



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Avant-projet MAIA

Machine Intelligente et Autonome

Nancy

THÈME 3A

*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.0.1	Méthodes de gestion de l'incertitude	5
3.0.2	Gestion des ressources limitées	5
3.0.3	Gestion de l'interaction, l'organisation dans les systèmes multi-agents . .	6
3.0.4	Robotique mobile	6
4	Domaines d'applications	7
5	Résultats nouveaux	7
5.1	Acquisition et mise en oeuvre des compétences individuelles des agents	7
5.1.1	Assistants intelligents pour la recherche d'information	7
5.1.2	Planification sous incertitude	8
5.1.3	Modèles de décision partiellement observables, apprentissage par renforcement	9
5.1.4	Travaux autour de la planification de trajectoires	10
5.1.5	Modélisation stochastique de produits financiers.	10
5.1.6	Résolution de problèmes avec limitation de ressources	11
5.1.7	Fusion de données: application à l'identification de pistes radar.	12
5.1.8	Télé-surveillance de dialysés à domicile	13
5.1.9	L'explication dans les systèmes à Bases de Connaissances	14
5.2	Simulation d'environnements multi-agents	14
5.2.1	Définition d'un simulateur de robots mobiles	14
5.2.2	Aspect parallélisme	15
5.3	Etude de l'interaction et de l'organisation dans les systèmes multi-agents	16
5.3.1	Modélisation des interactions	16
5.3.2	Apprentissage des interactions	16
5.4	Applications et réalisation de systèmes.	17
5.4.1	Simulation de phénomènes biologiques	17
5.4.2	Résolution de problème par système multi-agents réactif	18
5.4.3	Pilotage d'algorithmes et d'agents cognitifs pour l'interprétation de signaux	18
5.4.4	Fusion multi-capteurs dans un système multi-agents: application à la robotique mobile.	19
5.4.5	Résolution distribuée de problèmes.	19
6	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	20
6.1	Architecture générique d'interprétation de signaux - Convention avec EDF-Chatou	20
6.2	Convention avec la société de services multimédia MIC2.	21

6.3	Convention avec la DCN Toulon Ingénierie Sud	21
6.4	Explication dans les systèmes d'aide à la conduite - Convention avec l'IRSID	22
7	Actions régionales, nationales et internationales	23
7.1	Actions régionales	23
7.1.1	Anesthésie.	23
7.1.2	Collaboration avec Supélec.	23
7.1.3	Projet DIATELIC.	23
7.2	Actions nationales	23
7.2.1	Projet GIS Sciences de la cognition	23
7.3	Action coopérative " résolution de problèmes avec limitation de ressources "	24
7.4	Relations bilatérales internationales	24
8	Diffusion de résultats	25
8.1	Animation de la communauté scientifique	25
8.2	Enseignement Universitaire	25
8.3	Autres enseignements	26
8.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations	26
9	Bibliographie	26

MAIA est un avant-projet du LORIA (UMR 7503) commun au CNRS, à l'INRIA, à l'Université Henri POINCARÉ Nancy 1, à l'Université Nancy 2 et à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

1 Composition de l'équipe

Responsable Scientifique

François Charpillet [Chargé de recherche, INRIA]

Assistante de projet

Martine Kuhlmann [CNRS]

Personnel Université

Christine Bourjot [Maître de Conférences, U. Nancy 2]

Anne Boyer [Maître de Conférences, U. Nancy 2]

Vincent Chevrier [Maître de Conférences, U. H. Poincaré, Nancy 1]

Marie-Christine Haton [Professeur, U. H. Poincaré, Nancy 1]

Jean-Paul Haton [Professeur IUF, U. H. Poincaré, Nancy 1]

Alexis Scheuer [Maître de Conférences, U. H. Poincaré, Nancy 1]

Collaborateurs extérieurs

Florence Le Ber [Ingénieur du Génie Rural des Eaux et Forêts détachée à l'INRA]

Stéphane Vialle [Chef de travaux, Supélec]

Chercheurs post-doctorants

Olivier Aycard [ATER, Université H. Poincaré, Nancy 1]

Alain Dutech [ATER, Université H. Poincaré, Nancy 1]

Chercheurs doctorants

David Bellot [bourse INRIA]

Makram Bouzid [bourse CCH]

Iadine Chadès [bourse INRIA]

Romarc Charton [bourse CIFRE MIC2]

Arnaud Dury [ATER U. Nancy 2]

Frank Gechter [bourse MENRT]

Philippe Haik [moniteur UHP, Nancy 1]

Laurent Jeanpierre [bourse MENRT]

Pierre Laroche [ATER, Ecole des Mines]

Marc Lejeune [bourse CIFRE IRSID]

Laurent Piraud [bourse UHP, Nancy 1]

Bruno Scherrer [bourse INRIA]

2 Présentation et objectifs généraux

Le projet de l'équipe MAIA s'inscrit dans le domaine de l'intelligence artificielle (I.A.) et vise à élaborer des modèles permettant de doter une machine de capacités perceptives et cognitives habituellement attribuées à l'intelligence. Ces modèles sont conçus selon deux approches complémentaires : soit en imitant les fonctions perceptives et cognitives d'entités biologiques, soit en élaborant des modèles qui bien que n'ayant aucune réalité biologique permettent de réaliser des tâches abstraites ou concrètes selon une démarche qui serait qualifiée de raisonnable par un être humain.

Dans ce contexte très général, notre objectif est de concevoir et de mettre en oeuvre des modèles d'agents artificiels appelés aussi *assistants intelligents*. Ceux-ci sont destinés à apporter une aide à un ou plusieurs opérateurs humains dans la réalisation de tâches complexes. Un agent se définit comme une entité physique (un robot) ou logicielle (softbot) capable de percevoir localement son environnement; capable d'interagir avec son environnement et/ou d'autres agents logiciels, physiques ou humains; capable de satisfaire des objectifs individuels, notamment en ce qui concerne la gestion des ressources dont il dispose; et qui possède des compétences propres qu'il peut mettre à la disposition des autres agents de sa propre initiative. Un agent peut agir seul ou en groupe. Le recours à plusieurs agents est utile dans des applications physiquement distribuées sur plusieurs sites géographiques ou sur plusieurs acteurs dont la complémentarité est nécessaire pour réaliser une tâche qu'aucun des agents ne pourrait résoudre individuellement. Le recours à un groupe d'agents est également utile dans des applications complexes pour lesquelles une formulation multi-agents simplifie considérablement la représentation et la résolution des problèmes posés. C'est typiquement le cas dans la simulation de systèmes complexes.

Un groupe d'agents forme ce qu'on appelle un *système multi-agents*. L'activité d'un tel système est caractérisée par les compétences individuelles des agents (A), les lois de l'environnement virtuel ou réel dans lequel évoluent les agents (E), les modes d'interaction qui vont permettre la coordination des activités individuelles (I) et l'organisation qui régit les relations inter individuelles (O). C'est l'acquisition et la mise en oeuvre de ces quatre caractéristiques (A, E, I, O) qui permettent de réaliser des applications multi-agents.

Les techniques d'acquisition et de mise en oeuvre de ces caractéristiques nécessitent des compétences multiples que nous développons dans notre groupe. Parmi celles-ci, citons les domaines du traitement de l'incertitude, la gestion de ressources limitées et l'apprentissage. Les domaines d'applications auxquels nous nous intéressons, que ce soit la planification, l'ordonnement, la navigation, la surveillance, l'interprétation de signaux, la fusion de données, la recherche d'information ou la simulation mettent en oeuvre tantôt des agents isolés tantôt des systèmes multi-agents.

3 Fondements scientifiques

3.0.1 Méthodes de gestion de l'incertitude

Les agents que nous développons sont le plus généralement situés, c'est à dire qu'ils sont immergés dans leur environnement d'intervention. Une des difficultés majeure qu'a à surmonter un tel agent réside dans le traitement de l'incertitude dans laquelle il est plongé : incertitudes liées à l'imperfection des capteurs dont il est doté, incertitude liées à la complexité des modes d'interaction avec son environnement, les autres agents ou l'utilisateur. Si nous prenons l'exemple du déplacement d'un robot mobile, la trajectoire suivie n'est pas toujours conforme à ce que le robot a planifié du fait par exemple du glissement des roues sur le sol, ou la présence d'obstacles imprévus. Pour aborder cette notion d'incertitude les modèles de décision markoviens que ce soit dans un environnement complètement connu (MDP) ou partiellement observable (POMDP) fournissent un cadre théorique pour décider des actions à entreprendre lorsque leur effet est incertain. Leur domaine d'application est vaste (contrôle de processus, recherche opérationnelle, économie, interprétation de signaux, ...). Depuis le milieu des années 90, l'application de ces modèles à la conception d'agents intelligents immergés dans un environnement dynamique s'est imposé dans la communauté de recherche en IA. Nous participons à ce mouvement à la fois pour résoudre des problèmes de planification, de conduite, de surveillance et de recommandation d'actions, de coordination de système multi-agents. Si cette approche est séduisante sur le plan théorique, son implantation informatique pose encore aujourd'hui de nombreux problèmes, notamment en ce qui concerne les performances en temps des algorithmes sous-jacents et le problème de l'apprentissage des modèles. Pour pallier cette difficulté, nous explorons actuellement diverses voies : approximations, techniques "anytime", utilisation de plans sous-optimaux mais néanmoins satisfaisants, apprentissage supervisé, apprentissage par renforcement, etc.

