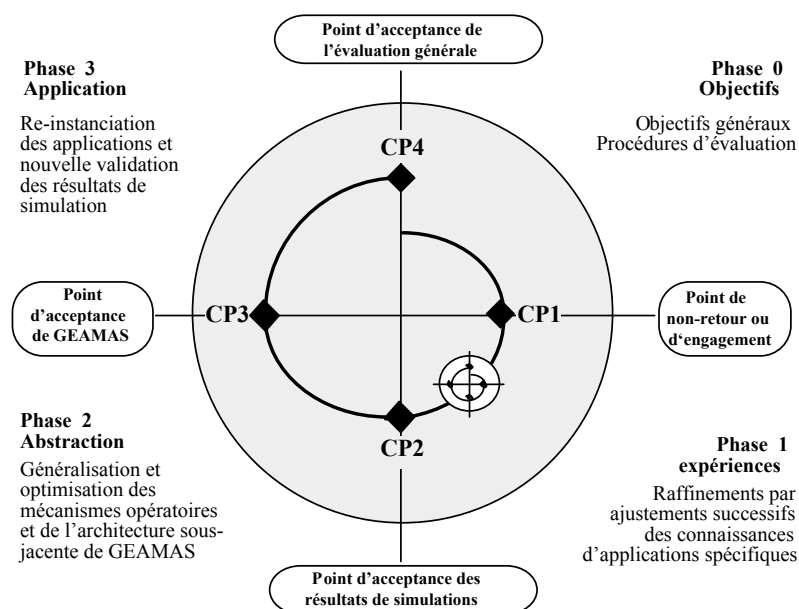


Fig. 5 Le cycle <Objectifs, Expériences, Abstraction, Application>

La micro-spirale d'expériences conduit le processus de développement de l'expérimentation avant la phase d'abstraction. Elle peut elle-même être composée de quatre étapes, suivies d'une procédure de validation respectant les plans d'expériences définis dans la phase « Objectifs » :

- Analyse du monde réel : définition du niveau d'abstraction du modèle de connaissances à produire et du niveau de granularité des connaissances nécessaires au système de simulation considéré ;
- Identification des « micro-agents » : identification de composants autonomes du monde réel, que nous modélisons ensuite par des agents. Cette étape est proche de la phase suggérée par Anne Collinot pour l'identification des comportements élémentaires dans Cassiopée ([Collinot A. & al \[CDB 96\]](#)) ;

- Définition du « macro-agent » : cette étape correspond à la description de la société d'agents. Elle décrit l'espace structurel dans lequel évoluent les micro-agents, et identifie dans cet espace des objets non-réactifs appelés « objets situés » à considérer lors des simulations ;
- Définition des « médium-agents » : d'un niveau de granularité intermédiaire, ils représentent des groupes d'agents. Les médium-agents permettent d'organiser et de distribuer la complexité des relations comportementales existantes entre les micro-agents.

Plusieurs expériences peuvent être menées dans cette phase, comme l'illustre la figure ci-dessous.

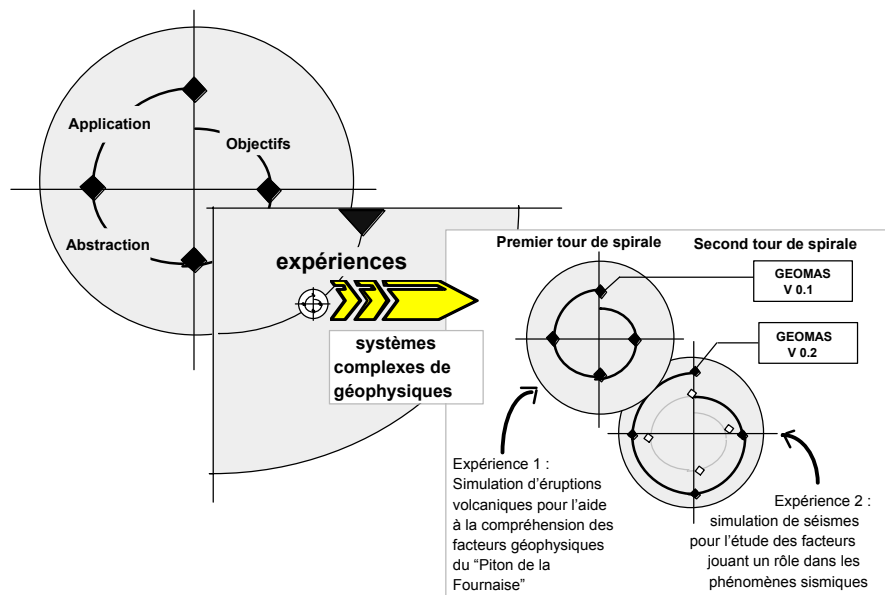


Fig. 6 La micro-spirale d'expériences

De par les nombreuses expérimentations ainsi que les tâtonnements inhérents aux mondes réels que nous avons abordés, deux éléments indispensables devaient nous conduire dans notre démarche : tout d'abord, s'astreindre à un processus de développement applicatif de qualité et ensuite disposer d'une plate-forme générique de développement évolutive.

La phase d'expérimentation permet de développer des prototypes, avec un cadre clairement défini et ceci sans se soucier de contraintes majeures de réutilisabilité. Elle libère ainsi le concepteur des aspects de généricité, ce qui est un avantage lorsque l'on aborde des mondes réels caractérisés par l'imprédictibilité et la complexité intrinsèque. De plus elle autorise un développement rapide des applications. Les expériences sont alors menées elles-mêmes suivant un cycle en spirale, jusqu'à satisfaction du partenaire. La phase abstraction est sans doute la phase qui demande le plus de travail soigné. Elle permet d'abstraire les concepts génériques d'après les expérimentations précédentes. Cette phase s'est avérée fondamentale dans notre contexte : de par notre acquis logiciel, elle nous autorise en effet aujourd'hui à aborder des domaines d'application de plus en plus variés et complexes avec notre plateforme.

Le détail de la méthodologie proposée fait l'objet de l'article « Un processus de développement en spirale pour la simulation multi-agents » publiée dans la revue l'objet [CMG 98].

Cadre formel uniforme pour la représentation des aspects statiques et dynamiques d'un SMA

Problématique

Le travail réalisé jusqu'ici en ingénierie de conception de système multi-agents, a répondu essentiellement à la phase de conception d'applications multi-agents pour la simulation. Cependant, les phases de validation et d'exploitation des résultats de simulation, dépourvues de mécanismes adaptés, posent de réelles difficultés. Comment interpréter le fonctionnement d'un SMA constitué de centaines d'agents proactifs et autonomes ? Bien souvent, seules les traces d'événements sont exploitables. Cependant celles-ci sont alors extraites de leur contexte et de leur ensemble. Elles ne portent plus les liens et les intercommunications avec l'environnement, brisant la systémicité (la relation d'une partie au tout) et la multi-dimensionnalité des phénomènes produit par le système, ce qui nuit grandement à la qualité de l'interprétation des résultats des simulations réalisées.

Ce constat nous a conduit à travailler sur la proposition d'un formalisme de modélisation de systèmes multi-agents reposant sur un modèle théorique abouti. Celui-ci supporte des opérations de manipulation complexes vérifiant sur des propriétés formelles. Notre choix s'est alors établi sur le formalisme de graphe conceptuel¹⁰ (Sowa J.F., [SOW 84]) pour la représentation des aspects descriptifs (statiques) du système à modéliser et sur le formalisme de réseau de Petri coloré¹¹ (Jensen K., [JEN 92]) gardant la mémoire des interactions et de la dynamique du système. L'ensemble s'appuie sur le modèle relationnel (Codd E., [Cod 70]) par un couplage de ces deux techniques avec les bases de données relationnelles.

Ainsi, en choisissant une stratégie de mémorisation de l'état du système dans lequel les interactions existantes sont représentées comme des données à part entière (par des jetons des réseaux de Petri), il est alors possible de définir des opérations de manipulation et d'interrogation formelles complexes. Celles-ci s'appuient au plus bas niveau sur les opérations élémentaires telles que définies dans le modèle relationnel, puis sur les opérations plus complexes vérifiant les propriétés formelles des GC et RdPC et enfin au plus haut niveau d'abstraction sur des opérations manipulant la structure du modèle Agent redéfini dans ce nouveau cadre de formalisation.

Ces opérations sont d'une part utiles à l'utilisateur pour sa compréhension des phénomènes observés lors du déroulement de simulations, ce qui répond à notre objectif premier. D'autre part, elles enrichissent la puissance de représentation des mécanismes comportementaux des agents dans la mesure où elles sont également utilisables par les agents de l'application simulée pour la sélection d'actions à réaliser en cours du déroulement d'une simulation. L'utilisation de telles opérations est alors soumise à des règles de visibilité de telle sorte qu'un agent ne puisse considérer que les données accessibles par son réseau de connectivité propre.

Propositions et résultats

Proposition d'un cadre de formalisation du modèle multi-agents appelé *AGCP-Net* au travers des formalismes GC et RdPC. Dans ce travail, nous avons montré qu'il est possible de représenter les caractéristiques propres à l'approche multi-agents à l'aide de ces deux formalismes avec à la base le paradigme d'entité issu des Graphes Conceptuels.

Couplage des modèles CG et RdPC : le modèle CGP-Net

Les RdPC étant une catégorie de Graphe Conceptuel, le couplage entre ces deux modèles se fait relativement aisément, le modèle formel résultant est le modèle GCP-Net [VC02b] :

Un tel CGP-net est un n-uplet $\mathbf{CGP}=(\mathbf{CG},\mathbf{P},\mathbf{T},\mathbf{A},\mathbf{N},\mathbf{G},\mathbf{E},\mathbf{I})$ où :

- (i) $\mathbf{CG}$ est un *Graphe Conceptuel* ;
- (ii) $\mathbf{P}$ est un ensemble fini de *places* ;
- (iii) $\mathbf{T}$ est un ensemble fini de *transitions* ;
- (iv) $\mathbf{A}$ est un ensemble fini d'*arcs* tel que : $\mathbf{P} \cap \mathbf{T} = \mathbf{P} \cap \mathbf{A} = \mathbf{T} \cap \mathbf{A} = \emptyset$;

¹⁰ Désigné par l'acronyme GC dans la suite du document

¹¹ Désigné par l'acronyme RdPC dans la suite du document

- (v) N est une fonction de nœud définie de A dans $P \times T \cup T \times P$;
- (vi) G est une fonction de garde définie de T dans l'ensemble des expressions, tel que :
 $\forall t \in T [\text{Type}(G(t))=B \ \& \ \text{Type}(\text{Var}(G(t)))=[\text{Graphe Conceptuel}]$;
- (vii) E est une fonction d'expression des arcs, définie de A dans l'ensemble des expressions, tel que :
 $\forall a \in A [\text{Type}(E(a))= \text{Graphe Conceptuel} \ \& \ \text{Type}(\text{Var}(E(a)))= \text{Graphe Conceptuel}]$;
- (viii) I est une fonction d'initialisation.

(ii)+(iii)+(iv) Les places, transitions et arcs sont décrits par des ensembles finis disjoints deux à deux.

(v) La fonction de nœud fait correspondre à chaque arc un couple composé d'un nœud source comme premier élément et d'un nœud destination comme second. Les deux nœuds doivent être de types différents (par exemple, l'un une place et l'autre une transition).

(vi) La fonction de garde G fait correspondre à chaque transition t une expression booléenne dont toutes les variables sont définies dans le graphe conceptuel.

(vii) La fonction d'expression des arcs E fait correspondre à tout arc une expression appartenant au graphe conceptuel.

Ce modèle offre les propriétés de base utiles à la représentation des mécanismes de perception/action et proaction :

- *Représentation des mécanismes de perception* : Les outils Graphes Conceptuels permettent intrinsèquement de représenter les entités structurées, ainsi que des mécanismes de perception. Un percept est alors représenté par un GC associé à un jeton circulant dans les places des réseaux de Petri du système. Les GC offrent par ailleurs des filtres sémantiques, permettant à un agent de percevoir le niveau d'information qu'il est capable d'interpréter.
- *Représentation des mécanismes d'intégration/action* : Les outils des Réseaux de Petri Colorés permettent d'intégrer les perceptions (réalisation d'une action). C'est grâce au RdPC que l'on modifie les variables décrites dans les graphes conceptuels. Ils offrent intrinsèquement des mécanismes permettant de mémoriser et contrôler les changements d'états au sein d'un agent.
- *Représentation des aspects de proactivité* : Les outils Graphes Conceptuels permettent de définir des « manques ». Les outils des Réseaux de Petri Colorés permettent la réalisation d'une action en réponse à ces manques par les arcs inhibiteurs.

