



HAL
open science

Modèles Multi-Agents pour l'Aide à la Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire

Nils Ferrand

► **To cite this version:**

Nils Ferrand. Modèles Multi-Agents pour l'Aide à la Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1997. Français. NNT: . tel-00003562

HAL Id: tel-00003562

<https://theses.hal.science/tel-00003562>

Submitted on 14 Oct 2003

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

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

THESE

présentée à

l'Université Joseph Fourier

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

INFORMATIQUE

par

Nils FERRAND

**Modèles Multi-Agents pour l'Aide à la
Décision et la Négociation en
Aménagement du Territoire**

A

Agnès

Simon

Noé

qui ont subi et supporté mes absences,
à qui je dois mon bonheur « hors la thèse »,
et vers qui mes pensées, mon amour, mon attention,
vont pouvoir revenir.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse est indissociable de son contexte familial, scientifique et matériel. Nombreux sont ceux qui m'ont soutenu, aidé ou supporté. Je suis reconnaissant à tous d'avoir été là quand il le fallait, de s'être investi, d'avoir partagé, d'avoir contribué autant que possible, pour que cette thèse se fasse.

Je tiens tout d'abord à remercier :

- **Yves Demazeau**, mon directeur de thèse, qui a tout d'abord accepté le projet difficile que je lui proposais, m'a intégré dans son équipe, puis a soutenu, orienté, enrichi, critiqué, bref, dirigé... ma recherche, au long de ces années. Je lui dois évidemment aussi beaucoup pour le soutien moral et quotidien qu'il m'a apporté, ainsi que la patience qu'il a su montrer face à l'accumulation des contraintes.

Les membres de mon jury :

- **Jean-Charles Pomerol**, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, qui, malgré ses multiples attributions, a bien voulu évaluer ce travail ;
- **Jean-Pierre Müller**, professeur à l'Université de Neuchatel, qui m'a soutenu dans une candidature à Neuchatel, m'a apporté des avis éclairés sur les systèmes multi-agents et les réflexions philosophiques afférentes, et a finalement accepté d'évaluer ce travail ;
- **Philippe Jorrand**, directeur du laboratoire LEIBNIZ, qui m'a accueilli au sein du LIFIA puis de LEIBNIZ, et m'a assuré de son soutien et prodigué moult conseils, avant que de participer à mon jury ;
- **Dominique Michelland**, directeur des études du CERREP, qui, au sein de CERREP S.A., a accepté de se lancer dans l'aventure de la recherche, puis s'est engagé totalement, m'a transmis son enthousiasme et une partie de son expérience, et a contribué à ancrer cette recherche dans son terrain d'application ;
- **Pierre Dumolard**, professeur à l'Université Joseph Fourier, qui, depuis notre première rencontre, m'a constamment soutenu et manifesté son intérêt, et contribue en premier chef à promouvoir les systèmes multi-agents dans les communautés de géographes ;

- **Claude Millier**, directeur scientifique de l'ENGREF, qui à l'ENGREF a donné les impulsions nécessaires à ce projet, et l'a suivi et soutenu depuis ;

Je voudrais aussi remercier les différents partenaires qui ont soutenu financièrement ou matériellement cette recherche :

- La **Région Rhône-Alpes**, qui m'a attribué un financement doctoral pendant trois ans, et les membres des différents jurys de suivi et de reconduction ;
- La société **CERREP S.A.**, et tout son personnel compétent et disponible, qui a supporté ce travail, a fourni la matière des développements, et surtout a toujours accueilli avec enthousiasme et passion ce projet peu classique, mais innovant ;
- **L'Université Pierre Mendès-France**, et en particulier les équipes de mathématiques (MM. El Methni, Barumanzadeh, Dorier, Sombardier) des départements de sciences humaines et sociales et de sciences économiques ;
- Le laboratoire **LEIBNIZ** de l'IMAG, et tout son personnel technique et administratif.