3.0.2 Gestion des ressources limitées

Pour être autonomes et flexibles, les agents que nous concevons doivent être capables de raisonner en tenant compte des moyens nécessaires pour accomplir une tâche, des ressources disponibles et des contraintes imposées par l'environnement (résolution de problèmes avec limitation de ressources). Il s'agit en effet d'une caractéristique essentielle à la fois pour assurer la survie d'un système autonome mais également pour concevoir des systèmes robustes dotés de capacités d'adaptation face à un environnement en constante évolution. Ce point de vue nous conduit naturellement à étudier la notion de comportement rationnel limité dans le sens défini par Simon¹, c'est à dire la capacité d'un agent à déterminer l'action qui maximise son espérance de gain en terme d'utilité par rapport à ses objectifs. On parle de rationalité limitée car l'obtention d'une solution optimale n'est pas forcément possible au vu des ressources dont dispose un agent. On se contente alors d'une solution raisonnable. La gestion des ressources relève de différentes préoccupations comme l'accessibilité des moyens de calculs et des données (pour la résolution répartie de problèmes), le coût et le temps du transfert d'un jeu de données

1. Simon, H.A. (1976). On how to decide what to do. In Models of bounded rationality, Volume 2.

sur un réseau, l'existence ou non de dates limites d'exécution qu'elles soient critiques ou non critiques, etc.

3.0.3 Gestion de l'interaction, l'organisation dans les systèmes multi-agents

L'étude des mécanismes qui permettent à un système composé d'agents situés de se comporter de manière coordonnée et cohérente dans un environnement dynamique est un préalable à la réalisation de systèmes robustes et adaptatifs. Dans ce domaine, les travaux récents issus de la biologie du comportement animal est une source d'inspiration à laquelle nous pouvons puiser pour atteindre nos objectifs. La biologie nous apprend que des êtres aussi rudimentaires que des fourmis ou des araignées sont capables à partir de mécanismes extrêmement simples de réaliser en groupe des tâches complexes comme la construction d'un abri ou le fourragement. Ces mécanismes simples qui permettent d'expliquer le fonctionnement des colonies d'insectes ou d'arthropodes sont basés sur le fait que le comportement coordonné de différents individus permet l'émergence de caractéristiques nouvelles. Un groupe d'individus est capable de réaliser une tâche qui n'est pas spécifiquement programmée au sein de chaque individu. La compréhension du comportement collectif des insectes sociaux a permis de mettre au point de nouvelles méthodes de résolution de problèmes avec des applications dans le domaine du contrôle et de l'optimisation. La présence à Nancy de l'équipe de biologie du comportement dirigée par le prof. Krafft avec qui nous collaborons nous permet d'envisager une avancée dans le domaine de l'intelligence collective. Ces recherches encore préliminaires dans notre groupe s'insèrent dans un cadre plus vaste qui est l'intelligence artificielle distribuée et multi-agents domaine auquel nous contribuons depuis une quinzaine d'années. En complément de la modélisation d'inspiration biologique, nos efforts portent plus particulièrement sur l'étude des phénomènes d'interaction et d'organisation, le pilotage d'algorithmes et d'agents d'interprétation, la simulation et la résolution distribuée de problèmes. Notre objectif principal est de concevoir une technique de résolution de problèmes selon un processus qualifié d'émergent. Le mot " émergent " souligne une particularité importante de la résolution multi-agents, à savoir que le problème posé s'exprime dans le formalisme (dit global) de l'observateur (par définition extérieur au système), lequel est totalement inconnu des agents intervenant dans le processus de résolution. La question principale est de déterminer le système de représentation, les comportements individuels, les mécanismes d'interaction et de réorganisation qui vont régir le fonctionnement des agents de sorte que la solution au problème posé "émerge ".

3.0.4 Robotique mobile

La mise au point d'un système de navigation pour un robot mobile constitue un champ d'application privilégié de nos travaux. C'est pourquoi nous avons continué cette année à utiliser le robot Nomad 200 dont le projet Syco s'était équipé il y a maintenant cinq ans et que nous avons appelé Gaston. Il s'agit d'un robot mobile muni de trois roues orientables, d'une tourelle pivotante et d'un bras manipulateur (une pince mobile verticalement). Ce robot peut appréhender son environnement par 18 capteurs infra-rouge, 18 capteurs sonar, 16 pare-chocs, un laser associé à une caméra CCD et deux caméras CCD orientables. À l'intérieur du robot,

un ordinateur PC Pentium (système d'exploitation Linux) communique avec les capteurs / moteurs et assure la liaison radio avec le réseau informatique local au laboratoire. Enfin, une simulation de ce robot, fonctionnant sur une station de travail Sun Sparc 20, permet la mise au point des logiciels.

4 Domaines d'applications

Les applications de nos recherches sont nombreuses et peuvent toucher des domaines aussi divers que l'assistance à la surveillance (de patients en médecine, de divers sous-systèmes embarqués à bord d'avions, de satellites, de voitures, etc.), l'assistance à la conduite, l'assistance à la prise de décision (notamment sur les marchés financiers), l'aide à la recherche d'informations réparties sur plusieurs sites (fouille de données, commerce électronique), la communication homme machine ou encore les assistants éducatifs (jeux électroniques, logiciels éducatifs). Dans le domaine des systèmes embarqués, nous nous intéressons plus particulièrement à la conduite d'un ou plusieurs robots mobiles pour réaliser des tâches à distance (télé-présence ou télé-opération) ou tout simplement pour ancrer dans la réalité des jeux éducatifs (comme la brique intelligente de Lego ou le chien robot actuellement développé par Sony).

Parmi ces domaines d'applications, nous développons des applications réelles en collaboration avec EDF, MIC2, le CHU de Brabois, l'ALTIR, la DCN, le Laboratoire de biologie du comportement de l'UHP.

5 Résultats nouveaux

5.1 Acquisition et mise en oeuvre des compétences individuelles des agents

5.1.1 Assistants intelligents pour la recherche d'information

Participants : Anne Boyer, François Charpillat, Romaric Charton, Jean-Paul Haton.

Rechercher de l'information est traditionnellement une étape préalable à la prise de décisions. A l'heure actuelle, le nombre croissant de sources potentielles d'information, leur grande variété (des bibliothèques électroniques aux catalogues d'informations, des pages développées par des experts à la littérature grise disséminée dans les entreprises ou les universités, etc...) et leur constante évolution rendent inefficace une recherche contrôlée par l'utilisateur seul. Accéder rapidement et efficacement à l'information désirée apparaît comme un problème central.

L'objectif essentiel est de concevoir un agent intelligent capable d'assister un utilisateur pour la recherche d'informations sur des réseaux comme Internet ou un Intranet. L'agent intelligent devra être capable de piloter une recherche depuis un navigateur quelconque de type Netscape, en prenant en compte des critères comme notamment le temps de la recherche, le coût de l'accès à l'information, la pertinence de cette information et sa validité, afin de fournir à l'utilisateur une réponse la meilleure possible. En même temps que l'utilisateur formule sa requête, il aura la possibilité d'indiquer quels sont pour lui les critères les plus pertinents à

prendre en compte et les contraintes qu'il souhaite imposer à la recherche (par exemple, une qualité de réponse minimale), le type de réponse qu'il souhaite (liste triée de sources d'informations susceptibles de lui fournir les informations souhaitées, liste de documents correspondants aux mots-clés indiqués, ...). L'agent devra prendre en compte ces différents paramètres et utiliser par exemple des techniques de recherche sous contraintes de ressources dans un environnement dynamique.

5.1.2 Planification sous incertitude

Participants : François Charpillet, Pierre Laroche.

Il existe plusieurs approches de la planification d'actions, en particulier les approches qui relèvent de la logique et les approches issues de la théorie de la décision. Si nous continuons à mener des recherches sur le premier point, c'est dans la seconde catégorie que se situe notre apport principal. Par rapport à un plan classique (qui utilise uniquement la distance comme critère d'optimalité), un plan lié aux MDP préconise des chemins optimaux selon un compromis entre la distance à parcourir et la "sécurité" du robot sur ces chemins. Le plan exécuté est celui qui, en fonction de la description de l'environnement, a la plus forte probabilité d'aboutir au but fixé.

Ces approches nous semblent donc très intéressantes dans le cadre de la robotique, mais ils présentent évidemment certaines difficultés. Tout d'abord, les algorithmes de calcul des plans ont une complexité qui les rend inutilisables en temps-réel. Cette complexité est liée notamment au nombre d'états nécessaires pour représenter l'environnement, nombre qui est souvent très important (plusieurs milliers) dans le cadre d'une application robotique réaliste. Il est alors nécessaire de trouver des méthodes permettant de calculer les plans plus rapidement. Nous nous intéressons aux méthodes permettant d'obtenir des plans sous-optimaux (mais néanmoins proches de la solution optimale), en un temps de calcul "raisonnable". Deux techniques de ce type ont été étudiées. La première est fondée sur l'agrégation d'états : certains états, partageant des caractéristiques communes, peuvent être regroupés afin de réduire l'espace d'états considéré. Dans ce cadre plusieurs méthodes ont été développées, ce qui a donné lieu à la publication de deux articles, dont un cette année [24]. La seconde technique étudiée consiste à décomposer l'environnement en régions sur lesquelles un plan peut être calculé indépendamment. La réunion des plans partiels permet d'obtenir une solution sur l'environnement global. Notre approche est fondée sur la représentation de l'environnement par un graphe valué, qui permet de définir précisément les coûts de passage entre régions, qui sont très importants si on veut obtenir des plans proches de l'optimal. Cette approche est très rapide, et les plans obtenus sont de très bonne qualité. Deux articles ont été rédigés dans ce cadre : le premier a été publié sous forme de poster [23], le second sera publié lors de la conférence RFIA'2000 [25].