Les notions d'Agent - Groupe - Rôle : Le modèle AGCP-Net

Le modèle AGCP-Net spécifie une représentation uniforme des principales entités et relations organisationnelles entrant dans la conception de systèmes multi-agents :

- *Représentation de la notion d'Agent* : Un agent est une entité conceptuelle (au sens des GC), elle même représentée par un graphe conceptuel grâce à l'utilisation des GC emboîtés. L'interface de l'agent (en tant que tout) avec les autres agents du système, est réalisée par un réseau de Petri coloré dont le rôle consiste à gérer les interactions avec l'environnement et à les répercuter dans la structure de l'agent. Un tel RdPC modifie l'état de l'agent mais peut également modifier la structure du Graphe Conceptuel représentant cet agent.
- *Représentation de la notion de Groupe* : Un groupe est une entité conceptuelle dont la structure comprend des entités *Agent*. Le système multi-agents est le groupe qui contient l'ensemble des entités *Agent* du système.
- *Représentation de la notion de Rôle* : Un rôle est représenté par un RdPC, il s'agit d'une interface particulière de l'agent avec l'environnement. Les conditions d'activation de ce réseau de Petri peuvent alors dépendre de valeurs de l'état de l'agent, mais également de la structure du graphe conceptuel qui le décrit.

Chaque entité du modèle est rigoureusement distinguée et formalisée dans ([Vally J.D., \[VALL 03\]](#)). Notamment, les relations inter-entités sont étudiées et caractérisées (relations horizontales et verticales), et les propriétés spécifiques au modèle agent sont caractérisées (proactivité, indépendance, caractère social, émergence, ...).

Prototypage

Un prototype est en cours de développement. Il s'appuie d'une part sur la librairie java « Notio » ([Southey F. & Linders J.L. \[SL 99\]](#)), pour l'implantation des mécanismes de base des graphes conceptuels et d'autre part sur la librairie « Renew » ([Kummer O. & al. \[DKW 00\]](#)), pour le support des réseaux de Petri colorés. Ces librairies ont été choisies car elles implantent le couplage avec les bases de données relationnelles. Une vue de l'interface utilisateur pour la conception d'un système multi-agents avec cet l'outil est donnée en [Annexe](#) de ce mémoire.

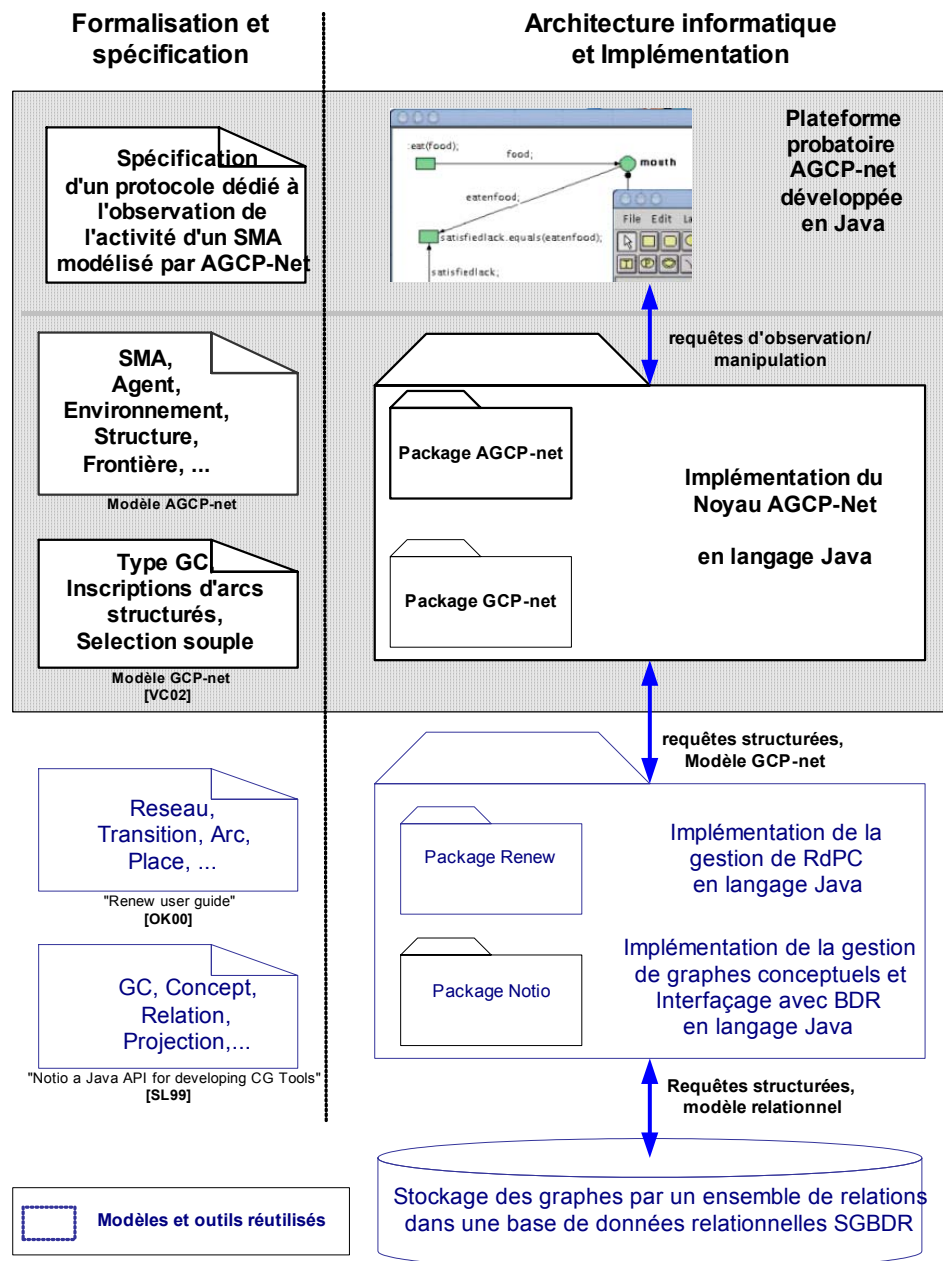


Fig. 7 Schéma organisationnel du prototype AGCP-Net

Cette étude constitue une sorte d'essai au sein de notre équipe de recherche, dont la démarche de travail a été jusqu'alors essentiellement expérimentale avec la proposition de modèles emprunts de fortes références issues du génie logiciel objet. Il s'agit dans ce projet de mesurer l'intérêt d'une toute autre approche reposant sur des modèles formels et d'étudier si une telle approche ouvre des voies de recherche nouvelles pour notre équipe. Les résultats, bien qu'encore difficiles à exploiter, notamment par le manque d'outillages logiciels intégrés dans le prototype probatoire, me semblent particulièrement prometteurs. L'une des forces de ce travail est la définition d'un cadre

théorique de modélisation multi-agents uniforme adapté à la description des aspects statiques et dynamiques d'un système. Il est alors possible de modéliser (et mémoriser) dans un formalisme bien maîtrisé sur le plan théorique, les liens d'intercommunications existants au cours du temps et au moment où les phénomènes se produisent. Ce type d'approche trouvera certainement des voies de valorisation dans les systèmes multi-agents comportant de nombreux agents et nécessitant un haut niveau de validation et de contrôle. La garantie du suivi rigoureux de l'activité du système pourrait alors s'appuyer sur des outils théoriques d'extraction d'informations basés sur des algorithmes génériques, à l'instar de ceux actuellement utilisés dans les bases de données relationnelles. Le prototype en cours de développement devrait être en mesure de supporter des opérations de manipulation et d'interrogation complexes du modèle relationnel (sélection, projection, jointure ...), des opérations propres aux GC (mémorisation et extraction de patterns) et aux RdPC (stockage et restitution de l'état du système ou de sous systèmes). Il reste à définir des opérations d'interrogation du niveau Agent (mémorisation et extraction de patterns associés au sous système propre à la représentation d'un agent, mémorisation de l'état du sous système agent, ...). Le point faible majeur de la proposition réside dans la lourdeur de modélisation imposée par l'approche qui repose sur des formalismes de relativement bas niveau. Une perspective à ce travail consisterait à proposer un langage littéral et graphique de suffisamment haut niveau afin de faciliter la description de tels systèmes.

La présente section synthétise les points clés des résultats décrits dans les articles [VC02a], [VC02b] et seront particulièrement développés dans le mémoire de Thèse de Jean-Dany Vally, doctorant que j'encadre sur le plan scientifique, actuellement en phase terminale de rédaction¹² ([Vally J., \[VAL 03\]](#)).

Vers une méthodologie de sélection des motivations pour les agents hybrides

Comment intégrer la modélisation de la composante humaine dans de tels systèmes ? Cet axe de recherche constitue une avancée logique dans la progression de travaux auxquels j'ai contribué au sein de notre équipe de recherche, travaux qui ont progressé successivement par les étapes suivantes :

- Modélisation de systèmes complexes par agents réactifs ;
- Modélisation par agents réactifs auto-adaptatifs dans le cadre des principes de l'éthologie artificielle ;
- Modélisation par agents hybrides de la composante humaine par des structures psychologiques d'ordre supérieur.

Des agents réactifs à l'éthologie artificielle

Les premiers travaux menés au sein de l'équipe se sont intéressés à la modélisation de systèmes complexes par des agents réactifs utilisant une représentation sub-symbolique du monde au travers de structures de type stimulus/actions. Cette approche nous a conduit à la construction d'applications composées de nombreux petits agents (appelés micro-agents dans notre modèle) du type automate simple mais dont les schémas interactionnels permettent de faire émerger des structures abstraites de plus haut niveau (les médium-agents). Celles-ci représentent des phénomènes observables dans le système, lui-même modélisé par un agent abstrait capable d'interagir avec l'ensemble des agents du système (le macro-agent) ([Marcenac P., \[MAR 97\]](#)). Cette approche a fait ses preuves pour la simulation de phénomènes naturels comme la simulation d'éruption volcanique du piton de la fournaise, et a servi de base à la construction de la plate-forme Geamas [CM+98a].

Si l'on considère ces phénomènes d'émergences pour les systèmes collectifs naturels et l'étude de comportements adaptatifs des animaux, tels qu'ils sont définis dans l'approche *animat* ([Pfeifer R. & al. \[PBM+98\]](#)), l'émergence représente alors des structures d'organisations collectives fonctionnelles complexes caractérisant des phénomènes d'auto-organisation ([Calderoni S., \[CAL 02\]](#)). S. Calderoni, que j'ai encadré dans la phase finale de sa thèse, a montré que sur la base de mécanismes de contrôle auto-adaptatifs, il est possible

¹² Soutenance prévue en Octobre 2003

d'utiliser ce type de systèmes multi-agents réactifs, qui n'introduit pas de structure cognitive de haut niveau (planification, raisonnement, etc.), pour la simulation de systèmes naturels et dans le domaine de la robotique.

De l'éthologie artificielle aux motivations naturelles

Considérer un acteur humain participant à un système comme un agent, est utile dans de nombreuses applications de simulation. Les systèmes de simulation de gestion collective de biomasses agricoles ou encore de simulation de géorisques causés par l'activité de l'homme en environnement tropical, nous ont confronté à cette problématique ([cf. § Expérimentations](#)).

On constate que la complexité de la prise de décision propre à l'Homme implique l'utilisation de modèles cognitivistes particulièrement difficiles à construire. Cette voie nous a conduit à approfondir le concept d'agent hybride à la fois réactif et cognitif en travaillant sur une dimension issue de travaux du domaine de la psychologie.

La faiblesse de nos structures de représentation symbolique nous a conduit à étendre notre modèle agent réactif vers la prise en compte des mécanismes mentaux qui gouvernent le comportement humain. La principale limite venait de l'absence de concepts de représentation des besoins d'anticipations qui visent à prévenir l'insatisfaction éventuelle de l'agent à plus ou moins long terme. Le second point de difficulté est dû à la complexité de représentation et de structuration des multiples règles de comportement de ce type d'agent.

Propositions et résultats

Le cadre fixé pour ce travail a été d'enrichir notre modèle agent de type réactif par la définition de structures de représentation symbolique conduisant à la définition d'un modèle agent de type hybride ([Wooldridge M. & Jennings N., \[WJ 95\]](#)). Ces agents disposent des capacités fondamentales de perception, délibération et action, définies dans les précédents travaux, couplés à des concepts nouveaux de représentation et de régulation des processus comportementaux adaptés à l'être humain. Le second élément fixé pour ce travail a été de construire notre proposition de ces concepts nouveaux à partir d'un modèle reconnu et existant en psychologie comportementale de l'humain. Le modèle de la pyramide des besoins ([Maslow A., \[MAS 00\]](#)) a été retenu.

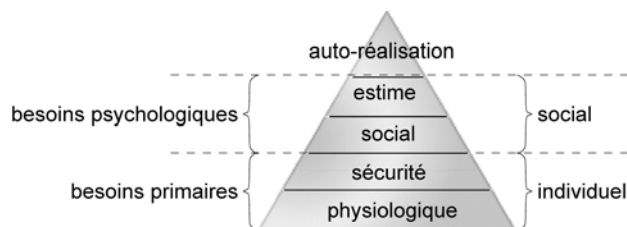


Fig. 8 La pyramide des besoins de Maslow

Nous avons alors formalisé le modèle de MASLOW par un ensemble de concepts adapté au modèle agent, puis implanté ces nouveaux concepts en enrichissant la structure du prototype probatoire de la plate-forme agent développée dans le cadre des travaux antérieurs en éthologie artificielle.