Cette thèse résulte de multiples interactions et coopérations, avec en particulier tous les membres actuels ou passés de l'équipe MAGMA du laboratoire LIFIA, puis Leibniz :

- **Christof Baeijs**, compagnon réactif de la première heure, universellement présent et corvéable, crème des co-chercheurs,
- **Sylvie Pesty**, qui a soutenu le quotidien d'un bureau partagé, et qui a apporté un peu de pragmatisme et de calme dans une équipe surchauffée,
- **Jaime Sichman** et **Olivier Boissier**, qui m'ont, en leur temps, ouvert aux arcanes de la « maison », **Michel Occello**, le promoteur local d'InterViews, **Jean-Luc Koning**, qui m'a ouvert les portes de l'enseignement à l'ESISAR, et a grandement contribué à initier SANPA, **Francis Vanaeken**, « gourou » du cybermonde et expert ès-Microsoft, mais aussi **Caroline Wintergest**, **Alexandre Ribeiro** et **Jarozlaw Kozlak**.
- Enfin les stagiaires, sans qui rien de concret ne se fait : en particulier **Pierric Permezel**, l'auteur méritant de SMAALA Mac, **Pierre Ferrent**, le développeur dialogique de

SANPA, et aussi **Guillaume Gilles, Guillaume François, François Scholastique, Ludovic Alidra.**

Plus largement, cette réflexion a en fait commencé en 1990, et on peut considérer que cette thèse constitue une étape importante dans un processus qui a été impulsé ou soutenu par de nombreuses personnes :

- **Roland Bechmann**, architecte, historien, écrivain, fondateur d'*Aménagement et Nature*, accessoirement mon grand-père, et qui m'a instillé l'esprit et la culture de la gestion de l'environnement comme support des activités humaines.
- **Martine Naillon** (DASSAULT AVIATION), **Paul Bourguine** (CEMAGREF), l'**Ecole Normale Supérieure de Cachan**, les enseignants et personnels de l'**ENGREF**, différentes équipes du **CEMAGREF**, et en particulier **Guillaume DEFFUANT**, l'Institut Français de l'Environnement (**IFEN**), et en particulier MM. **Jacques Varet** et **Jacques Theys**, les programmes de recherche ESF **GISDATA**, CNRS **CASSINI**, différents chercheurs des communautés SMA en France, la communauté européenne, le groupe **SIGURA**, la **NCGIA**, le groupe **SIGJAVA**, le **CIES de Grenoble**, les experts de la région Rhône-Alpes, le Conseil Général de Savoie (MM. **Michel Barnier** et **Gilles Imbert**), **EDF** et ses équipes de la région PACA, **Aménagement et Nature**, et tous les autres que j'oublie en ce moment...

Mais avant tout je dois évidemment ce que je suis, et ce qu'est ce travail, à ceux qui m'ont fait, à tous points de vue, et continuent à me guider :

- ma mère, **Dan Bechmann**, professeur de sociologie, qui m'a montré l'humain dans l'homme, et la raison dans la solidarité et le bénévolat, mystères restés insondables pour les utilitaristes du multi-agents... Et grand-mère attentionnée de mes enfants quand c'était nécessaire.
- mon père, **Alexis Ferrand**, professeur de sociologie, précepteur dans la voie de la méthode et de l'introspection, dans l'approche des réseaux sociaux, et des ressorts structurels des comportements individuels. Et expert en plomberie quand c'était nécessaire ;

SOMMAIRE

INTRODUCTION

DECISION ET NEGOCIATION EN AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