5.1.3 Modèles de décision partiellement observables, apprentissage par renforcement

Participant : Alain Dutech.

Des travaux théoriques ont montré qu'il est possible de résoudre les POMDP en passant par ce qui est appelé des *belief states*. Cependant, les algorithmes qui en sont dérivés sont trop complexes pour pouvoir traiter des cas avec plus d'une dizaine d'états. Nous avons choisi une optique différente qui consiste à utiliser une mémoire limitée du passé qui nous permet de trouver des politiques non markoviennes dont on sait qu'elles peuvent être plus performantes que de simples politiques markoviennes.

Dans les faits, nous construisons un espace d'états étendus composé de suite d'observations. Pour éviter une explosion combinatoire, nous ne considérons que les suites minimales, c'est-à-dire les suites qui permettent de rendre l'observation courante non-ambiguë. Un tel espace d'états étendu, que nous appelons un observable, est alors qualifié d'exhaustif. Nous avons montré qu'un observable exhaustif permet de ramener un POMDP à un MDP équivalent.

On parle d'apprentissage quand on recherche une politique optimale sans connaître le modèle d'évolution du POMDP, c'est-à-dire les fonctions de transition et de récompense. Nous avons proposé un algorithme d'apprentissage par renforcement pour les POMDP. Cet algorithme construit un observable exhaustif de manière incrémentale. Pour un observable donné, on recherche ses éléments ambigus à l'aide d'heuristiques s'appuyant sur les variations de l'utilité de la politique actuelle. Ces éléments servent ensuite à augmenter l'observable courant pour qu'il devienne de moins en moins ambigu. Une fois exhaustif, l'observable permet de trouver une politique non-markovienne optimale.

Dans un deuxième temps, nous avons voulu nous servir des informations apportées par la connaissance du modèle pour accélérer la construction d'un observable exhaustif et utiliser des techniques plus rapides que l'apprentissage pour rechercher une politique optimale, comme par exemple *policy iteration* ou *value iteration*. Malheureusement, nous avons alors montré qu'il n'existe pas, dans le cas général, d'observable exhaustif quand on envisage toutes les politiques possibles. Nous avons alors envisagé deux solutions à ce problème : la construction d'observables quasi-exhaustifs et l'utilisation de politiques contraintes qui évitent les trajectoires ambiguës. Nous avons obtenu des résultats encourageants en utilisant ces deux méthodes que nous sommes en train de tester plus rigoureusement.

Outre un apprentissage incrémental plus rapidement exploitable, en terme de performance, nous nous intéressons sérieusement à l'utilisation du passé non-récent pour construire des états étendus non-ambigus pour la planification. Ainsi, si un fait marquant et identifiable s'est produit dix unités de temps auparavant, il ne sera plus nécessaire de considérer la suite des dix dernières observations, mais simplement de se souvenir de la dernière observation non-ambiguë. On obtiendrait ainsi un gain en complexité considérable. Il reste à évaluer les retombées sur les performances de l'algorithme.

5.1.4 Travaux autour de la planification de trajectoires

Participant : Alexis Scheuer.

La modélisation stochastique sous forme de MDP et POMDP est basée sur une représentation discrète de l'environnement. Le recrutement d'Alexis Scheuer nous permettra d'affiner les modules de planification et de navigation que nous développons en robotique afin de représenter le mouvement d'une manière continue, ce qui garantit une plus grande précision. Cette amélioration élargira le champs des applications possibles de cette architecture, en particulier du fait de la possibilité d'accroître les vitesses de déplacement.

Plus précisément, le planificateur combinera une détermination d'itinéraire (telle qu'elle existe actuellement dans le projet), choisissant par un MDP un mouvement qui évite les obstacles, et un calcul de trajectoire affinant ce mouvement pour prendre en compte les contraintes de déplacement du robot (travaux de A. Scheuer). Dans le cas où une telle trajectoire ne peut être trouvée, l'ajout d'*obstacles virtuels* permettra à la détermination d'itinéraire de choisir un autre mouvement ou de détecter l'échec de la planification.

L'affinage de ce planificateur nécessite bien entendu un travail équivalent au niveau de la navigation, de façon à ce que le gain en qualité du mouvement planifié soit répercuté au niveau du mouvement exécuté. Pour plus de sécurité et de flexibilité lors de la mise au point de ce navigateur, nous souhaitons définir un simulateur générique pour la robotique. Ce simulateur devra prendre en compte les contraintes physiques négligées au niveau de la planification : entre autre, l'adhérence des roues sur le sol (dérapage lors d'accélération trop fortes), la stabilité du robot (déplacement sur terrain non-horizontale, action des forces d'inertie, etc...), les vibrations et les imprécisions (sur les actionneurs aussi bien que sur les capteurs). Là encore, l'expérience d'Alexis Scheuer concernant des travaux de ce type (simulation dynamique l'an dernier et navigation au début de sa thèse) sera un apport fort apprécié.

5.1.5 Modélisation stochastique de produits financiers.

Participants : François Charpillet, Jean-Paul Haton, Laurent Piraud.

La Bourse représente un domaine d'investigation privilégié pour la planification stochastique. Un investisseur cherche des stratégies financièrement gagnantes à long ou moyen terme, tout en minimisant les risques à court terme. Il dispose à cet effet de nombreuses informations, qui nourrissent deux grandes familles complémentaires de théorie boursière : l'analyse technique, qui se fonde sur l'évolution des cours des valeurs, l'analyse fondamentale, qui considère les informations économiques et financières des sociétés cotées et de leur environnement. Ici, nous voulons faire de l'analyse technique avec des méthodes de l'Intelligence Artificielle. On retrouve naturellement tous les ingrédients d'un POMDP : les cours de Bourse (ou plus exactement leurs variations) fournissent les **observations**, les stratégies (*acheter, vendre, attendre*) représentent les **actions**, les gains et les pertes la **fonction de récompense**. Une étude américaine récente modélise déjà le cours d'une valeur boursière comme un HMM à observations continues, dont les états sont des "régimes", c.-à.-d. des périodes de temps où le comportement

est globalement homogène².

Comme dans tout problème, le choix des données est crucial. Ici, nous choisissons de prendre comme seuls paramètres (observations) d'entrée le cours des valeurs, à partir desquels on calcule les variations de cours à des échelles de temps différentes (jour, semaine, mois). L'observation "jour" est dite *primaire*, les autres *secondaires*. Beaucoup d'études théoriques considèrent connus au départ les paramètres du POMDP. Dans un problème réel, il faut les apprendre. Ici, nous tirons parti du fait que les actions n'ont aucune influence sur les transitions entre états pour développer un **HMM-POMDP**: les observations primaires permettent de calculer un premier HMM représentant la valeur boursière, sur lequel on plaque les actions pour obtenir un premier POMDP.

Dans une deuxième étape, le POMDP subira diverses modifications pour le rendre efficace par rapport à l'objectif de gain désiré. Ces modifications sont inspirées des travaux d'Andrew McCallum³ et d'Alain Dutech⁴ qui visent à distinguer parmi les états et les observations ceux qui sont utiles ou non. C'est à ce moment qu'interviennent les observations secondaires. Ces modifications utilisent un apprentissage par Q-learning. Les transformations du POMDP visent à mettre en évidence les situations spéciales où il est bénéfique d'intervenir. Dans la pratique, on imagine bien qu'elles sont rares, mais on commence à se douter qu'elles sont plus nombreuses que le voudraient les modèles gaussiens classiques (*fat tails*). Chaque objectif de gain différent fait l'objet d'une modification spécifique du POMDP.

5.1.6 Résolution de problèmes avec limitation de ressources

Participant : Francois Charpillet.

La capacité à respecter des échéances (qui ne sont pas forcément connues a priori) est une propriété importante d'un système temps réel. Cet objectif se heurte à des difficultés spécifiques lorsque le système est composé d'agents intelligents. Parmi celles-ci, à cause du caractère non déterministe des techniques généralement employées en IA, l'estimation du temps de réponse d'un traitement dans le pire cas peut être très éloignée du cas moyen. Les techniques d'ordonnancement habituelles conduiraient alors à une forte sous-utilisation des ressources de calcul. Face à cette situation deux solutions peuvent être envisagées: chercher des techniques de représentation et d'exploitation des connaissances déterministes ou chercher des techniques qui permettent de borner des traitements par nature indéterministes.

Nous nous focalisons plutôt sur le second type de solution notamment dans la conception, la modélisation et la conduite d'algorithmes « anytime ». Nous entendons par algorithme « anytime » tout algorithme pouvant fournir une réponse à tout instant; bien entendu, la qualité des

2. Shanming Shi & Andreas S. Weigend: *Taking Time Seriously: Hidden Markov Experts Applied to Financial Engineering*,

Proceedings of the IEEE/IAFE CIFE'97, New York, March 1997, pp. 244-252.

3. Andrew K. McCallum: *Reinforcement Learning with Selective Perception and Hidden State* PhD Thesis, University of Rochester, New York, 1996.