Ainsi, le modèle Maslow a été formalisé par 3 concepts fondamentaux : $MASLOW = \langle \Pi, \Omega, NIM \rangle$

- La pyramide Π : constitue le point central de départ de la motivation de l'agent sur laquelle sont répartis des besoins PN (Pyramidal Needs) de divers types : LN (Low Need), HN (High Need) et MN (Medium Need). ;

$$\Pi = \{PN\} = \{LN\} \cup \{MN\} \cup \{HN\}$$

- Le *réseau d'actions* noté Ω qui s'inspire largement de l'architecture proposée par Pattie Maes dans son système ANA pour « *Agent Network Architecture* » ([Maes P., \[MAE 91\]](#)). Ce réseau est constitué de nœuds représentant des actions (PR « primitives » ou AC actions composées) et d'arcs formés par un ensemble de connecteurs *xor*, *and*, *then* et *imp*.

$$\Omega = (\Delta, \{\text{connectors}\})$$

$$= (\{AC\} \cup \{PR\}, \{xor\} \cup \{and\} \cup \{then\} \cup \{imp\})$$

- Le moteur générique NIM pour « *Need Importance Manager* » qui pilote la sélection de motivations et d'actions. Son rôle consiste à évaluer tous les besoins situés dans Π afin de dégager le(s) besoin(s) le(s) plus important(s), c'est-à-dire ceux qui doivent être traités par l'agent. C'est derrière tout ce processus du NIM que nous retrouvons la *proactivité* de l'agent : tout au long de son cycle de vie, l'agent va essayer de satisfaire ses besoins finaux en passant par la satisfaction de ses besoins intermédiaires. Le NIM travaille d'une manière cyclique en lançant son algorithme de sélection au travers de Π et de Ω . Cet algorithme est appelé *algorithme de proactivité*.

Ce travail a donc abouti en la proposition d'un modèle agent supportant la représentation de la notion de *besoin* telle qu'elle est définie dans un modèle reconnu de la communauté de psychologie (La pyramide Π) ; la proposition d'un formalisme de représentation et de structuration établissant le lien entre le *besoin* et l'*action* considérant l'activité d'anticipation (Le réseau d'actions Ω) ; et enfin la proposition d'un algorithme générique de sélection d'actions permettant de réduire le nombre de règles de comportement devant être associé à de tels agents, notamment propres à représenter l'activité humaine (le moteur NIM).

La présente section synthétise les points clés des résultats décrits dans les articles [AC01], [AC02a] [AC02b] et le mémoire de Thèse de Fenintsoa Andriamasinoro, doctorant que j'ai encadré sur le plan scientifique ([Andriamasinoro F., \[AND 03\]](#)).

Chapitre 5.

Expérimentations et transfert des résultats vers le monde professionnel

La construction de modèles et de méthodologies passe aussi par l'expérimentation des approches théoriques sur des applications réelles ; c'est la démarche qui motive mon activité de recherche. C'est pourquoi je suis attaché à mener des collaborations avec différents partenaires. Ce chapitre présente de manière synthétique des expérimentations types, réalisées lors de mes travaux.

Simulation agent de la gestion collective d'effluents d'élevage

Chercheurs équipe concernés : Rémy Courdier, Fenintsoa Andriamasinoro.

Collaboration : CIRAD - INRA

Problématique et objectifs

La gestion des effluents d'élevage est devenue un enjeu important en raison des pollutions qu'ils peuvent engendrer. A la Réunion, un travail de recherche a été engagé par le CIRAD avec deux objectifs principaux : identifier les risques de pollution liés à l'utilisation des effluents, et proposer des solutions de valorisation de ces effluents grâce aux échanges entre exploitations avec, le cas échéant, des traitements adaptés. Les produits attendus des recherches sont de deux natures : des solutions à la valorisation agricole des déchets par les usagers et l'analyse des flux de matière organique et, de façon plus large, de biomasse, avec un raisonnement sur les transferts de fertilité.

Au niveau de l'exploitation, un modèle quantitatif a été développé par le CIRAD ([Guerrin F., \[GUE 01\]](#)), permettant de montrer l'importance de l'organisation interne (calendriers de travaux, délais, etc.) sur la valorisation des effluents. De façon complémentaire, la modélisation par système multi-agents a été envisagée pour représenter les échanges de déchets agricoles, les coûts de transfert et les négociations entre agriculteurs à l'échelle d'une localité.

Le principal objectif est donc la simulation des flux de matières organiques, d'informations et de valeurs (monétaire ou autres) entre exploitations. Le modèle permet d'effectuer des analyses permettant de répondre à des questions du type : Que se passerait-il si on regroupe tels éleveurs autour d'une même plate-forme de compostage de lisier ? Si tels éleveurs adoptent telle règle de gestion ? Le cœur du travail est la conception d'un modèle de la localité vue sous l'angle de la gestion des effluents d'élevage. A ce niveau, le processus central est un mécanisme de marché permettant le transfert de matière organique entre de nombreux producteurs et consommateurs de déchets, par l'intermédiaire de transporteurs.

Description du projet

Le SMA résultant, *Biomass*, a été développé comme une application de la plate-forme de développement Geamas. Dans *Biomass*, un territoire est vu sous l'angle de la gestion des effluents d'élevage. Il est composé d'un ensemble d'exploitations agricoles, comportant des élevages, des cultures, des moyens de transport et des unités de stockage. Eventuellement, s'y ajoutent des unités collectives de transformation des effluents (UT) fonctionnant selon divers procédés. Ces entités sont positionnées dans l'espace. Les élevages suscitent une offre de Matière Organique (MO) et les cultures une demande susceptible d'être satisfaite, sous réserve d'adéquation avec l'offre en qualité, quantité, disponibilité.

Le processus permettant de confronter les caractéristiques offre/demande et de décider d'un transfert, est appelé négociation. Toute négociation peut avoir lieu, indifféremment, à l'initiative d'un offreur ou d'un demandeur. Le transport du lieu de production (bâtiment d'élevage) vers le lieu de consommation (parcelle) ne sera effectué, une fois la décision prise, que s'il existe un transporteur dont les caractéristiques sont compatibles avec les termes du contrat conclu entre l'offreur et le demandeur (capacité à transporter les MO, disponibilité). La réalisation d'une livraison est donc aussi le résultat d'une négociation entre un fournisseur de MO et des transporteurs. *Biomass* est utilisé par exemple, pour évaluer les flux de lisier de porcs produit par l'ensemble des exploitations de certaines localités à risque de la Réunion. Dans l'hypothèse de la mise en place d'une unité de transformation collective, le système donne alors une aide pour définir les paramètres de gestion de cette unité (type de procédé, approvisionnement, destination des produits) ([Renault D. & Paillat J.-M., \[RP 99\]](#)). De tels scénarios de simulation peuvent alors mettre en œuvre plusieurs centaines d'agents cognitifs en interaction, représentant les multiples entités intervenant dans le système.

En conformité avec le modèle d'agent de Geamas, on distingue dans *Biomass* trois catégories d'agents :

- les exploitants et les entités physiques relevant du niveau Micro ;
- les groupements d'exploitants relevant du niveau Medium ;
- le système *Biomass* dans son ensemble comme Macro-agent.

Au niveau Micro, nous avons distingué deux types d'agents. Le premier est composé des agents capables de négociation (agriculteurs, transporteurs, gestionnaire d'une unité de transformation de MO) : les agents *Exploitant*. Leur fonction est définie par la composition des rôles de producteur de MO (PMO), consommateur de MO (CMO), et transporteur de MO (TMO) -- [cf. définition de la notion de rôle, Chapitre 3](#). Ces agents sont potentiellement liés par des relations d'acointance définissant leurs réseaux privilégiés pour le transfert de MO. Le deuxième type est celui des entités physiques composant une exploitation : *Culture*, *Elevage*, *Moyen* de transport, *Unité* de stockage et *Unité* de transformation. Ces agents sont subordonnés aux agents *Exploitant* : ils servent essentiellement à transmettre une alarme, répondre aux requêtes, et subir les actions des agents auxquels

ils sont assujettis. Ces agents subordonnés sont dotés de cycles comportementaux propres : cycles de production de MO, cycles culturels, cycles d'acheminement de la MO. Ces cycles sont indépendants des autres agents du système et peuvent être soumis aux influences de facteurs d'environnement, par exemple les aléas climatiques dans le cas des cultures. L'action de facteurs externes et leurs dynamiques propres vont induire des comportements chez les agents physiques échappant, en grande partie, au pilotage des agents Exploitant. Cette relative autonomie de comportement justifie leur spécification comme agents.

Au niveau Medium, nous avons défini l'agent *Groupe*, qui représente une structure collective de gestion et de transformation des effluents d'élevage des exploitants adhérents. Tout exploitant peut appartenir à un ou plusieurs groupes. Un Groupe peut imposer des contraintes à ses membres (par exemple, la livraison de certains quotas de MO à l'UT qu'il gère). Il s'agit donc bien d'un agent de niveau hiérarchique supérieur, capable d'avoir un rôle structurant, comme un commissaire-priseur de ventes aux enchères ([Bousquet F., Bakam I. & Proton H., \[BBP 98\]](#)), et pas seulement un niveau d'observation des agents situés au-dessous de lui (cf. modèle Aalaadin, ([Ferber J. & Gutknecht O., \[FG 98\]](#))).

Le cadre général étant posé, nous invitons le lecteur à se reporter à l'article « *Agent-based simulation of complex systems: Application to collective management of animal wastes* » [CG+02a], annexé à ce document. Nous décrivons précisément dans cet article les aspects structurels et comportementaux du modèle agent conçu pour cette application.

Résultats et perspectives

Le modèle Biomass que nous avons décrit, nous permet d'évaluer l'impact environnemental et agronomique de divers modes d'organisation d'un système d'exploitations agricoles autour du problème de la gestion des effluents d'élevage. Des scénarios réalistes peuvent être testés, qui pourront, à terme, constituer les bases d'un conseil adapté aux exploitants placés parfois dans des situations critiques, telles que celle qui prévaut dans la localité de Grand-Ilet à la Réunion, où le rapport entre les quantités de Matière Organique (MO) produites et les surfaces épanchables est très excessif. On peut tester ainsi l'influence de facteurs aussi divers que : la nature des cultures, les modes de gestion d'une Unité de Traitement (UT) et le procédé de transformation utilisé, les relations entre les exploitants, etc.

Cependant, certaines améliorations pourraient être introduites afin de rapprocher encore le modèle de la réalité. Nous avons défini un objet-situé de représentation de zone illégale d'épandage (Zile) unique, représentant un exutoire virtuel commun à tous les exploitants. Ce choix, s'il est admissible pour avoir un résultat synthétique global, ne permet pas de visualiser spatialement les impacts sur les zones illégales d'épandage. On pense ainsi concevoir des Ziles géographiquement situées, auxquelles seront rattachées les sous-ensembles d'exploitants concernés. Afin d'affiner les capacités de gestion des MO, on pourrait doter les agents Exploitant de capacités d'anticipation. Par exemple, en jouant sur la date au plus tôt de la période d'épandage pour tenir compte des délais de négociation et de livraison. Cette amélioration permettrait de prendre en compte la fonction de planification, essentielle dans un cadre décisionnel.

Après une phase de prototypage qui s'est déroulée au cours de l'Action Thématique Programmée CIRAD (ATP N° 99/60), le système est en cours d'expérimentation sur des cas réels identifiés dans le cadre du programme « porcherie verte » piloté conjointement par l'INRA et le CIRAD.

Gestion de ventes aux enchères avec Geamas

Problématique et objectifs

Cette application de Geamas a été conçue afin de répondre à la demande du groupe de travail *Architecture de Système Agents* (ASA) de comparaison des différentes plates-formes Multi-Agents françaises. Pour ceci, un "toy

problem" fédérateur a été choisi : la simulation de vente aux enchères par des agents. Voici le libellé exact du problème posé :

« Depuis la démocratisation de l'Internet et plus précisément du commerce électronique, les systèmes informatiques de ventes aux enchères ont acquis un regain d'intérêt conséquent. Ibazar.fr, Kelkoo.fr, Yahoo.fr et beaucoup d'autres, proposent des environnements à cet effet. Des chercheurs comme P. Maes avec le système Kasbah s'y sont d'ailleurs intéressés de manière approfondie. Dans ce problème il existe deux sortes d'agents parfaitement identifiés (les acheteurs et les vendeurs). Chaque acheteur peut avoir son propre raisonnement. Les agents acheteurs communiquent obligatoirement avec le vendeur ainsi le fonctionnement du système est naturellement distribué. Ce problème semblait donc tout à fait adapté à notre objectif. Néanmoins, afin d'aligner tout le monde sur la même ligne de départ tout en restant "Toy Problem", il nous fallait nous contraindre à l'aide de spécifications précises. Tout d'abord, notons que la vente aux enchères de type "Salle de vente" est différente de la vente de type "Internet". Dans une salle de vente, les produits sont vendus un par un tandis que sur Internet vous pouvez enchérir sur de nombreux produits simultanément. Dans une salle de ventes, l'enchère sur un produit se termine lorsque plus personne ne renchérit, tandis que sur Internet c'est à une date fixe que l'enchère s'arrête. Ces différences fondamentales impliquent notamment qu'il est possible dans une salle de vente de raisonner sur l'argent qu'il vous reste pour acheter les produits qui seront présentés, ce qui est impossible sur Internet. Nous choisirons donc l'approche "Salle de Vente" pour notre problème. »

Description du projet

L'application « Enchère » est implantée comme la couche *Application* de *Geamas*, à partir de laquelle les simulations sont réalisées. C'est également une spécialisation du noyau de *Geamas* qui plante le modèle générique d'agent de *Geamas*.

Afin de modéliser ce problème les trois couches d'agents de *Geamas* sont utilisées de la manière suivante :

Un *macro-agent* est créé pour représenter l'application de vente aux enchères, il peut également imposer des contraintes à l'ensemble des agents du système. Cet agent possède la maîtrise de l'ordonnancement des agents ainsi que la gestion du temps global. Dans le cas de cette application, le *macro-agent* « Enchère » utilise un traitement par défaut invoquant une primitive de macro-contrôle de chaque agent du SMA.

De manière à illustrer la notion de *rôle* de *Geamas* nous nous proposons de représenter la notion du vendeur qui propose un catalogue de produits et la notion d'acheteur qui peut acquérir une liste de biens par un agent de commerce désigné *AgDeCommerce*. Ce type d'agent est défini comme une entité collective ou *medium-agent* s'appuyant sur des *micro-agents* auxquels il délègue la gestion de chaque enchère, achat ou vente d'un seul bien. C'est au niveau de cet agent de commerce que s'effectue la gestion des différentes enchères. Les « propositions » des vendeurs sont donc coordonnées à ce niveau, où s'effectue la « stratégie d'achat » en fonction de la somme d'argent disponible.

Les agents *AgDeCommerce*, centraux dans la modélisation, sont ceux dont la fonction est définie par la composition des *rôles* qu'ils jouent dans la vente aux enchères : Vendeur de Biens (*VdP*), Acheteur de Biens (*AdP*). Un agent *AgDeCommerce* pourra jouer tour à tour ou simultanément chacun de ces rôles (cf. tableau ci-après).

A ces entités viennent donc s'ajouter les agents du niveau le plus bas de la hiérarchie, les *micro-agents* *gestionAchat* et *gestionVente* capables de gérer une opération d'achat ou de vente sur un seul bien. Ces *micro-agents* sont alors subordonnés aux agents *AgDeCommerce* qui les ont créés.

Les entités de type GeamasObject :

Les biens à vendre ou à acheter qui n'ont aucune autonomie relative sont représentés par l'entité « *Produit* » de type *GeamasObject*. Ils sont considérés comme des ressources pouvant être associées à des agents de type *AgDeCommerce*. Un tel agent pourra exercer les rôles *AdP* ou *VdP* en fonction de l'état des entités *GeamasObject* auxquelles il est associé.

Agents <i>AgDeCommerce</i>	Rôles		<i>GemasObjects</i>
	<i>V d P</i>	<i>AdP</i>	Soit $P=\{\text{Produits liés à l'agent}\}$
UnVendeur	X		$\exists p_i \in P$ tel que Etat $p_i = \text{"vendre"}$
UnAcheteur		X	$\exists p_i \in P$ tel que Etat $p_i = \text{"acheter"}$
UnAcheteurVendeur	X	X	$\exists p_i, p_j \in P$ tel que Etat $p_i = \text{"vendre"}$ et Etat $p_j = \text{"acheter"}$
UnSpectateur			Nul

Correspondance entre agents, rôles et GeamasObject dans L'application "Enchère"

Un agent de commerce rassemble des agents de gestion d'un achat ou d'une vente auxquels il est susceptible d'imposer certaines contraintes (p. ex. Ne pas enchérir au-delà d'une certaine somme). Un tel *AgDeCommerce* est associé à ces agents de gestion d'une vente ou d'un achat par des relations d'*acointance* définissant des réseaux d'échanges privilégiés. Un exemple simple de vue organisationnelle et structurelle du modèle *Enchère* est donné ci-dessous.

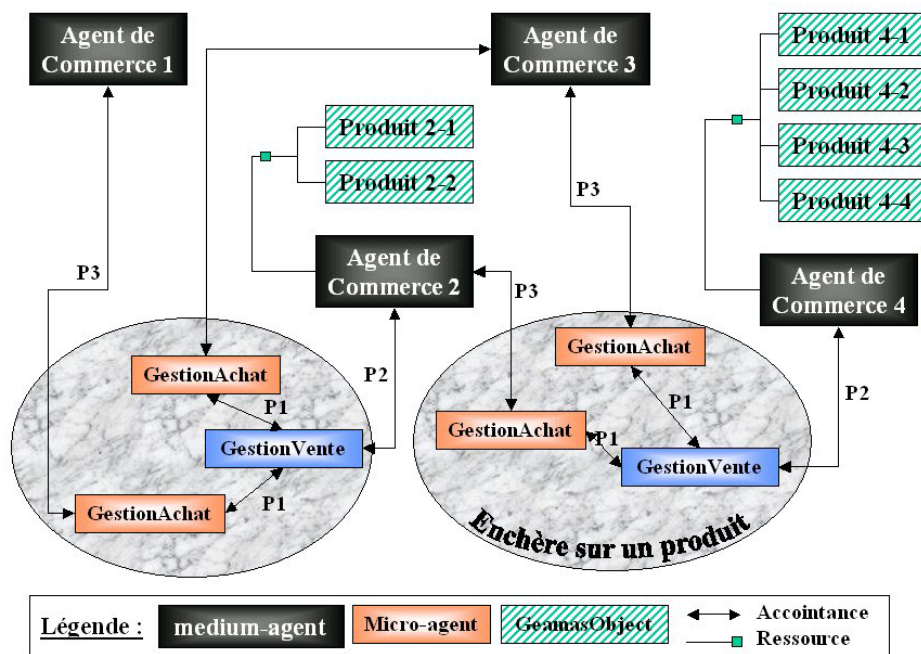


Fig. 9 Vue organisationnelle de L'application

Un agent de commerce qui souhaite mettre en vente un des biens qu'il possède, délègue pour ceci un agent de gestion de vente. Les agents de commerce souhaitant acquérir ce bien, vont de même déléguer un agent de gestion d'achat qui, après paramétrages, va négocier avec l'agent de gestion de vente afin d'essayer d'acquérir le bien en question.

On peut donc s'intéresser ensuite d'une manière plus spécifique à une « bulle de négociation » qui correspond aux interactions entre un agent de gestion de vente et plusieurs agents de gestion d'achat. Cette bulle est la bulle grisée sur le schéma. Les mécanismes d'interactions entre ces agents de gestion de négociation seront détaillés ultérieurement.

La structure précédente a été enrichie par une autre couche de médium-agents permettant de créer des groupements et de simuler ainsi des coalitions possibles entre agents de commerce.

Les Médium-Agents « Groupement » sont donc introduits dans la structure et sont supérieurs hiérarchiquement aux agents de commerce car ils peuvent leur imposer de nouvelles contraintes à respecter dans le cadre de leur appartenance à une structure de groupe.

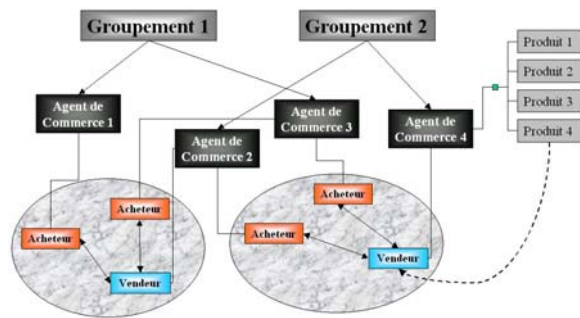


Figure 6. Agents Groupement

Les mécanismes d'interactions entre agents

Tout agent est doté d'un *protocole* lui permettant d'émettre et de percevoir des messages prédéfinis. Certains protocoles sont établis par rapport à des types d'agents. Ces protocoles seront alors reconnus par de tels agents pendant tout leur cycle de vie. D'autres protocoles sont définis dans le cadre des rôles tenus par les agents à un instant donné au sein du système. Ainsi, un même agent peut voir ces possibilités d'interactions évoluer dynamiquement en fonction des différents rôles qu'il tient au court du temps.

Cette propriété est utilisée dans l'application « *Enchère* » de façon à gérer les possibilités d'échanges d'un agent de commerce au travers des rôles Acheteur de Produits (*AdP*) et Vendeur de Produits (*VdP*).

Trois *protocoles* sont définis dans cette application (cf. tableau 1). Ces protocoles définissent les possibilités de liens possibles entre agents. Ainsi, deux agents qui n'ont pas de protocole applicable entre eux ne peuvent entretenir une relation d'accointance.

La modélisation que nous avons retenue ne met jamais directement en relation les agents de commerce entre eux. Les interactions sont établies au niveau des *micro-agents* de gestion d'achat et de vente au travers du protocole *P1*. Les deux protocoles *P2* et *P3* permettent par ailleurs aux *medium-agents* d'imposer leurs contraintes aux *micro-agents* membre du groupe (p. ex. déterminer la durée maximum allouée à l'enchère d'un produit).

Protocole <i>P1</i> : gestionVente �� gestionAchat	Protocole <i>P2</i> : Rôle VdP �� Agent gestionVente	Protocole <i>P3</i> : Rôle AdP �� Agent gestionAchat
<annonce prix> <accepte> <refuse> <offre prix >	<Dur��eMax durée> <initInforme> <stopInforme> <informe prix>	<SeuilMax prix> <LePrix prix> <Abandon> <initInforme> <stopInforme> <informe prix>

Messages échangés entre agents en fonction de leur type ou de leur rôle.

Résultats et perspectives

Au travers de cette application, nous avons validé l'aptitude des principaux concepts de modélisation et de développement offert par Geamas pour cette application : structuration en 3 niveaux d'agents, Environnement et GeamasObject, les rôles, les messages et les protocoles d'interactions dynamiques. Ce travail a donné lieu à un prototype sur lequel plusieurs expérimentations ont été faites avec les étudiants de 2  me et 3  me cycle de l'Université. Ces études ont eu pour objectif de raffiner les stratégies de négociation en tenant compte des différents paramètres pouvant entrer en compte dans le processus.

Une version Client/Serveur permettant d'utiliser la plate-forme Geamas comme un serveur multi-agents communicant avec des clients Internet est en cours d'implantation dans le cadre de ce projet. Les Rapports (Briton J., [BRI 2000] ; Dijoux L. et Perpetue L., [DP 01]) présentent l'état du prototype expérimental développé sur le sujet. Une présentation du prototype et d'éléments de code de l'application est disponible sous <http://www.univ-reunion.fr/~mas2/auction/auction.htm>.

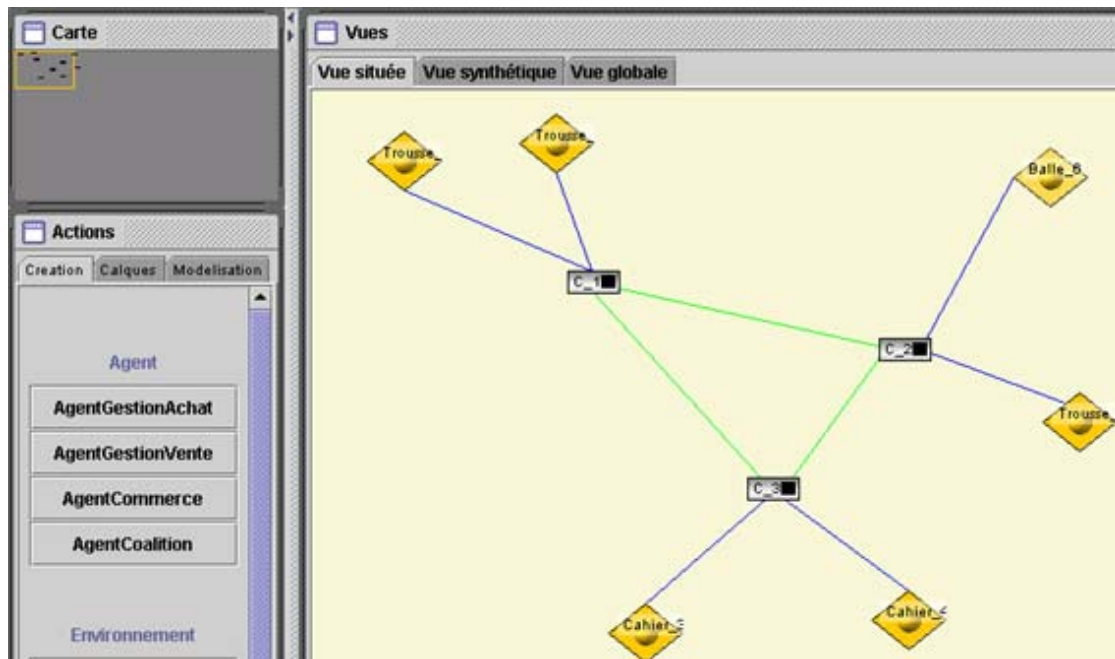


Fig. 10. Prototype de l'application *Auction* réalisé avec Geamas

Etude par simulation agents de géorisques causés par l'activité de l'homme en environnement tropical

Chercheurs concernés : Rémy Courdier, Fenintsoa Andriamasinoro.