4. Alain Dutech: *Apprentissage d'environnement: approches cognitives et comportementales* Thèse de Doctorat, ENSAE, Toulouse, 1999.

résultats fournis augmente avec le temps alloué à l'algorithme. Grâce à un compromis entre le temps de réponse d'un traitement (ou la quantité de ressources consommées) et la qualité des résultats produits, nous sommes alors capables d'optimiser la résolution d'un problème donné P en fonction des contraintes. Le meilleur traitement recherché est celui qui maximise l'utilité des résultats produits vis à vis des objectifs de l'application. L'utilité est une mesure des performances d'un algorithme en terme de la qualité des résultats produits, du coût des ressources consommées et de l'instant à partir duquel le résultat est disponible.

Cette année, nous nous sommes intéressés à la construction de systèmes interruptibles temps réel par utilisation d'algorithmes par contrats [29] [28]. Un algorithme par contrat est un algorithme qui permet d'adapter la qualité des résultats qu'il fournit en fonction du temps qui peut lui être alloué. En revanche, un algorithme par contrat n'est pas interruptible. Nous avons montré comment on peut construire la séquence optimale d'algorithmes par contrat pour créer un système interruptible dans deux cas : lorsque la date limite d'exécution est connue par une distribution de probabilité, et lorsque la date limite d'exécution est inconnue.

5.1.7 Fusion de données: application à l'identification de pistes radar.

Participants : François Charpillet, Jean-Paul Haton, David Bellot.

Ce travail s'effectue en collaboration avec la *DCN-Ingénierie Sud* sur le problème de l'identification automatique de pistes radar. La DCN-Ingénierie Sud conçoit des systèmes de veille radar embarqués à bord du porte-avions *Charles de Gaulle*. Un système radar sert à découvrir, à partir des échos qu'il reçoit, des pistes constituées d'un ensemble de plots (coordonnées sphérique de l'écho, et diverses informations sur la nature de l'écho reçu). Ces pistes représentent la trajectoire la plus probable d'un objet à la surface de l'eau ou en vol. Nous nous intéressons à l'identification et la classification des pistes radar, c'est-à-dire que pour chaque piste détectée par le système de poursuite, on cherche à associer une classe correspondant au type de l'appareil détecté (avion, missile, bateau, etc...). Ce problème n'est actuellement pas, ou peu, traité dans les systèmes opérationnels et le plus souvent la tâche incombe à un être humain (opérateur radar). La complexité de la tâche tient au fait que l'on est soumis à un fort taux de fausses alarmes, c-à-d des pistes ne correspondant à aucun objet réel mais pourtant détectées par le système de surveillance radar.

L'identification cinématique est un problème d'interprétation de signaux, mais aussi de fusion de capteurs et de données (radars multiples et capteurs infrarouges par exemple). On cherche à extraire les caractéristiques pertinentes de l'information reçue (évolution dans le temps, caractéristiques sur les virages, changement d'altitude, accélération supportée par l'appareil, etc ...) de manière à décider si la piste est vraie ou fausse puis à classer cette piste. L'identification et la classification vont donc se faire, dans un premier temps, en analysant la cinématique de la cible et en construisant une *signature* de la cinématique de la cible.

L'extraction des informations se fait par la construction pour chaque piste d'une carte probabiliste de transition, *résumant* dans le temps les probabilités d'évolution de la cible pistée.

Ces probabilités sont caractéristiques des capacités d'évolution de la cible, mais aussi de ses intentions. Ceci donne donc une bonne information sur le type de la piste. Cette approche reste néanmoins sensible aux situations ambiguës où la cible d'une classe adopterait un comportement proche de celui d'une autre classe. Cette ambiguïté peut être levée en utilisant plusieurs sources de données afin d'analyser plus finement le comportement de la cible. On réalisera la fusion de ces différentes sources de données toujours grâce à la construction des cartes de probabilités de transition. Ces cartes peuvent être étendues à la gestion d'autres connaissances (principe des grilles d'occupation de Moravec et Elfes).

La carte de transition est une discrétisation de l'espace environnant la cible; celle-ci est supposée se trouver au centre de la carte. A chaque case de cette carte, on associe une probabilité de transition de la cible à l'instant suivant. Les cartes sont construites au fur et à mesure que l'on suit la cible. A tout instant il est possible d'associer la cible à une classe, avec une certaine précision. Cependant la précision d'appartenance à une classe ne pourra augmenter que lorsque les informations recueillies seront suffisantes. L'utilisation de plusieurs capteurs pour améliorer les informations contenues sur la carte permettra d'accélérer le processus de reconnaissance.

L'amélioration de l'identification peut se faire en utilisant des données expertes et des bases de connaissances, mais aussi en utilisant d'autres capteurs offrant des données différentes (en particulier les capteurs infrarouges). Le modèle des cartes en 2 dimensions pourra alors être étendu à une troisième dimension et permettre une meilleure identification.

5.1.8 Télé-surveillance de dialysés à domicile

Participants : François Charpillet, Laurent Jeanpierre.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Diatelic [27] auquel participent trois autres équipes du LORIA (Langue et Dialogue, TRIO et ISA). L'objectif global de ce projet est de développer un système permettant le suivi à distance de dialysés à domicile. La dialyse est un traitement qui nécessite un suivi régulier des patients pour éviter les complications parfois graves comme les œdèmes et dans le cas de la DPCA⁵, les péritonites. Le système que nous développons est destiné à faciliter ce suivi notamment grâce à la détection au plus tôt d'alarmes ou alertes liées à cette pathologie. Nous nous limiterons dans ce paragraphe à la contribution de l'équipe MAIA : la détection d'alarmes.

Actuellement, les dialysés sont suivis lors de visites périodiques au cours desquelles le médecin traitant examine un ensemble d'informations qui ont été collectées par le patient quotidiennement. Ces informations sont inscrites sur une feuille dite de "surveillance de DPCA" (une feuille par jour). Parmi ces paramètres figurent le poids, la température, la tension artérielle couché/debout, et des indications sur le traitement suivi (type de poche, poids des entrées et des sorties, heure de mise en place des poches). Ces informations seront collectées et archivées tous les jours par le système Diatelic. A cette fin chaque dialysé dispose d'un poste informatique qui lui permet d'accéder par le réseau téléphonique, au serveur sur lequel sont stockées

5. dialyse péritonéale continue ambulatoire.

les données saisies. Les postes médecins ont accès également au système serveur et permettent aux médecins de consulter ces données. Il est donc en théorie tout à fait possible d'effectuer un suivi quotidien des dialysés par un médecin spécialiste. Celui-ci peut en effet effectuer un diagnostic préliminaire à la seule lecture de ces données. S'agissant d'une tâche lourde et répétitive il n'est cependant pas envisageable de demander aux médecins d'examiner ces données quotidiennement pour chaque patient. Par contre, si une analyse automatique permettait de générer des alarmes pour attirer l'attention sur les seuls cas présentant une évolution pathologique, un tel suivi personnalisé est envisageable. A cette fin, l'équipe MAIA a développé un système dit "expert" en coopération avec l'un des médecins de l'ALTIR. Ce système expert formalise une petite fraction des connaissances mises en jeu par le médecin lorsqu'il interprète une feuille de DCPA. Cette connaissance bien qu'incomplète est suffisante pour générer des alarmes. Pour des raisons de sécurité, le modèle est sur-contraint afin de minimiser le nombre de situations pathologiques non détectées. Cependant, les marges imposées au modèle induisent l'apparition de fausses alarmes.

Le système ainsi développé souffre néanmoins de limitations qui nous ont amené à réaliser cette année un nouveau système expert qui repose non plus sur l'écriture de règles de production mais sur une représentation de l'expertise sous forme de chaînes de Markov pour constituer ce qu'on appelle un modèle de décision Markovien. Cette seconde approche permet non seulement d'adapter les modèles aux patients, mais aussi de proposer au médecin des recommandations lorsqu'une alarme est détectée.

5.1.9 L'explication dans les systèmes à Bases de Connaissances

Participants : Marc Lejeune, Marie-Christine Haton.

La capacité pour les Systèmes à Bases de Connaissances (SBC) d'expliquer leurs raisonnements ou de justifier leurs conclusions de manière convaincante est une caractéristique indispensable pour l'acceptation de tels systèmes par l'utilisateur final. Les SBC industriels d'aide à la conduite de procédés complexes comportent habituellement les fonctions de détection, d'état du procédé, de diagnostic et de recommandation d'action. Ils ont besoin d'explications en temps réel qui ne permettent pas l'utilisation de méthodes classiques développées pour les SBC explicatifs. Dans ce contexte, nous travaillons sur les différentes manières de fournir à l'utilisateur des explications répondant à ses besoins, sur les méthodes de recueil ou de représentation de connaissances explicatives et les modèles d'explication possibles par exemple en utilisant le paradigme multi-agents. Notre réflexion fondamentale s'appuie sur une réalisation pratique en collaboration avec l'IRSID et le groupe Usinor sur le projet Sachem appliqué aux hauts-fourneaux *cf.* § 6.4) [26].

5.2 Simulation d'environnements multi-agents

5.2.1 Définition d'un simulateur de robots mobiles

Participants : Makram Bouzid, François Charpillat, Vincent Chevrier, Stéphane Vialle.

Nous nous sommes intéressés à la modélisation des interactions entre un agent et son

environnement et en avons proposé un modèle stochastique qui tient compte des erreurs et incertitudes qui peuvent se produire tant au niveau des capteurs que des effecteurs des agents situés, ainsi que la dynamique du système. Il s’inspire des modèles de décision Markoviens partiellement observables (POMDP). Au niveau de la perception, on détermine pour chaque observation qu’un agent peut obtenir de ses capteurs, l’ensemble des observations avec lesquelles il peut la confondre et avec quelle probabilité (une distribution de probabilité sur ces observations). Il en va de même avec la distance séparant l’observation de l’agent, qui est divisée en classes. Concernant les actions des agents, on associe à chaque type d’agent et à chaque action qu’il peut entreprendre, l’ensemble des transitions qui peuvent en résulter. Cet ensemble est muni d’une distribution de probabilité, déterminant ainsi la probabilité d’occurrence de chaque transition selon le type de l’agent et en fonction de son voisinage (pour tenir compte de la dynamique du système). Toutes les distributions de probabilité sur les observations, les classes de distance et les transitions peuvent être déterminées par apprentissage sur le système réel à modéliser. Ce modèle a été implanté de manière à pouvoir être exécuté sur machines parallèles et sert à la simulation d’un ensemble de robots, de type Nomad 200, se déplaçant dans un environnement réel (les couloirs du LORIA). Nous développons actuellement une application de distribution collective de courrier.

5.2.2 Aspect parallélisme

Participants : Makram Bouzid, François Charpillet, Vincent Chevrier, Stéphane Vialle.

La modélisation des phénomènes présentés ci-dessus peut entraîner une complexité importante du modèle et un grand besoin en capacité de calcul pour la simulation. Ceci nous a amené à une implantation parallèle du simulateur, tout en profitant du parallélisme intrinsèque des SMA. La parallélisation de notre simulateur est basée sur une répartition dynamique de tâches, réalisée par un mécanisme original de double *work pool* en cascade, afin d’obtenir un bon équilibrage de charge entre les processeurs. Dans le premier *work pool*, une tâche représente un agent dans la phase de perception et de décision. Dans le second *work pool*, une tâche représente un ensemble d’agents en conflit au cours de la phase de mise en œuvre de l’action.

L’implantation de notre simulateur a été réalisée sur la machine SGI-Origin 2000 du CCH, utilisant la bibliothèque ParCel-3 développée à SUPELEC, et des résultats satisfaisants ont été obtenus (plus de 50% d’efficacité avec 4 processeurs) [22]. Un portage sur une machine quadri-processeurs de SUPELEC (SGI-VWS 540) a été réalisé et des résultats équivalents jusqu’à 4 processeurs ont été retrouvés. Ce portage a été effectué dans le but d’offrir la possibilité d’utiliser notre simulateur sur des plates-formes peu coûteuses et à la portée des équipes. Le tableau suivant représente la variation de l’efficacité de la parallélisation en fonction du nombre de PE pour chaque machine utilisée.

Machine/Nbre PE	1	2	3	4	5
SGI-Origin 2000	100	69	59	52	46
SGI-VWS 540	100	83	69	55	-

Actuellement, nous sommes entrain d’évaluer l’apport de notre modèle d’un point de vue agent, en réalisant différents tests sur le simulateur.

5.3 Etude de l'interaction et de l'organisation dans les systèmes multi-agents

5.3.1 Modélisation des interactions

Participants : Makram Bouzid, François Charpillet, Vincent Chevrier, Arnaud Dury, Stéphane Vialle.

Nous nous intéressons dans ce travail à la modélisation des interactions au sein des systèmes multi-agents et des interactions entre un agent et son environnement. La mise en oeuvre d'une stratégie commune en vue d'atteindre un objectif global nécessite de mettre en place de nombreuses interactions entre les agents. Nous cherchons donc à réaliser un modèle de l'interaction, permettant de définir des comportements collectifs et de les implanter dans une société à construire, ou pré-existante. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux menés au sein de l'équipe pour modéliser l'organisation d'une société multi-agents, et sa ré-organisation. Ces travaux ne prenant en compte que des actions de communications directes entre agents, nous avons développé pour notre part l'aspect actions situées dans un environnement.

Ce travail s'est donc effectué en deux phases, une première qui a consisté à créer un modèle déclaratif de l'interaction, concernant les aspects physiques et communicationnels de ces systèmes, et une deuxième phase qui a consisté en la réalisation d'un modèle d'exécution de ces comportements. Nous avons donc développé d'une part un "langage de description d'interactions" situées, et d'autre part une "machine virtuelle" d'exécution permettant l'opérationnalisation de ces descriptions. Nous avons réalisé un simulateur implantant ce modèle et l'avons utilisé dans le cadre du TileWorld, problème classique du domaine multi-agents. Par ailleurs, ce simulateur est également utilisé pour la simulation de phénomènes biologiques.

5.3.2 Apprentissage des interactions

Participants : François Charpillet, Vincent Chevrier, Alain Dutech, Laurent Jeanpierre.

L'efficacité des systèmes Multi-Agents repose principalement sur la faculté d'intégration des agents. Ceci se traduit en effet par l'émergence d'une structure permettant la résolution du problème fixé au système. Le choix des protocoles d'interaction impose donc une forme de solution, en limitant les diverses structures de coordinations possibles. Notre thème de recherche consiste donc à étudier le problème de l'apprentissage de ces protocoles par les agents. Ceci permettrait d'obtenir une plus grande flexibilité, non seulement au niveau de la création du système, mais aussi au cours de son évolution. Par exemple, les agents pourraient apprendre à reproduire une méthode efficace apparue fortuitement, et se passer l'information les uns aux autres.

Par ailleurs, de nombreux problèmes multi-agents peuvent se formaliser comme des Jeux de Markov qui permettent de prendre en compte l'éventuelle simultanéité des décisions et les incertitudes dans la réalisation des actions. Il faut pour cela admettre que chaque agent possède assez d'information sur son environnement. Notre but ici est d'adapter les algorithmes d'apprentissage par renforcement, dont on sait qu'ils convergent pour des MDP, aux Jeux de

Markov qui sont une généralisation possible des MDP. Une extension potentielle de ce travail est de considérer que chaque agent n'a qu'une connaissance partielle de l'état global du système, ce qui nous permettra alors de nous placer réellement dans le cadre des systèmes multi-agents.

5.4 Applications et réalisation de systèmes.

5.4.1 Simulation de phénomènes biologiques

Participants : Christine Bourjot, Iadine Chadès, François Charpillet, Vincent Chevrier, Arnaud Dury.

L'approche multi-agents dans le cadre de la simulation permet de décrire une société, son environnement et leur évolution en se basant sur une description locale des comportements des agents et des objets intervenant dans le monde. La modélisation sous forme de systèmes multi-agents permet de mettre en relation des causes et des effets définis à des niveaux différents (local/global), c'est donc un outil de modélisation pour les biologistes et les éthologues. En retour, les phénomènes biologiques nous permettent de confronter la pertinence de nos modèles pour modéliser des phénomènes réels. Ce travail prend place dans le cadre d'un projet GIS sciences de la cognitions (cf 7.2.1).

Cette année, nous avons poursuivi nos travaux et étudié la coordination des araignées (solitaires et sociales) lors de la construction de toiles, ainsi que la coordination des individus lors de la prédation. En ce qui concerne la construction de toile, nous avons proposé un mécanisme de coordination par le biais de l'environnement. Le modèle repose sur une modélisation individuelle stochastique (l'agent choisit aléatoirement son déplacement), la coordination s'effectue par un mécanisme stigmergique par le biais d'attraction de la soie (la présence de soie modifie la probabilité qu'a l'agent de se déplacer le long d'un fil). Ce principe permet la construction de toiles individuellement et collectivement. Nous avons un mécanisme simple de coordination qui permet également l'agrégation. Actuellement, nous quantifions l'influence des différents paramètres individuels sur le processus de construction.

Par ailleurs nous avons utilisé notre modèle déclaratif d'interaction et l'outil associé pour modéliser la phase de prédation chez une espèce d'araignée sociale, *anelosimus eximius*. La modélisation d'interactions entre araignées, et l'observation à travers notre simulateur de la société virtuelle ainsi créée, permet de caractériser le déroulement de la phase de prédation au niveau social. La comparaison entre cette caractérisation sociale des araignées simulées, et celle des vraies araignées, permet aux biologistes d'émettre et de vérifier des hypothèses quant au modèle individuel, inaccessible, de l'araignée réelle. Sur le plan informatique, ce travail nous a permis de tester notre modèle dans un environnement concret, dans lequel des données biologiques réelles de validation étaient disponibles.

D'autre part, en étroite collaboration avec Samuel Venner⁶, étudiant en première année

6. Venner S., Chadès I., Pasquet A., Charpillet F., Leborgne R.
Modélisation de la gestion optimale des constructions successives de toiles chez une araignée orbite Zygella x-notata

de thèse en biologie du comportement, la simulation du comportement d'une araignée orbitèle a été réalisée. Ce travail est en cours de validation, son évaluation ne se fera que lorsque Samuel Venner aura recueilli les données nécessaires à la validation et à l'évolution probable du logiciel. Ce programme est une application directe de la résolution d'un Processus de Décisions Markoviens dans un environnement incertain réel. Le modèle biologique de l'araignée étudiée est une source d'inspiration notamment en ce qui concerne la gestion des ressources. En effet, l'araignée doit maximiser son énergie interne afin d'atteindre son état de ponte, nous sommes donc dans une configuration de problèmes avec limitation de ressources.

5.4.2 Résolution de problème par système multi-agents réactif

Participants : Florence Le Ber, Arnaud Dury, Vincent Chevrier.