Collaboration : Institut d'Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) de l'Université d'Antananarive, Agence universitaire de la Francophonie (AUF).

Problématique et objectifs

L'activité des hommes pratiquant largement la culture sur brûlis et la déforestation, combinée avec la structure géologique de certaines localités engendre des risques de dégradation de terres soumises à la forte érosion des climats tropicaux. Notamment à Madagascar, on constate de nombreux glissements de terrains et de formation d'effondrements, si bien que cette problématique est devenu un axe de recherche fondamental de L'Institut d'Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA).

Cette problématique est également au centre des modèles théoriques de simulations de systèmes complexes conçus par notre équipe de recherche multi-agents. Etant donné l'intérêt commun que nous portons dans la résolution de problèmes environnementaux, nous avons construit un projet de recherche intitulé « *Géorisque* » avec deux objectifs principaux : (i) modéliser ces phénomènes dans le but de mieux comprendre le mécanisme réel d'érosion des sols (fléau contre lequel les acteurs malgaches sont actuellement désarmés), (ii) identifier les sites à risques et proposer des solutions de gestions des sols limitant ces risques.

Description du projet et résultats

Cette problématique est devenue un axe de recherche fondamental de l'équipe du Laboratoire de Télédétection et Environnement de l'Institut d'Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA) qui se consacre au traitement d'images satellitaires et à l'étude de l'environnement et en particulier celle d'impacts. C'est pourquoi nous souhaitons valoriser l'utilisation de cette technologie encore peu exploitée concrètement pour le traitement de problèmes réels. En l'occurrence, un certain nombre de données traitées par le système multi-agents sera issu d'images satellitaires alors que tout un ensemble d'autres acteurs du système pourra être introduit en parallèle par

le modélisateur (troupeaux, cultures, habitations, phénomènes climatiques) avec une mise en mouvements de l'ensemble de ces acteurs afin de simuler des scénarios à risques.

La modélisation multi-agents intervient dans ce problème pour représenter les pratiques des acteurs à différents niveaux d'organisation (individuelle, collective) ou échelles géographiques (localité, région), et simuler des scénarios mettant en évidence des situations à risque pouvant se produire en fonction des caractéristiques du terrain et des conditions climatiques. Le modèle doit permettre d'effectuer des analyses de type "What-if ?" Que se passerait-il si plusieurs troupeaux de bovins continuent à passer chaque jour sur un chemin d'un terrain en pente que l'on a défriché récemment ? Sous certaines conditions climatiques y a-t'il des risques ?

En terme de résultats, ce projet en est à ses débuts et les financements ne sont pas encore disponibles. Cependant des actions de formation et de recueil de données ont déjà été menées. Ainsi, ce projet a fait l'objet de missions de formation aux techniques multi-agents au sein de notre équipe de Mme Simone Ratsivalaka et de M. Solofo Rakotondraompiana chercheurs à l'IOGA. Une semaine de formation a été également dispensée à Mme Fara Rasafy du département Forêt de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l'Université d'Antanarivo.

Une première phase d'enquête sur le terrain a été menée par les chercheurs malgaches afin de disposer de données suffisantes pour mettre en œuvre une modélisation sous forme de Système Multi-Agents. Une mission d'une quinzaine de jours à Tananarive a été réalisée comportant (i) 3 jours d'atelier pour information réciproque, formation et mise au point du travail commun (ii) 6 jours de terrain pour prise de connaissance du contexte du projet (iii) 4 jours de séance de travail pour l'étude et l'analyse des données existantes.

Suite à cette première phase, nous disposons donc d'un ensemble de mesures, résultats d'enquête, rapports d'observation sur le terrain ainsi que de données images (1994 et 2000) et divers documents cartographiques.

La modélisation réalisée fera l'objet d'une application prototype probatoire. L'objectif consiste alors à identifier les scénarios à risque puis de définir localement sur la zone concernée les actions à mener afin d'éviter que ces scénarios se produisent. A ce niveau, il y a un important travail de recherche par les géophysiciens de modélisation des interactions des différents effets conduisant à des risques de glissements ou d'effondrements localisés. Travail qui devrait constituer une contribution importante à la connaissance des facteurs géophysiques de nombreux sites de Madagascar et contribuer plus globalement à la recherche de modèles et d'outils adaptés à la simulation de risques naturels.

Intérêt scientifique et perspectives

Ce projet se situant à l'interface entre deux disciplines de recherche : la géophysique et les systèmes multi-agents, ses retombées scientifiques sont de double nature. D'une part, il permet de valoriser tout un ensemble de travaux déjà menés sur ce thème à la Réunion par notre équipe (Modélisation de risques volcaniques, de risques sismiques) en considérant de nouveaux facteurs de modélisation introduits par cette problématique :

- Confrontation de notre plate-forme agents générique à une nouvelle application. Ceci nous permet de valider nos structures informatiques de modélisation et leur niveau de généricité ;
- Prise en compte du domaine de recherche portant sur les « agents sociaux intelligents » (Socially Intelligent Agents) dans lesquels la prise en compte d'intervenants humains est primordiale, facteurs particulièrement porteurs en recherche multi-agents que nous n'avions pas considérés dans les études de modélisation géophysique citées précédemment ;
- Amélioration des capacités de notre plate-forme à gérer les données extérieures, tel le traitement d'images satellitaires qui est également un thème très prisé dans les nouveaux systèmes de traitement de connaissances spatialisées.

Cette expérimentation permet de créer de la connaissance sur les phénomènes d'érosion en milieu tropical. L'ensemble de cette connaissance peut alors constituer une expertise d'une grande richesse caractérisant l'ensemble des facteurs et des interactions entre les différentes entités intervenant dans une telle problématique. Les résultats obtenus fournissent une base théorique pour la gestion de problèmes similaires dans la zone Océan Indien notamment pour la Réunion, également soumise à un fort phénomène d'érosion des sols.

Transfert de recherche – Monde professionnel

Chercheurs concernés : Mahmoud Gangat et Rémy Courdier.

Collaboration : Groupe Bourbon - Saprim (convention CIFRE).

Problématique et objectifs

Le développement de l'approche système multi-agents dans les domaines de l'intelligence artificielle distribuée n'a aucune application industrielle à ce jour dans la Zone Océan Indien, alors que depuis plusieurs années la technologie agent est mise en œuvre dans certains types d'applications : gestion de la chaîne d'approvisionnement, planification de la production, etc. ([Shen W., Norrie D. H. \[SN 99\]](#)).

Certains travaux, comme ceux de Parunak ([Parunak V.D. \[PAR 96\]](#)), modélisent par un système multi-agents une entreprise dans son ensemble. Notre approche s'inscrit dans ce type de démarche. Notre objectif consistant à montrer les contributions possibles de l'approche système multi-agents pour modéliser et contrôler les flux des principaux processus métiers de la plus importante entreprise internationale de distribution de la zone (le Groupe Bourbon) afin d'apporter des solutions innovantes pour la surveillance, l'analyse de l'activité de cette entreprise et l'optimisation des flux d'interactions entre les acteurs et/ou applications informatiques participant à cette activité.

Description du projet

Les systèmes d'information sont de plus en plus hétérogènes, que ce soit au niveau des protocoles de réseau, des systèmes d'exploitation, des périphériques, des langages, des technologies de composants, des annuaires, des serveurs d'applications, des applications métiers, ou des bases de données. Comment alors, dans ce contexte, suivre et contrôler l'ensemble des interactions au sein de l'organisation ?

La démarche proposée dans ce projet consiste à utiliser des agents distribués pour encapsuler les applications informatiques existantes avec un double objectif. Il s'agit d'une part, de résoudre les problèmes d'interopérabilité d'applications hétérogènes car malgré les standards internationaux, l'intégration des applications communicantes dans le contexte de la zone océan indien est très difficile (utilisation d'applications « maison » notamment pour les fournisseurs, utilisation de standards différents). D'autre part, nous souhaitons mettre à profit ces agents d'interopérabilité afin de mener une activité de suivi et d'analyse de la dynamique des acteurs du système.

Ainsi, différents types d'agents sont conçus afin de gérer les problèmes d'interopérabilités d'une application dans l'organisation. Un agent a alors pour rôle d'encapsuler l'application s'exécutant sur un site informatique du groupe ainsi que de suivre l'activité de cette application particulière au sein du système globale. Un tel agent doit être capable de suivre les échanges en toute transparence, sans modifier le fonctionnement habituel de l'application.

Le système dans sa version initiale sera utilisé comme outil informatique offrant une solution souple et ouverte pour la gestion des problèmes d'interopérabilité. Dans une seconde phase, les agents seront utilisés pour des tâches simples de surveillance de données sensibles, par exemple les niveaux de stocks des magasins pour donner des alertes à différents niveaux dans l'organisation.

Enfin, nous prévoyons de doter les agents de capacités nouvelles d'aide à la gestion pour mettre en évidence des situations émergentes correspondant à des phénomènes de dysfonctionnement. Ce système devrait également permettre de mieux comprendre les schémas d'interactions qui gouvernent l'activité des différents acteurs de l'entreprise et aider à mieux anticiper les évolutions des procédures de travail automatisées à mettre en place au sein de l'organisation.

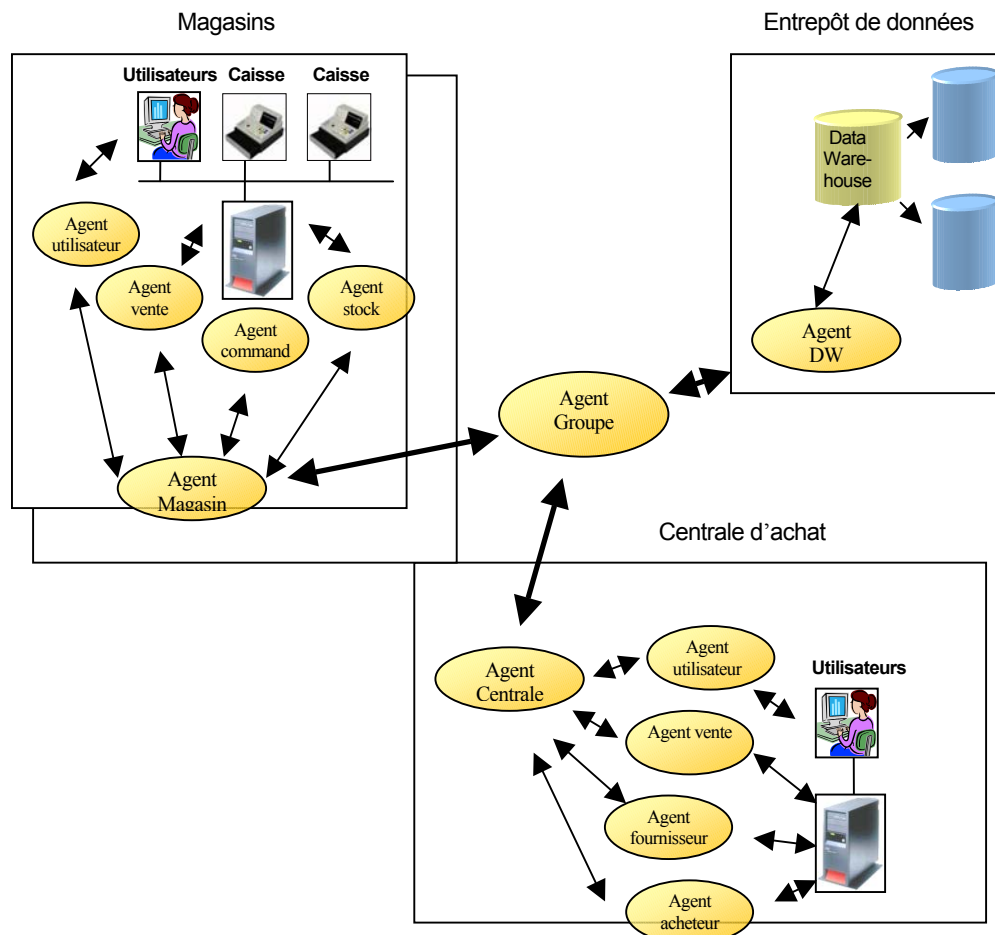


Fig. 11. Architecture fonctionnelle agent du projet

Résultats et perspectives

Ce travail qui est en phase initiale, devra constituer un apport dans le domaine des théories et des modèles de description des processus métier dans les entreprises. Un premier article est en cours de rédaction en vue d'une soumission pour les Journées Françaises en Intelligence Artificielle Distribuée et Système Multi-Agents 2003.