Nous avons développé avec l'INRA un modèle multi-agents pour simuler l'organisation spatiale d'un territoire agricole. Durant l'année nous avons étudié les propriétés de ce modèle (convergence, stabilité) afin d'estimer sa généralité. Dans le cadre d'un stage d'étudiant de l'école des Mines, nous avons adapté ce modèle à un autre problème d'affectation sous contraintes (emploi du temps). L'adaptation s'est faite par mise en correspondance des objets et contraintes des deux domaines (par exemple, parcelle de terrain et créneau horaire). Le mécanisme de résolution est resté identique. Des premiers essais sur un problème d'emploi du temps simplifié nous ont paru encourageants. Dans le cadre d'une collaboration avec P. Divoux (IUT Strasbourg) nous étendons actuellement le modèle pour rendre compte des différents niveaux de contraintes qui existent dans les problèmes d'emploi du temps et qui n'ont pas été exprimés dans le modèle d'origine.

5.4.3 Pilotage d'algorithmes et d'agents cognitifs pour l'interprétation de signaux

Participants : François Charpillet, Philippe Haïk, Jean Paul Haton.

Forts de notre expérience dans le domaine de la modélisation de tâches acquise dans REAKT, nous développons actuellement une nouvelle architecture dédiée à l'interprétation de signaux (thèse de Philippe Haïk). Ce travail s'effectue en collaboration avec EDF et s'inscrit également dans le cadre de l'action incitative de la direction scientifique de l'INRIA sur la résolution de problèmes avec limitation de ressources (en collaboration avec les projets SHERPA, ORION et OMEGA). L'accent est mis d'une part sur la coopération et la coordination de modules algorithmiques et symboliques et d'autre part sur l'utilisation de modèles de décision (du type de ceux utilisés en planification stochastique ou pour la résolution de problèmes avec limitation de ressources). Une caractéristique importante de l'approche que nous comptons explorer dans ce cadre repose sur une conception mixte de la résolution de problème selon une démarche orientée-tâche et agents.

La conception orientée tâche repose sur une description des tâches (on parle de squelettes de tâches ou de modèles de tâches) en terme d'objectifs intermédiaires (squelettes) auxquels est associé un ensemble de méthodes et de ressources. La conception orientée agent repose elle sur la description d'une tâche comme un processus faisant intervenir plusieurs agents ayant des compétences complémentaires et nécessitant des ressources variées. La tâche se réalise dans ce cadre grâce à l'interaction des différents agents selon un protocole de communication préétabli. Dans les deux approches, les méthodes mises en jeu possèdent des caractéristiques différentes : elles produisent par exemple des résultats de plus ou moins bonne qualité en fonction du degré d'approximation, d'imprécision ou d'incertitude des traitements. Le choix de ces méthodes va permettre des réalisations multiples de la tâche dont on suppose qu'une au moins atteint les objectifs fixés. Notons que la notion de qualité recouvre des aspects très diversifiés visant à exprimer le niveau d'approximation, d'imprécision et d'incertitude des traitements.

5.4.4 Fusion multi-capteurs dans un système multi-agents: application à la robotique mobile.

Participants : François Charpillet, Vincent Chevrier, Franck Gechter.

Dans le cadre de ce thème de recherche, il s'agit d'étudier la fusion intelligente d'informations fournies par divers capteurs situés sur un ou plusieurs robots devant évoluer dans un environnement dynamique et complexe. S'agissant d'un système distribué tant au niveau des capteurs que des capacités de traitements, l'approche multi-agents nous fournit un cadre naturel pour aborder cette problématique. Cette méthode permet d'envisager une utilisation adaptée des capteurs en fonction d'une perception partielle de l'environnement tout en prenant en compte les ressources disponibles et les contraintes inhérentes à chacun d'entre eux. L'objectif est donc de réaliser une collecte active d'informations dirigée par le contexte proche dans le but de faciliter la planification et le positionnement du ou des robot(s).

5.4.5 Résolution distribuée de problèmes.

Participants : François Charpillet, Iadine Chadès.

Ce thème de recherche se situe à la frontière entre les deux domaines que sont la résolution Multi-Agents (SMA) et le raisonnement sous contraintes de ressources. Il s'agit de résoudre des problèmes distribués à l'aide d'agents évoluant dans un environnement complexe. Notre étude s'intéresse aux méthodes de résolution qui utilisent les systèmes multi-agents, la résolution d'un problème est alors la résultante des interactions entre les agents. Cette résolution doit considérer d'une part les ressources disponibles, et d'autre part les contraintes imposées par l'environnement. La limitation des ressources imposées aux agents, ainsi que la complexité de l'environnement engendrent souvent des situations de conflits, les agents entrent alors dans une phase de résolution de conflits : la négociation. La coordination des agents prévoit et évite ces conflits. Le point central de ce travail est de proposer un formalisme concis de l'évolution des agents dans un environnement complexe en tenant compte de l'incertitude inhérente aux agents. Pour cela, nous nous inspirons à la fois des comportements biologiques des insectes et arachnides sociaux cherchant à survivre dans un environnement réel très contraignant, mais

aussi à la modélisation mathématique sous forme de chaînes de Markov comme outils de coordination des agents. On parlera plus particulièrement de Processus de Décisions Markoviens (MDP).

Pour éviter des situations de blocage et de négociation, on coordonne les actions de nos agents par la planification. Dans un système multi-agents, on peut planifier de manière centralisée ou distribuée. Dans un travail précédent nous avons choisi dans un premier temps une planification centralisée. Ceci a soulevé des limites en ce qui concerne l'adaptabilité d'un tel modèle face à un environnement fortement dynamique, et surtout la complexité en taille mémoire lors du calcul du plan dit optimal (la capacité mémoire étant vite dépassée pour des environnements de plus en plus complexes). Forts de cette expérience, nous nous sommes attachés cette année à respecter le paradigme multi-agents, où l'on impose à l'agent de n'avoir qu'une vue locale de son environnement. Dans cette approche, l'agent possède un plan local, qui fait correspondre à chaque état local de l'agent une action qui lui est propre. Le plan tient compte des spécificités de l'environnement et de celles de l'agent. C'est ce qui nous a conduit à choisir une modélisation sous forme de chaînes de Markov (MDP).

Le MDP nous donne un plan optimal, que l'on peut traduire sous la forme d'un automate, où l'agent, selon ses perceptions (directes ou indirectes), décide d'une action en suivant son plan et change d'état. Les agents ayant le même rôle auront le même plan. Les états correspondent à une configuration partielle du système, et à une configuration locale du monde de l'agent. Selon l'application choisie, les états reflètent par exemple la survie de l'agent s'il s'agit d'un modèle biologique, d'une application test telle que le proie-prédateur ; ou encore des informations sur les positions relatives d'obstacles, d'agents, dans son proche entourage.

Nous développons ce modèle sur deux applications : le problème d'ordonnancement de tâches non-préemptives sur des machines parallèles non reliées en continuité des travaux déjà menés, et une application test souvent reprise dans la littérature le " proie-prédateur " où il s'agit de trouver le plan optimal qui permettra aux prédateurs de survivre en capturant la proie tout en tenant compte des déplacements incertains de chacun.

6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

6.1 Architecture générique d'interprétation de signaux - Convention avec EDF-Chatou

Participants : Francois Charpillet, Philippe Haik, Jean-Paul Haton.

Un des objectifs majeurs pour EDF est la réduction des développements informatiques de nouveaux modules, la réutilisation " intelligente " de composants logiciels existants et par là même l'augmentation de la sûreté des logiciels développés à partir de ces derniers. C'est dans ce cadre général que se situe le travail effectué au sein du Département Surveillance, Diagnostic, Maintenance (SDM) - du groupe Traitements Avancés de l'Information (TAI) - en matière de développement d'outils de capitalisation des développements et des savoir-faire. La conception

d'un système générique d'aide à l'utilisation et à la mise en oeuvre d'algorithmes numériques - qui peut être vu comme une bibliothèque " intelligente " - est un projet ambitieux qui s'inscrit directement dans la droite ligne de cette action. Il s'agit, à partir d'une bibliothèque de modules numériques, de disposer d'une " surcouche " permettant à un utilisateur d'être guidé dans le choix d'une méthode parmi plusieurs en compétition, d'identifier la plus adaptée à ses données, d'être aidé dans la mise en oeuvre de la méthode et éventuellement dans l'exploitation et/ou l'interprétation des résultats obtenus. Ce système doit ainsi contribuer à résoudre le problème de la capitalisation des méthodes et des savoir-faire. Le système développé devra être suffisamment générique pour pouvoir être facilement adaptable à différents types d'applications : séparation de source, transformée de Fourier, etc.

6.2 Convention avec la société de services multimédia MIC2.

Participants : Anne Boyer, François Charpillet, Romaric Charton, Jean-Paul Haton.

MIC2 (Multimédia Interactive Communication) est une société parisienne, créée en octobre 1996. Son activité se porte sur le commerce électronique dans des environnements multimédia. Ses clients sont des sociétés commerciales qui éprouvent le besoin d'adapter leurs systèmes en les rendant capables de remplir des fonctions allant de l'accueil, à l'aide à la vente, en passant par le conseil pour réduire le surchoix. Nous proposons de réaliser cette extension en intégrant des agents intelligents aux systèmes.

Les travaux consisteront à analyser les requêtes de l'utilisateur (celles-ci pouvant être très incomplètes ou pouvant comporter des incohérences), dans le but de comprendre ses besoins. On propose ensuite de composer une liste de produits qui sont en adéquation avec ces besoins. En parallèle, il faut concevoir et gérer un profil de l'utilisateur de façon à connaître ses préférences et à pouvoir lui rendre les services les plus adaptés. Nous proposons de modéliser les comportements des différents intervenants de ces transactions en utilisant d'agents intelligents. Notre approche rejoindra l'étude des modèles stochastiques, et plus particulièrement celle des réseaux bayésiens qui permettent de tenir compte des incertitudes inhérentes au domaine. La problématique rejoint les travaux sur les agents intelligents effectués dans les dix dernières années dans le cadre du commerce électronique.

6.3 Convention avec la DCN Toulon Ingénierie Sud

Participants : François Charpillet, David Bellot, Jean-Paul Haton.

L'une des tâches de la DCN consiste à développer des systèmes d'exploitation navale des informations tactiques (SENIT), systèmes informatiques temps réel destinées aux bâtiments de la marine. Ces systèmes s'insèrent pour la plupart dans le centre opération (C.O) point névralgique du bâtiment d'où partent et arrivent les informations nécessaires à la prise de décision.

Une des tâches les plus cruciales d'un centre opération consiste à élaborer puis évaluer de façon aussi précise que possible la situation tactique dans la zone d'intérêt du bâtiment. Ceci implique non seulement de localiser, de suivre et de classer les objets présents dans la zone,

mais aussi de planifier une riposte en cas d'agression. Celle-ci doit être rapide, afin d'écartier les objets menaçant directement le bâtiment porteur, ou les bâtiments sous sa protection.

Pour faire face à cette tâche, le bâtiment dispose de sources d'informations multiples et disparates telles :

- les senseurs du bâtiment porteur,
- les liaisons de données inter-bâtiments,
- les liaisons phoniques,
- etc.

L'élaboration de la situation tactique et l'évaluation de la menace nécessite de pouvoir identifier le plus tôt possible de multiples pistes radar, et de pouvoir faire la distinction entre de vraies pistes et de fausses pistes. Après avoir repéré une piste il faut la suivre, y compris si on évolue en milieu bruité (exemple: guerre électronique), et si la cible est très manoeuvrante (avions ou missiles). Ici le problème est de suivre des pistes qui ont des échos particuliers mais qu'un opérateur humain serait malgré tout capable de reconnaître. Parmi les problèmes que pose ce type d'identification et de suivi de pistes, il y a celui de la distinction entre les vraies pistes correspondant à de vrais objets potentiellement menaçant, et les fausses pistes issues de divers échos (vagues, brouillage, parasites, etc...). Certaines de ces fausses pistes ont souvent des comportements qui peuvent ressembler a priori à de vraies pistes. Ils s'agira alors de les éliminer. Par la suite, il sera aussi intéressant d'identifier quelles sont les pistes menaçantes pour le bâtiment en fonction de leur comportement. Le travail peut donc se situer dans le cadre de la fusion de données multi-capteurs . En effet un bâtiment classique est équipé d'un certain nombre de radars et/ou de capteurs infrarouges ou de caméras. Le mélange efficace de ces informations permettraient de mieux distinguer les pistes réelles et menaçantes. Mais il faudrait aussi pouvoir inclure des connaissances a priori sur le domaine issues soit d'une expertise, soit d'un apprentissage des données disponibles, soit les deux, afin d'atteindre le niveau de compétence d'un opérateur humain.

6.4 Explication dans les systèmes d'aide à la conduite - Convention avec l'IRSID

Participants : Jean-Paul Haton, Marie-Christine Haton, Marc Lejeune.

Nos travaux sur les explications dans les systèmes à bases de connaissances se font dans le cadre de l'aide à la conduite de procédés pour les fonctions de surveillance, de diagnostic ou de décision d'action à effectuer. Les contraintes du secteur industriel sont de ce fait très fortes. Notre champ d'application est l'explication dans l'aide à la conduite de hauts-fourneaux, dans le cadre du projet SACHEM d'aide à la conduite de hauts-fourneaux développé au sein d'Usinor, en collaboration avec l'IRSID.

7 Actions régionales, nationales et internationales

7.1 Actions régionales

7.1.1 Anesthésie.

COLLABORATION AVEC LE SERVICE D'ANESTHÉSIE-RÉANIMATION DU CHRU DE NANCY, PR. MEISTELMANN

Participants : François Charpillet, Dominique Fohr, Jean-Paul Haton.

L'anesthésie est une activité qui peut tout du moins partiellement s'automatiser. Il existe déjà d'ailleurs des pousse-seringues automatiques qui injectent en continu des doses de produits anesthésiants. Un des problèmes majeurs est d'évaluer la profondeur de l'anesthésie (par monitoring EEG par exemple) et de surveiller les différents paramètres physiologiques du patient. L'aspect temps réel de ce type d'application est évident, que ce soit pour automatiser complètement ou partiellement l'acte anesthésique. Ce projet a débuté en mars 97. Cette année nous avons réalisé un logiciel qui permet l'acquisition, la visualisation et l'édition des signaux physiologiques d'un patient fournis par les appareils installés en salle d'opération, y compris un indice d'analyse bi-spectrale sur lequel se fonde une bonne partie du raisonnement du médecin anesthésiste. Cet outil constitue la base du travail qui sera mené dans le cadre du présent projet.

7.1.2 Collaboration avec Supélec.

Participants : François Charpillet, Vincent Chevrier, Bruno Scherrer, Stéphane Vialle.

La thèse de Bruno Scherrer se déroule dans le cadre d'une collaboration avec Supélec et avec les équipes MAIA et CORTEX du LORIA. L'aspect fondamental de ce travail consistera à étudier les possibilités de couplage entre un système neuronal et un système markovien. Ces développements seront appliqués à la réalisation d'agents robotiques autonomes et coopératifs.

7.1.3 Projet DIATELIC.

Participants :

François Charpillet, Laurent Jeanpierre.

En collaboration avec les équipes TRIO, ISA et Dialogue, un des objectifs du projet Diatelic est d'assurer à distance le suivi et la surveillance de dialysés à domicile. Bien qu'à terme la surveillance concernera à la fois l'état de santé du patient et l'état de l'appareillage quand il y en a un, c'est la surveillance de l'état du patient qui retiendra notre attention en priorité.

7.2 Actions nationales

7.2.1 Projet GIS Sciences de la cognition

Participants : Christine Bourjot, François Charpillet, Vincent Chevrier, Arnaud Dury.

Dans le cadre de l'appel d'offre "Apports mutuels de la cognition naturelle et de la cognition artificielle" du GIS sciences de la cognition, nous avons été retenus par le CNRS pour étudier l'émergence de comportements et de structures collectives complexes dans les systèmes naturels et artificiels en partenariat avec le laboratoire de biologie et de physiologie du comportement (Univ. H. Poincaré, Nancy 1) et le laboratoire d'éthologie (Univ. Rennes 1). Dans cette perspective, la simulation à l'aide de modèles multi-agents est un apport précieux pour le biologiste : il a une valeur heuristique qui permet une expérimentation informatique rapide favorisant la sélection des hypothèses pertinentes à expérimenter sur le modèle biologique. En retour, les modèles biologiques sont une source d'inspiration pour implanter des mécanismes simples et opérationnels permettant l'apparition de propriétés collectives dans des systèmes artificiels.

7.3 Action coopérative " résolution de problèmes avec limitation de ressources "

Cette action réunit les projets Maia, Oméga, Orion et Sherpa.

La résolution de problèmes avec limitation de ressources est un nouveau thème de recherche en IA. Son objectif principal est de fournir des méthodes permettant de déterminer la meilleure stratégie pour résoudre une tâche donnée en fonction de contraintes qui lui sont imposées. Le résultat escompté de ces travaux est la conception de systèmes robustes ayant des capacités d'adaptation face à un environnement en constante évolution.

Une caractéristique importante de l'approche que nous comptons explorer dans le cadre de cette action incitative repose sur une conception orientée-tâche de la résolution de problème. Cette approche constitue indéniablement une optique commune des travaux menés dans les projets Sherpa, Orion et Syco, même si chacun emploie actuellement sa propre terminologie (modèle de tâche chez Sherpa, pilotage d'algorithmes chez Orion, modèle d'agent chez MAIA).

La résolution de problèmes avec limitation de ressources est abordée de manière similaire dans les trois projets, chacun cependant ayant approfondi l'une ou l'autre des caractéristiques du modèle unifié que nous développons dans ce projet. Ce modèle repose sur une description des tâches (on parle de squelettes de tâches ou de modèles de tâches) en terme d'objectifs intermédiaires (squelettes) auxquels est associé un ensemble de méthodes et de ressources. Ces méthodes ont généralement des caractéristiques différentes : elles produisent par exemple des résultats de plus ou moins bonne qualité en fonction du degré d'approximation, d'imprécision ou d'incertitude des traitements. Le choix de ces méthodes va permettre des réalisations multiples de la tâche dont on suppose qu'une au moins respecte les contraintes. Notons que la notion de qualité recouvre des aspects très diversifiés visant à exprimer le niveau d'approximation, d'imprécision et d'incertitude des traitements.

7.4 Relations bilatérales internationales

Un projet NSF-INRIA avec l'équipe «Resource Bounded Reasoning Research Group» de l'université de Massachussetts a démarré en mars 1997, pour une durée de 3 ans.

Les chercheurs en IA temps réel ont dégagé un certain nombre de paradigmes comme les méthodes d'affinements successifs ou les méthodes d'approximations multiples. Toutes reposent

sur un compromis entre le temps de réponse d'un traitement et sa qualité. L'équipe de Shlomo Zilberstein travaille sur la construction, la composition et le contrôle d'algorithmes anytime. Nous sommes à l'origine de deux modèles de raisonnement progressifs : GREAT (Guaranteed REASONING Time) et REAKT (REAL time Knowledge Tool).