Les résultats de ce travail devront faire l'objet d'une validation par le développement d'un prototype probatoire de systèmes multi-agents dans l'environnement réel de l'entreprise. Le développement de l'architecture Agent pour la résolution du problème d'interopérabilité d'applications hétérogènes est commencé avec l'environnement de développement Java.

Ce projet constitue un exemple concret de validation de l'approche multi-agents dans le tissu industriel et participe au rapprochement de notre équipe de recherche universitaire avec le monde professionnel.

Chapitre 7.

Perspectives et projet de recherche

Couplage du modèle multi-agents à d'autres approches et langages de description de connaissances

Comme nous l'avons montré au travers de ce mémoire, les travaux de recherche menés pendant ces 6 dernières années ont été entièrement focalisés sur l'approche multi-agents pour la simulation de systèmes. Dans une première phase, j'ai étudié les aspects modèle et architecture de plateforme. Puis je me suis intéressé aux aspects ingénierie et méthodologie de construction avec le support d'expérimentations de constructions d'applications significatives, pour enfin revenir par le principe de boucle récursive présentée dans [CMG98] à la proposition de concepts de modélisation et de proposition d'architectures supports.

Au travers de certains projets de recherche, j'ai été amené à la construction d'une compréhension partagée de systèmes complexes, nécessitant non seulement la description de la dynamique interactionnelle et comportementale, bien supporté par l'approche agent, mais également des descriptions spatiales complexes ou des projets de couplages SMA/SIG ont été conçus (Schneider S., [SCH 98]). D'autres expériences m'ont conduit à mener des réflexions sur le couplage de modèles différents, notamment le couplage d'un modèle dynamique quantitatif avec l'approche SMA [GCC+98].

Ces travaux ont mis en évidence l'importance de pouvoir procéder à un couplage de modèles de représentation des connaissances complémentaires afin d'augmenter la capacité d'expression et de représentation des connaissances de nos outils de modélisation et simulation. Le rapprochement des équipes Système Multi-Agents (MAS²) et Valorisation des Bases de Données scientifiques (VBD) du Laboratoire IREMA au travers du Programme Pluri-Formations ETIC³ donne de nouveaux axes de réflexion pour la mise en relation des différents modèles et outils de modélisation et traitements des connaissances développés au sein de notre université. Un des objectifs les plus ambitieux étant d'abstraire un langage de description de référence permettant d'assurer une cohérence de représentation d'un système global au travers des différents modèles construits.

Il est naturellement non concevable de travailler à la définition d'un modèle unique universel. Notre approche consiste à concentrer notre effort sur des modèles complémentaires sur lesquels il existe une compétence reconnue au sein du programme ETIC³ (Environnement Tropical Insulaire, Ingénierie des Connaissances & Intelligence Collective, Information et Communication) dirigé par Noël Conruyt. L'objectif de ce programme est de produire des outils d'accompagnement à la représentation de connaissances. L'originalité de la démarche repose sur un accompagnement des chercheurs des différentes thématiques en environnement tropical insulaire, pour leur offrir un niveau d'outils de valorisation et de partage de leurs résultats de recherche. Ces outils sont répartis en différentes couches (cf. Figure 4 de l'Annexe) :

1. Outils de communication d'informations et de résultats de travaux de recherche ;
2. Outils de production, publication des données et résultats sous une forme structurée assurant une vision intégrée des différentes disciplines traitées dans le domaine tropical insulaire;
3. Outils de modélisation et de simulation de systèmes complexes interdépendants ;
4. Outils de distribution et de diffusion sur les réseaux.

Dans ce programme qui comporte de nombreux acteurs (<http://etic.univ-reunion.fr>), mon centre d'intérêt et de responsabilité se situe dans le 3^{ème} niveau d'outils à concevoir. Ce niveau comporte les mécanismes avancés de modélisation et de simulation propres à la dimension « Ingénierie des Connaissances et Intelligence Collective » du programme. Il a pour objectif de fournir des outils génériques de modélisation et de proposer des solutions conceptuelles de couplage des différents modèles adaptées au contexte thématique du programme. Enfin, il doit

conduire à la définition d'un langage de description unifié de ces modèles au travers d'une couche d'interface commune à l'ensemble des modèles proposés dans le cadre de ce projet. Ces modèles sont de trois ordres : modèle de description statique, modèle comportemental, modèle spatio-temporel, respectivement au travers des thèmes de recherche : Bases de Données (BD) & Bases de Connaissances (BC), Systèmes Multi-Agents (SMA) et Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

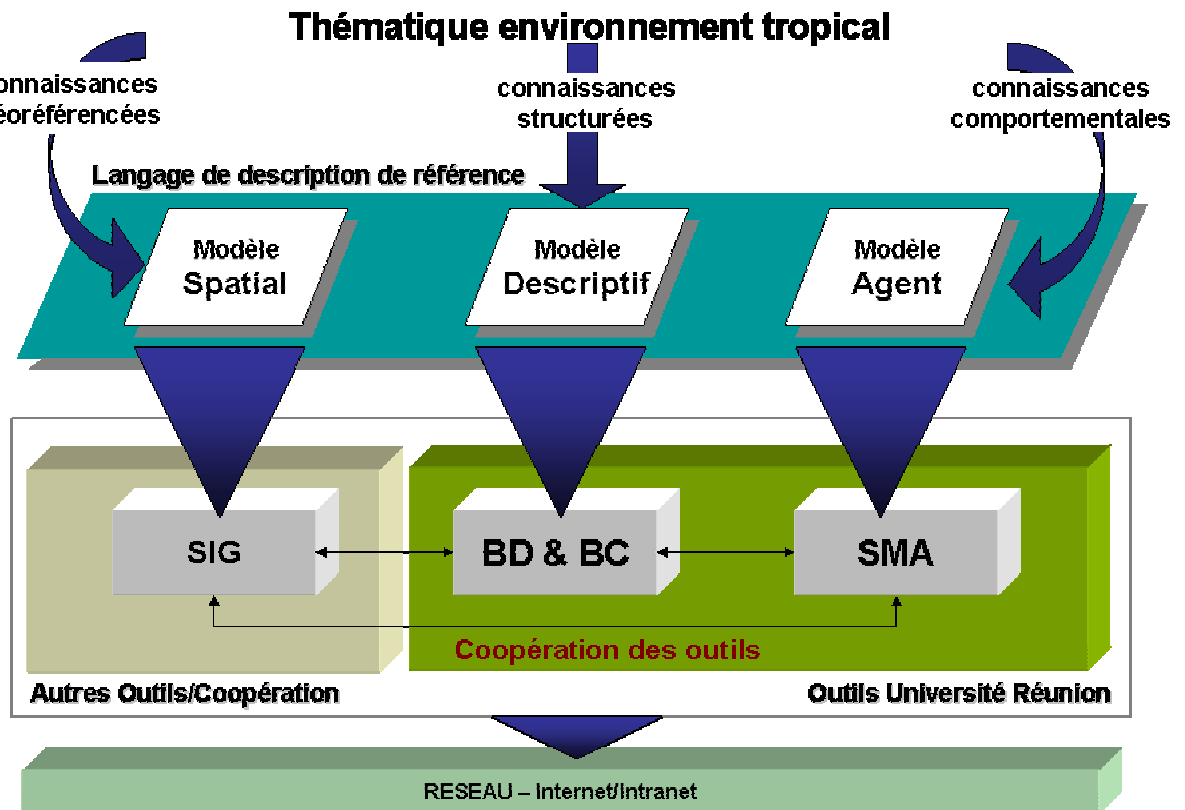


Fig. 12. Intégration des outils et modèles au sein d'une plate-forme intégrée

Architecture et approche Agent... vers la distribution et la co-construction

Comme nous l'avons souligné dans ce mémoire, nos recherches visent à proposer des cadres de conception multi-agents pour la simulation de systèmes complexes au travers d'une démarche expérimentale. Ainsi, l'expérimentation, qui constitue une grande part du travail comme support de validation des concepts proposés, révèle également les limites des solutions prototypes construites à partir de nos modèles.

Ces limites concernent l'ensemble des aspects couverts par nos travaux, qu'il s'agisse de l'architecture ou de l'ingénierie et la construction d'expérimentations. J'ai alors conduit une réflexion sur les axes qui me semblent important à développer et mettant en valeur nos compétences particulières. De tels axes doivent être également définis en accord avec les projets dans lesquels l'équipe est impliquée notamment le projet ETIC³.

Vers une architecture de distribution des SMA

Du point de vue architecture, les axes proposés sont orientés vers les aspects de construction d'architectures distribuées de systèmes multi-agents, autorisant plusieurs SMA à interagir ensemble afin d'être en mesure de composer une toile de SMA répartis sur les réseaux.

Une première expérimentation a été réalisée en utilisant le bus CORBA pour faire communiquer sur un réseau des systèmes multi-agents construits avec Geamas. Chaque SMA s'exécute alors sur une machine et la plate-forme Geamas autorise tout agent à interagir avec chacun des agents participant à un autre SMA du réseau.

Tout SMA décrit avec Geamas comporte un macro-agent et un seul, représentant l'ensemble du système et possédant la connaissance globale de son organisation. Dans la solution proposée, ce macro-agent joue le rôle d'interface de communication avec les autres SMA [CM+98a]. Seul cet agent est connu des services de nommage et de gestion des événements du bus Corba. Cette approche qui consiste à proposer une distribution des SMA sur les réseaux et non celle des Agents, comme proposée dans de nombreuses autres approches ([Chauhan D., \[CHA 97\]](#), [Nawrocki A., \[NAW 01\]](#)), permet de construire des architectures comportant de très nombreux agents. Par ailleurs, le fait que la gestion du temps, donc l'instant de prise en compte des messages par les agents, soit complètement contrôlée par la plate-forme et non par le système d'exploitation de la machine d'exécution ([cf. § Contrôle d'une simulation](#)), autorise une synchronisation simple des différents systèmes distribués.

Une publication sur ce projet est en cours de préparation. Dans ce travail, nous envisageons également la définition d'un niveau de SMA dédié à l'observation des interactions existantes entre les différents systèmes multi-agents composant l'application globale. L'arrivée d'un chercheur spécialisé dans le domaine de la qualité de service sur les réseaux au sein de l'équipe, devrait nous permettre par ailleurs de travailler les aspects de performances de ce type d'architecture.

Vers une démarche de co-construction des SMA sur les réseaux

Depuis plusieurs années, en qualité de responsable pédagogique d'une formation 3^{ème} cycle¹³, je m'intéresse aux aspects de travail collaboratif sur les réseaux [CVL+00] [COU 03]. Ces nouvelles approches de travail proposent des voies nouvelles pour aborder la conception d'applications informatiques dans lesquelles une expertise de haut niveau de spécialistes répartis dans le monde est nécessaire. La construction d'outils de simulation de systèmes complexes rentre très clairement dans cette catégorie d'applications. Les projets réalisés avec le CIRAD et l'INRA et surtout le programme ETIC³ impliquent un tel travail collaboratif de scientifiques.

Nous souhaitons proposer une démarche de conception où chacun des experts impliqués dans la simulation d'un système complexe donné, puisse modéliser la connaissance et le comportement dynamique des entités auxquelles il s'intéresse (coraux, poissons, hydres par exemple) au sein d'un système multi-agents. Chaque agent du système représente alors un objet du monde qui interagit avec l'entité à laquelle notre expert s'intéresse. Par exemple, un expert modélisant le comportement de poissons récifaux aura besoin de considérer également dans son modèle le comportement d'autres entités qu'il connaît peu (par exemple les coraux). Pour cela, il devra définir des modèles simplifiés de ces entités. Notre objectif est alors de maintenir la cohérence entre ces modèles simplifiés et un modèle de référence défini dans un SMA dédié à cette entité. Le modèle de référence pouvant alors être amené à s'enrichir en considérant les interactions nouvelles auxquelles cette entité peut être sujette. A ce niveau, une phase de travail collaboratif entre les experts sera alors nécessaire. Il convient dans un premier temps de définir un cadre et des outils permettant une telle collaboration. A partir de ces différents systèmes pouvant s'exécuter indépendamment, l'objectif est alors d'être en mesure de composer des systèmes plus globaux, qui intègrent des éléments issus des différents SMA de simulation ainsi définis. Il serait alors possible à terme, de disposer d'outils permettant la simulation de l'écosystème récifal de l'île de la Réunion dans son ensemble.

Nous avons imaginé le principe de co-construction collaborative de SMA au travers de l'exemple de l'écosystème récifal. Cette approche est cependant applicable de façon générale aux applications de simulation multi-agents. Les questions qui se posent sont les suivantes : Comment importer / partager / composer / interconnecter les modèles agents des différents systèmes ? Une approche collaborative de co-construction de modèles peut-elle

¹³ Diplôme d'Enseignement Supérieur Spécialisé Réseau-Multimédia-Internet de l'Université de la Réunion
www.univ-reunion.fr/srmi

faciliter la définition de ces mécanismes ? L'architecture de distribution des SMA présentée ci-avant peut-elle contribuer à la construction d'une telle approche en interconnectant les différents systèmes sur le réseau ? Cette réflexion est proposée dans un sujet de thèse pour lequel une demande de financement a été déposée.

Renforcement des liens nationaux et internationaux

L'équipe de recherche MAS² a, depuis sa création, maintenu des liens étroits avec les instituts de recherche locaux, notamment le CIRAD, l'IFREMER, et l'IRD¹⁴. Comme j'ai pu le souligner, dans le chapitre « expérimentation », j'ai conforté ce lien en participant activement à un projet de recherche programmé sur plusieurs années avec le CIRAD Réunion. La qualité des travaux réalisés, a permis d'établir la confiance en notre savoir-faire, ainsi un nouveau projet, prolongeant les travaux menés précédemment, commence dans le cadre d'un Groupement d'Intérêts Scientifiques co-piloté par l'INRA et le CIRAD ([Médoc J.-M., \[MED 03\]](#)). Par ailleurs, je suis partie prenante du programme MAEVA spécifié par Jean Pierre Muller du CIRAD Montpellier, programme qui réunit de nombreux partenaires et s'intéresse à la construction d'un modèle conceptuel de référence pour la gestion de la ressource foncière à la Réunion ([Muller J.P., \[MUL 02\]](#)).

Malgré son isolement géographique, l'équipe MAS² de l'Université de la Réunion a également maintenu des liens entretenus avec la communauté SMA métropolitaine et francophone. Ma participation au comité de programme des Journées Francophones d'Intelligence Artificielle et Système Multi-Agents permet de consolider ce lien avec cette communauté. De même, grâce à mon adhésion aux groupes de travail ASA et MIMOSA, je participe aux divers échanges et projets établis dans ces groupes de travail. Ces liens nous permettent de participer pleinement au réseau de chercheurs sur le domaine. L'objectif est maintenant de dynamiser ces relations par une politique d'accueil régulier des membres de ce réseau pour des périodes de plusieurs mois au sein de l'équipe. Quelques projets de ce type sont en cours de préparation.

Notre positionnement dans l'espace Indo-Océanique m'a permis également de nouer des relations privilégiées avec les chercheurs malgaches et mauriciens. J'ai monté un programme de formation et de recherche multi-agents pour des membres de l'Ecole Nationale d'Informatique de Fianarantsoa et plus récemment avec l'Institut d'Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA). Depuis 2001, j'ai initié une collaboration avec l'Indian Institut of Information Technology de la technopole de Bangalore (Inde). Cette relation purement liée à l'activité d'enseignement est en passe de se conforter au travers de l'activité de recherche. En effet, un montage est en cours avec J.-D. Vally, doctorant que j'encadre dans l'équipe MAS² et l'[Indian Institut of Sciences](#)¹⁵, afin d'expérimenter l'approche Agent dans la résolution de problèmes dans le domaine de la bio-informatique.

La qualité de notre recherche tient de la valeur du travail mené. Ce niveau de qualité est à confronter en permanence avec les résultats des nombreuses équipes de chercheurs de notre communauté. Pour cela, il est essentiel de faire partie des grands réseaux d'échanges. Le dynamisme affiché de l'Université de la Réunion dans l'espace Indo-Océanique¹⁶, associé aux nombreux contacts établis dans cet espace géographique par mes différents projets de collaboration, devrait me permettre, dans les années à venir, de conforter le rôle de l'équipe de recherche à laquelle j'appartiens, comme acteur de liaison privilégié entre les chercheurs de la thématique Multi-Agents de la Zone Océan Indien et la communauté francophone.

¹⁴ IRD : Institut de Recherche pour le Développement

¹⁵ L'un des Instituts scientifiques, purement à vocation de recherche, des plus reconnus d'Inde <http://www.iisc.ernet.in>

¹⁶ Conclusions des Assises de la Recherche de la Zone Océan Indien organisées en mai 2003 à la Réunion

Références¹⁷

- [ADE 82] ADEPA, GEMMA : Guide d'étude des modes de marches et d'arrêt, Cepadues Editions, 1982.
- [AND 03] Andriamasinoro F., Proposition d'un modèle d'agents hybrides basé sur la motivation naturelle, Thèse de doctorat, Université de la Réunion, août 2003 (à paraître).
- [BBP 98] Bousquet F., Bakam I., and H. Proton, Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In IEA-AIE-98 Conf., session AI modelling and simulation of ecological/environmental systems, pages 826–837, Castellon, Spain, June 1-4 1998.
- [BCT 02] Bourjot C., Chevrier V., Thomas V., How social spiders inspired an approach to region detection. AAMAS 2002, pp. 426-433, 2002.
- [BGH+99] Bivens A., Gao L., Hulber M. F. and Szymanski B. K. Agent-Based Network Monitoring, In Proceedings of 3rd International Conference on Autonomous Agents, 1999.
- [BOE 89] Boehm B.W., BELZ F.C., « Applying Programming to the Spiral Model. », Special Issue of the ACM SIGSoft Software Engineering Notes, 14-4, pp. 46-56, June 1989.
- [BOO 91] Booch G., Object-Oriented Design with Application — Redwood City, CA: Benjamin/Cummings, 1991.
- [BPR 00] Bellifemine F., Poggi A., Rimassa G., Developing Multi-agent Systems with JADE, ATAL 2000, 89-103, 2000.
- [BRI 89] Briot J.-P., « Actalk: a testbed for classifying and designing actor languages in the smalltalk-80 environment », Proceedings of ECCOP'89, Cambridge, England, 1989.
- [BRI 00] Briton J., Systèmes Multi-Agents : Simulation de vente aux enchères et de protocoles de négociation, Rapport de stage de Maîtrise, Institut des Mathématiques Appliquées d'Angers, 2000.
- [CAL 02] Calderoni S., Ethologie Artificielle et Contrôle Auto-Adaptatif dans les Systèmes d'Agents Réactifs, Thèse de doctorat, Université de la Réunion, septembre 2002.
- [CHA 97] Chauhan D., A Java-ased Agent Framework for Multi-agent Systems Development and Implementation, Thèse de doctorat, Université de Cincinnati, juillet 1997.
- [CJM 01] Chaib-draa B., Jarras I., Moulin B., Systèmes multiagents : Principes généraux et applications, dans *Agent et Systèmes multiagents*, J.P. Briot et Yves Demazeau, ed. Hermes, 2001.
- [CG 95] Conte R. and Gilbert N., Introduction: computer simulation for social theory. In Artificial societies – The computer simulation of social life, pages 1–18. UCL Press, London, UK, 1995.
- [CLA 97] Clancey W.J., Situated cognition, On human knowledge and computer representation, Cambridge University Press, 1997.
- [CDB 96] Collinot A., Drogoul A., Benhamou P., Agent-oriented design of a robotic soccer team, In Proceedings of ICMAS'96, Kyoto, Japan, December 1996.
- [COD 70] Codd E., A Relational Model of Data for larged Shared Data Banks, Communication ACM, vol.13, n° 6, pp 377-387, 1970.
- [CWF+ 93] Costanza R., Wainger L., Folk C., and Maler K.G., Modeling complex ecological economic systems: toward an evolutionary dynamic understanding of humans and nature. Bioscience, 43(8), pages 545–555, 1993.
- [DIC 77] DICKOVER M.E., Software design with SADT, ACM Seattle, pp 99-114, 1977.
- [DP 02] Dijoux L., Perpetue L., Mise en œuvre d'un système multi-agents au travers d'un cas d'utilisation :

¹⁷ A l'exclusion de mes références personnelles qui sont dans le Curriculum Vitae en début de mémoire

- Les enchères sur Internet, Travaux d'Etude et de Recherche (TER) de Maîtrise Informatique, Université de la Réunion, 2002.
- [DF 94] Drogoul A. and Ferber J., Multi-agent simulation as a tool for modeling societies: application to social differentiation in ant colonies. *Artificial Social Systems*, 830(8), pages 3–23, 1994.
- [EF 91] Erceau J., Ferber J., L'intelligence artificielle distribuée, *La recherche*, Vol 22, N° 233, pp 750-758, juin 1991.
- [EH 96] El-Fallah-Seghrouchni A. and Haddad S. (1996), A recursive model for distributed planning. In *ICMAS'96, Int. Conf. on Multi-Agent Systems*, Kyoto, Japan, June 1996.
- [FER 95] Ferber J., *Les Systèmes Multi-Agents, vers une intelligence collective*, — collection iia, Inter-éditions, 1995.
- [FG 98] Ferber J. and Gutknecht O. (1998), A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agents systems. In *ICMAS'98, Int. Conf. on Multi- Agents Systems*, pages 128–135, Paris, F, IEEE Computer Soc. Press, July 1998.
- [FIPA 00] Foundation for Intelligent Physical Agents, Fipa abstract architecture specification. Preliminary version, Foundation for Intelligent Physical Agents. www.fipa.org/specs/fipa00001, novembre 2000.
- [FOX 88] Fox. M.-S., An organizational view of distributed systems. In *Readings in distributed artificial intelligence*, pages 140–150. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1988.
- [GB 99] Guessoum Z. and Briot J.P., From active objects to autonomous agents. *IEEE Concurrency*, 7(3), pages 68–78, 1999.
- [GBM+ 98] Georgeff P. M., Barney Pell, Martha E. Pollack, Milind Tambe, Michael Wooldridge: The Belief-Desire-Intention Model of Agency. *Lecture Notes in Computer Science 1555* Springer 1999, ISBN 3-540-65713-4, pages 1-10, 1998
- [GHM+ 99] Guillemet A., Hak G., Meurisse T., Briot J.-P., and Lhullier M. (1999), Mise en œuvre d'une approche componentielle pour la conception d'agents. In M.-P. Gleizes and P. Marcenac, editors, *JFIADSMA'99, Ingénierie des systèmes multi-agents*, pages 53–66, St Gilles, La Réunion, Hermès Science Publ, novembre 1999
- [GRE 85] GREPA : Le Grafcet. De nouveaux concepts. Cepadues Editions, 1985.
- [GUE 01] Guerrin F., Magma: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33:35–54., 2001.
- [GUT 01] Gutknecht O., Proposition d'un modèle générique de systèmes multi-agents, mémoire de these de doctorat, Université de Montpellier II, juillet 2001.
- [JEN 92] Jensen K., Coloured Petri Nets -- Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Vol. 1: Basic Concepts., *EATCS Monographs in Theoretical Computer Science*, pp. 1–234., 1992
- [KWM 00] Kummer O., Wienberg F., Duvigneau M., Renew - User Guide, Technical report University of Hamburg, 2000.
- [LGM+ 96] Lahaie F., Grasso J.R., Marcenac P., and Giroux S. 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, Géophysique interne*, France, 830(II.a), pages 569–574, 1996.
- [LHU 98] Lhuillier M., Une approche à base de composants logiciels pour la conception d'agents. PhD thesis, Université Paris VI, Paris, France, 1998.
- [MAE 91] Maes P., A Bottom-Up Mechanism for Action Selection in an Artificial Creature. From Animals to Animats: Proceedings of the Adaptive Behavior Conference '91, edited by S. Wilson and J. Arcady-Meyer, MIT Press, February, 1991