Le but de ce projet est de réunir les compétences des deux groupes de recherche afin d'approfondir le problème de l'interprétation anytime d'une base de connaissances. Les résultats des deux équipes sont encourageants, mais il reste encore beaucoup à faire. Notamment, les questions comme :

- l'établissement de mesures objective de la qualité,
- la construction automatique de hiérarchies,
- le pilotage de la résolution d'un problème complexe,

restent ouvertes et seront abordées dans le cadre de ce projet. Une évaluation est également prévue sur des applications réelles dans les domaines suivants : recueil et fusion d'informations réparties sur un réseau du type World Wide Web, optimisation de requêtes à de grandes bases de données, ordonnancement et interprétation de signaux.

8 Diffusion de résultats

8.1 Animation de la communauté scientifique

- Participation active à des groupes de travail : Groupe AFIA Colline (M. Bouzid, V. Chevrier et A. Dury).
- Comités de lecture de revues : Pattern Recognition, Journal of Intelligent Manufacturing, IECE Transactions, Génie Educatif, Journal d'Acoustique, Speech Communication, Revue d'Intelligence Artificielle, Computer Speech and Language, Int. J. Engineering Intelligent Systems, L'Objet.
- Comités de programmes : Membre du comité de programme du congrès RFIA'2000, Comité de programme des Journées Francophones IAD/SMA. Co-organisation du workshop IJCAI'99 intitulé "Scheduling and Planning meet Real-time monitoring in a Dynamic and Uncertain World ". Membre du comité de programme de la conférence " International Conference on Industrial Engineering and Production Management ", Juillet 99, Glasgow.

8.2 Enseignement Universitaire

- Participation à divers enseignements dans les établissements lorrains (Université de Nancy 1 et 2, INPL, Supélec) : Maîtrise et DEA d'Informatique, IUT, MIAGE, DESS d'Informatique, DESS de Productique, Ecole des Mines, ENSEM, Ecole de Géologie, ESIAL, ESSTIN ; et ailleurs : ENST-Bretagne (M.-C. Haton) ;
- Responsabilité du DEA d'Informatique de Nancy (J.-P. Haton) ;
- Responsabilité du département informatique de l'ESSTIN (V. Chevrier)
- Direction du CRI Nancy 2 (A. Boyer) ;
- Enseignement à l'étranger au DEA d'informatique de Tunis (J.-P. Haton).

8.3 Autres enseignements

8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- Participation à des jurys de thèses de doctorat (J.-P. Haton, M.-C. Haton et F. Charpillet)
- On se reportera à la bibliographie pour la liste des conférences et *workshops* auxquels les membres du projet ont participé.

9 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] O. AYCARD, P. LAROCHE, F. CHARPILLET, « Mobile Robot Localization in Dynamic Environment using Places Recognition », *in: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [2] O. AYCARD, J.-F. MARI, F. CHARPILLET, « Second Order Hidden Markov Models for Places Recognition: New Results », *in: proceedings of IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, I. publisher (éditeur), 1998.
- [3] O. AYCARD, *Architecture de contrôle pour robot mobile en environnement intérieur structuré*, Thèse d'université, nancy, 1998, <http://www.loria.fr/publications/1998/98-T-331/98-T-331.ps>.
- [4] F. CHARPILLET, I. CHADES, J. M. GALLONE, « Stochastic and Distributed Anytime Task Scheduling », *in: 10th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 1998.
- [5] F. CHARPILLET, I. CHADÈS, J.-M. GALLONE, « Stochastic and Distributed Anytime Task Scheduling », *in: Workshop of the 13th Biennial European Conference on Artificial Intelligence ECAI98, on Monitoring and control of real-time intelligent systems*, 1998, <http://www.loria.fr/publications/1998//.ps>.
- [6] F. CHARPILLET, *Perception et raisonnement pour des agents situés en environnement évolutif et incertain*, Habilitation à diriger des recherches, 1998.
- [7] A. DURY, F. LE BER, V. CHEVRIER, « A reactive approach for solving constraint satisfaction problems: assigning land use to farming territories », *in: Agent Theories, Architectures, and Languages - ATAL'98*, 1998.
- [8] R. FOISEL, V. CHEVRIER, J.-P. HATON, « Modeling Adaptive Organizations », *in: Third International Conference on Multi-Agent Systems - ICMAS'98, Paris, France*, IEEE, juillet 1998.
- [9] R. FOISEL, « Construire des systèmes multi-agents à partir de schémas d'interactions », *in: Journées Francophones d'Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents - JFIADSMA'98, Pont-à-Mousson, France*, V. C. e. C. B. J.P. Barthès (éditeur), HERMES, p. 295-308, 1998.
- [10] R. FOISEL, *Modèle de réorganisation de systèmes multi-agents : une approche descriptive et opérationnelle*, Thèse d'université, Nancy, 1998.
- [11] C. GODART, V. CHEVRIER, « Initiation à l'informatique pour les ingénieurs », 1998, Il s'agit d'un document pédagogique dont la diffusion est possible mais en demandant l'avis à l'un des auteurs auparavant.
- [12] P. HAÏK, F. CHARPILLET, A. JOUSSELIN, « Modèles de tâches et bibliothèques de programmes intelligentes pour l'interprétation de signaux & le traitement du signal », *in: Complex Systems, Intelligent Systems & Interfaces, Nîmes, France*, mai 1998.
- [13] J.-P. HATON, M.-C. HATON, F. CHARPILLET, « Numeric/Symbolic Approaches for Data and Information Fusion », *in: FUSION'98, Las Vegas, USA*, juillet 1998.

- [14] P. LAROCHE, F. CHARPILLET, « State Aggregation for Solving Markov Decision Problems - An Application to Mobile Robotics », in : *IEEE International Conference Tools with Artificial Intelligence - ICTAI'98*, 1998.
- [15] F. LE BER, V. CHEVRIER, A. DURY, « A Multi-Agent System for the Simulation of Land Use Organization », in : *3rd IFAC/CIGR Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture, Makuhari, Chiba, Japon*, avril 1998.
- [16] F. LE BER, A. DURY, V. CHEVRIER, « Simuler l'organisation d'un territoire agricole : différentes approches », *rapport de recherche*, 1998.
- [17] F. LE BER, A. DURY, V. CHEVRIER, « Un modèle multi-agents pour la simulation en agronomie : usages et comparaisons », in : *Journées Francophones sur l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents - JFIADSMA 98, Pont-à-Mousson (France)*, 1998.
- [18] LORIA et Univ. Nancy 2, *Systèmes multi-agents, de l'interaction à la socialité - JFIADSMA '98*, PARIS, HERMES, 1998.
- [19] M. MOUHOUB, F. CHARPILLET, J.-P. HATON, « Experimental Analysis of Numeric and Symbolic Constraint Satisfaction Techniques for Temporal Reasoning », *Constraints: An International Journal* 3, 2-3, juin 1998, p. 151-164.
- [20] N. RAY, A. BOYER, F. CHARPILLET, « New Results about Anytime Heuristic Search », in : *Workshop on Monitoring and control of real-time intelligent systems - ECAI'98, Brighton, UK*, 98.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [21] C. BOURJOT, V. CHEVRIER, A. BERNARD, B. KRAFFT, « Coordination par le biais de l'environnement : une approche biologique », in : *Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-agents, St Gilles les bains (La Réunion)*, P. M. M.P. Gleizes (éditeur), HERMES, p. 237-250, novembre 1999.
- [22] M. BOUZID, V. CHEVRIER, S. VIALLE, F. CHARPILLET, « Un environnement de simulation orienté Agents : apport des modèles stochastiques et du parallélisme », in : *Ingénierie des SMA - JFIADSMA '99, Ile de la Réunion*, P. M.P.Gleizes (éditeur), Hermes, p. 329-330, novembre 1999.
- [23] P. LAROCHE, F. CHARPILLET, R. SCHOTT, « Decomposition of Markov Decision Processes Using Directed Graphs », in : *Poster Session of European Conference on Planning, Durham, UK*, 1999.
- [24] P. LAROCHE, F. CHARPILLET, R. SCHOTT, « Mobile Robotics Planning using Abstract Markov Decision Processes », in : *International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI, Chicago, Illinois*, I. C. Society (éditeur), IEEE Computer Society, p. 299-306, 1999.
- [25] P. LAROCHE, F. CHARPILLET, R. SCHOTT, « Décomposition d'un Processus Décisionnel de Markov à l'aide d'un Graphe », in : *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Paris*, 2000.
- [26] M. LEJEUNE, M. LALLIER, C.-C. THIRION, M.-C. HATON, J.-P. HATON, « Conception of an explanation function in an industrial monitoring system », in : *Second World Manufacturing Congress, Durham, UK*, septembre 1999.
- [27] J.-P. THOMESSE, J. CHANLIAU, F. CHARPILLET, L. ROMARY, R. HERVY, P.-Y. DURAND, « DIATELIC : une expérience de télésurveillance de dialysés à domicile », in : *RIM 99*, 1999.
- [28] S. ZILBERSTEIN, F. CHARPILLET, P. CHASSAING, « Optimal Sequencing of Contract Algorithms », in : *Bar-Ilan Symposium on the Foundation of Artificial Intelligence, Ramat Gan, Israel*, 1999.

- [29] S. ZILBERSTEIN, F. CHARPILLET, P. CHASSAING, « Real-Time Problem-Solving with Contract Algorithms », *in: 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Stockholm, 2*, p. 1008–1013, août 1999.