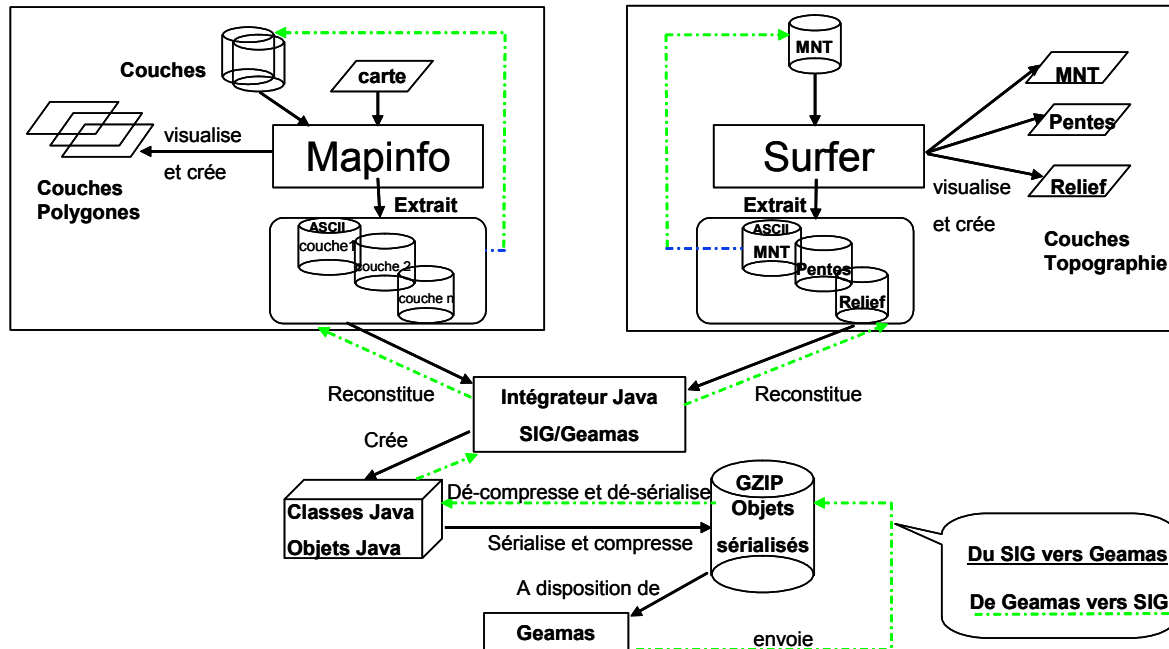
- [MAR 97] Marcenac P., Modélisation et Simulation Par Agents, Application aux systèmes complexes, Habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 1997.
- [MAS 00] Maslow A., The Maslow business reader. Collins Deborah, ed. S. Wiley& Sons Inc., 320 pages, 2000.
- [MED 03] Médoc J.-M., 2002. Utilisation de modèles de simulation pour la gestion individuelle et collective des effluents d'élevage porcin – Application au cas de Grand-Ilet (Ile de la Réunion). Réponse à l'appel d'offre du Programme « Porcherie verte », Inra. Cirad, La Réunion, 12 p., (Proposition acceptée), 2002.
- [MIB+02] Moulin B., Irandoust H., Bélanger M., Desbordes G., Explanation and Argumentation Capabilities: Towards the Creation of More Persuasive Agents, Artificial Intelligence Review, Volume 17, N° 3, pp. 169-222, mai 2002.
- [MOD+99] Mezura C., Occello M., Demazeau Y., and Baeijs C. (1999), Récursivité dans les systèmes multi-agents : vers un modèle opérationnel. In M.-P. Gleizes and P. Marcenac, editors, JFIADSMA'99, Ingénierie des systèmes multi-agents, pages 41–52, St Gilles, La Réunion,. Hermès Science Publ, novembre 1999.
- [MPL+ 01] Martin M., Piquet E., Lepage C., Guerrin F. (2001), MagmaS: a multi-agents system based on dynamical models coupling; application to animal wastes management. ESS'01, 13th European Simulation Symposium and Exhibition, Special Workshop on Multi-agent based Modeling and Simulation in Industry and Environment, Marseilles (F), octobre 2001.
- [MS 99] Muthukrishnan C.R. and Suresh T.B. A multi-Agent Approach to Distributed Computing. In Proceedings of 3rd International Conference on Autonomous Agents, 1999.
- [MUL 02] Muller J.-P., Spécification du projet de recherche et Innovation MAEVA, Document CIRAD, octobre 2002.
- [NAW 01] Nawrocki A., Développement et Déploiement de Systèmes Multi-Agents Voyelles, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble , 2001.
- [PAIL 98] Paillat J.-M., Gestion des effluents d'élevage à la Réunion : transformer la nuisance en fertilité. Rapport final 20/98, Cirad Tera/Ere, La Réunion, 1998. Programme de recherche Cordet 94 DA 51, 1998.
- [PAR 96] Parunak V.D., Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry, Industrial Technology Institute, 1996.
- [PBM+98] Pfeifer R., Blumberg B., Meyer J.-A., Wilson S., From Animals to Animats, Proceeding of the Fifth International, Conference on simulation of Adaptative Behavior, Zurich, Suisse, International Society for Adaptative Behavior, Bradford Book, MIT Press, août 1998.
- [RAN 00] Rana O. F.. Performance Management of Mobile Agent Systems. In Proceedings of 4th International Conference on Autonomous Agents, 2000.
- [RD 99] Rubinstein M. G. and Duarte O. C., Evaluating TradeOffs of Mobile Agents in Performance Management in Mobile Agents. In Networking and Information Systems, 1999.
- [RP 99] Renault D. and Paillat J.-M., Analyse de la production et de l'utilisation des effluents porcins à Grand-Ilet, localité de l'île de la Réunion (cirque de Salazie). Rapport 16/99, Cirad Tera/Ere, La Réunion, 1999.
- [RT 78] Ritchie D.M. and Thompson K. The Unix Time-Sharing System. In The Bell System Technical Journal 57 no. 6, part 2, 1978.
- [SCH 98] Schneider S., Couplage SIG/Geamas, rapport de TER, mémoire de maîtrise d'informatique, Iremia, Université de La Réunion, 52 p, mai 1998.
- [SGD 01] Soulié J.-C., Guyomard D. et Desruisseaux M., MUFINS: a Multiagent Toolkit for Simulating Pelagic Fish Behavior in Distributed Multiple Environments, Proceedings of the 13th European

- Simulation Symposium, pp. 885-890, Marseille, France, SCS Europe Bvba Publisher, Octobre 2001.
- [SN 99] Shen W., Norrie D. H., Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing : A State-of-the-Art Survey, Knowledge and Information Systems, 1999.
- [SOU 01] Soulié J.-C., Vers une approche multi-environnements pour les agents, Thèse de doctorat, Université de la Réunion, décembre 2001.
- [SL 99] F. Southey and J.G. Linders, Notio - A Java API for developing CG tools, International Conference on Conceptual Structures (ICCS'99), 1999.
- [SOW 84] Sowa J.F., Conceptual Structures - Information Processing in Mind and Machine, Addison Wesley, 1984.
- [TD 99] Tschacher W., Dauwalder J.P., Dynamics, synergetics and autonomous agents. World Scientific, Singapore, Landon, 1999.
- [VAL 03] Vally J.D., Systèmes multi-agents : Ontologie, Formalisation et Uniformisation de mécanismes conceptuels, Mémoire de thèse de doctorat, Université de la Réunion, octobre 2003 (à paraître).
- [WJ 95] Wooldrige M., Jennings N., Agents theories, architectures and languages: A survey. Lecture Notes en Artificial Intelligence (LNAI), Vol. 890, pp 1-39, 1995.

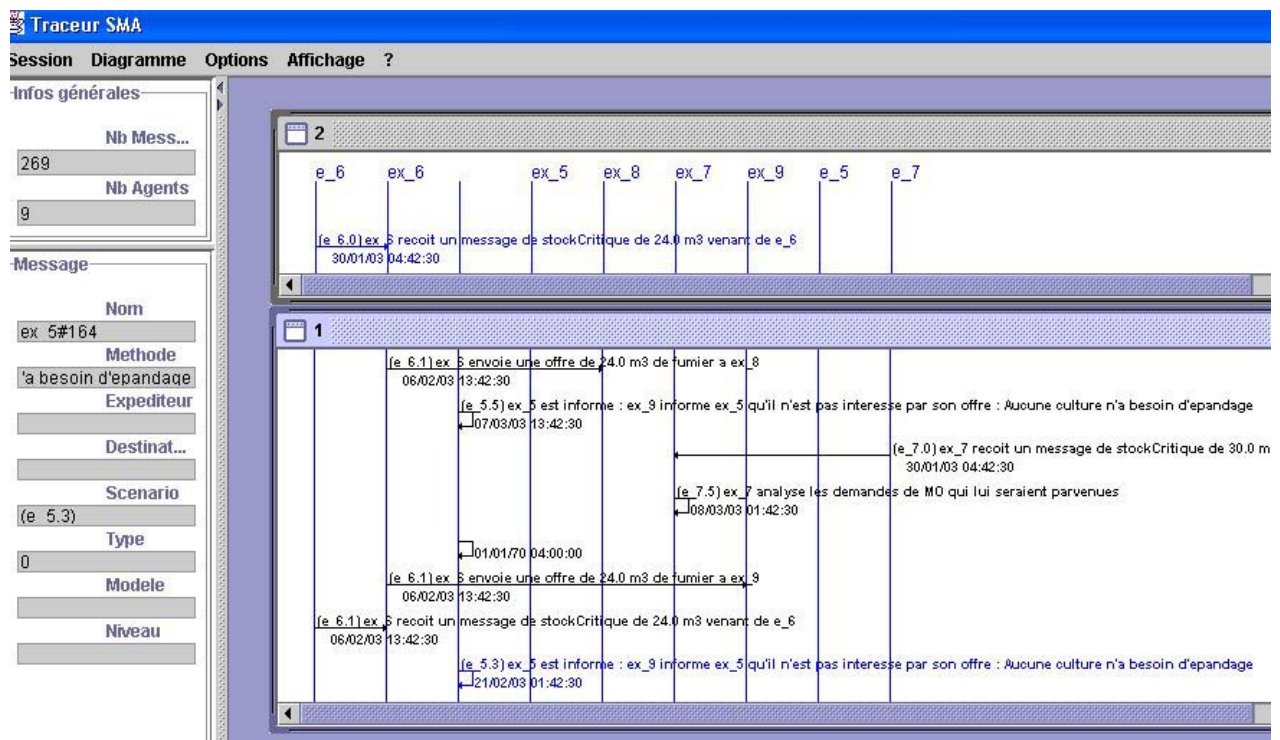
Annexe

Figures et schémas complémentaires

Schéma d'architecture du principe d'interfa  ge Geamas / Système d'Information Géographique



Le traceur d'interactions de Geamas



Interface de conception du prototype AGCP-Net

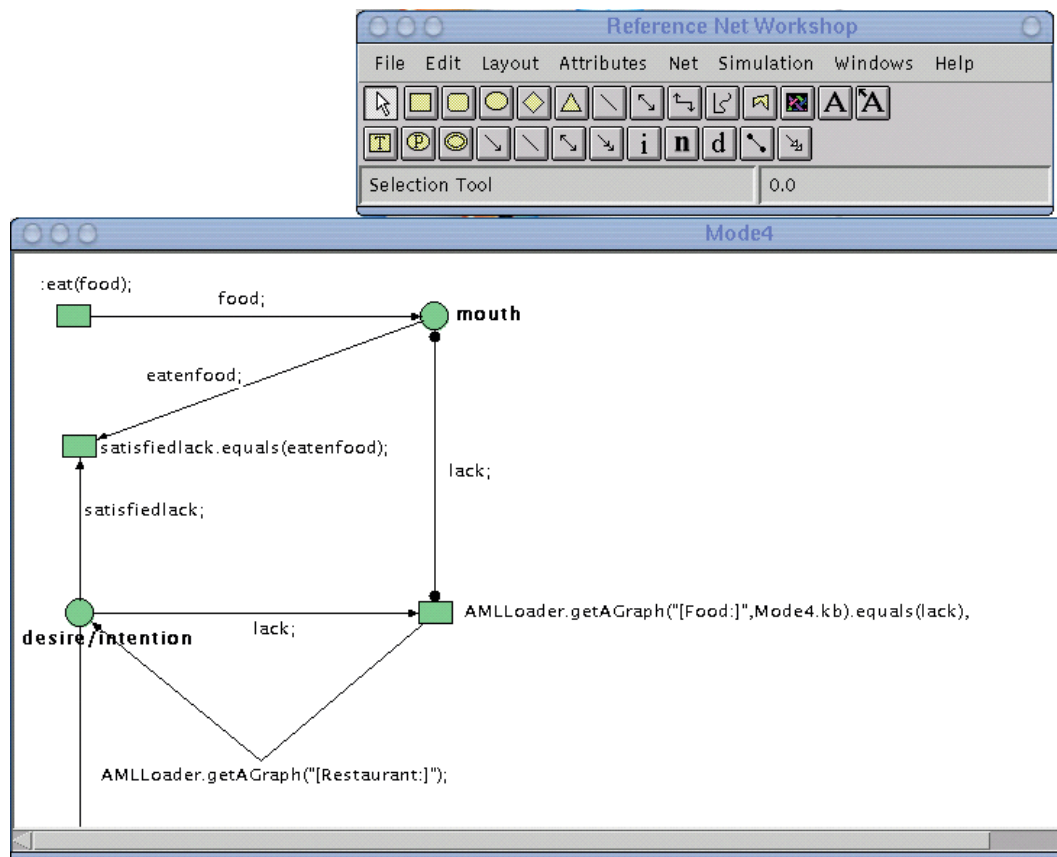


Fig. 13 Interface de conception du prototype AGCP-Net

Architecture générale du projet ETIC³