SYSTEMES MULTI-AGENTS ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE

LA REFERENCE SOCIOLOGIQUE

DE LA CONCEPTION DES SMA

MODELES FORMELS DE SYSTEMES MULTI-AGENTS

AIDE A L'ANALYSE DE PROJET SPATIAL

AIDE A LA NEGOCIATION DE PROJETS EN AMENAGEMENT

CONCLUSION

ETUDE ET D'ACTION DANS LES SYSTEMES COMPLEXES

DISCUSSION : LES ENJEUX DES SYSTEMES D'INFORMATION EN ENVIRONNEMENT

COMPOSANTS ANNEXES DE SANPA

QUELQUES RESULTATS PRATIQUES

Résumé

INTRODUCTION

Un projet de recherche ouvert, de l'informatique vers son application

1. Aide à la décision, systèmes complexes et intelligence artificielle distribuée

1.1. Convergence des trois domaines

En 1991, suite à une étude sur les systèmes de surveillance et d'aide au commandement opérationnel pour les incendies de forêt, j'ai entamé une réflexion sur l'aide à la décision dans les domaines touchant à l'espace et à l'environnement. Dès le départ, j'ai pu constater la complexité des problèmes posés, liée à la coexistence et l'interdépendance de trois grandes classes de systèmes : les milieux naturels ou "environnements", les sociétés (au sens d'ensemble d'individus) et les organisations qu'elles sous-tendent, et enfin les systèmes d'information que l'on met en place pour assister les sociétés dans la "gestion" de leurs activités au sein des milieux. Par ailleurs, il est rapidement apparu que, malgré leur sensibilité et leur viabilité problématique, les milieux ne constituent pas le "facteur déterminant" ; et qu'ils servent plus souvent d'alibi ou de levier aux acteurs (les participants des processus de décision) pour fonder des stratégies personnelles (pour soi) ou politiques (pour la "cité"), qui, actualisées dans les décisions collectives, produisent finalement des formes de gestion "effective", telles qu'elles peuvent se lire dans l'espace. Ainsi, la tentation scientifique de considérer en premier lieu les milieux, systèmes "manipulables", accessibles partiellement à l'expérience, se heurte à la constatation qu'il faut en chercher les "explications" ailleurs, dans les fonctionnements socio-politiques, malheureusement beaucoup moins "atteignables" scientifiquement. Or, il est au moins une certitude quant à l'activité d'un acteur humain en société, c'est qu'il fonde sa position ou décision sur les représentations qu'ils se fait du monde (quel que soit le caractère réflexe de certaines réactions). Dès lors, le concepteur de systèmes d'information, en tant que supports à la production, l'évolution et l'échange de représentations, devient un partenaire important de la gestion des milieux, pour peu que "son" informatique soit utilisée, ou, pour le moins, qu'elle concoure, par son existence même, à structurer et orienter les représentations.

Par ailleurs, ces éléments de réflexion sont à rapprocher de divers travaux et apprentissages sur la compréhension et la modélisation des systèmes complexes. Or, étant acquis que l'on recourt à des modèles, on se trouve confronté à un inévitable dilemme : soit choisir des approches formelles, analytiques, fondées sur des mathématiques plus ou moins élaborées, et plus ou moins représentatives de la réalité ; et se résoudre à opérer des réductions, des délimitations parfois drastiques, dans les objets, les structures et les dynamiques représentées, au risque de manquer les ressorts essentiels de la réalité. Soit, on peut préférer des modèles essentiellement descriptifs, potentiellement plus « holistiques », et couvrant ainsi la réalité ; et qui, pour les meilleurs, articulent les concepts à partir d'une méthodologie explicite, et permettent parfois certaines inférences prédictives par des raisonnements rhétoriques fondées sur la logique ou des catégorisations analogiques. Mais, bien souvent, ils tombent dans le biais de la systémique, qui décrit, mais ne prescrit que de façon abstraite, structurelle ; et manque, par là même, de crédibilité en regard d'exigences de gestion. En définitive, pour les phénomènes physiques, et certaines dimensions bien délimitées dans les milieux naturels, les modèles formels sont les bons outils, en particulier lorsque la quantification est réalisable. Mais pour l'intégration de modèles aptes à couvrir le champ des interactions entre milieux et sociétés, et donc à servir l'aide à la gestion, les modèles formels s'avèrent inadaptés, que ce soit en terme de diversité et de variabilité des comportements d'acteurs, ou pour la prise en compte de phénomènes spatio-temporels hétérogènes.

Arrivé à ce point, on souhaiterait donc disposer de modèles ouverts, distribués, non réducteurs, mais qui seraient aussi exploitables à des fins de prospective et d'aide à la décision. La question revient alors à « rendre utilisable » et « dynamiser » la systémique. Or, quand, en informatique, et particulièrement en intelligence artificielle, on cherche à décrire et résoudre des problèmes complexes, préalablement traités par des voies différentes, connus de différents « experts », que l'on veut rassembler, ou quand on cherche une simulation voulue réaliste de systèmes réels, on aborde les champs du « multi-experts », de la « fusion de données et de traitements », de la « vie artificielle », qui ont en commun d'avoir contribué à fonder un domaine désormais constitué : l'Intelligence Artificielle Distribuée, et particulièrement les Systèmes Multi-Agents. Dans ce cadre, on dispose d'un ensemble de travaux, concepts, et systèmes, qui permettent d'aborder la modélisation, la simulation et la résolution de problèmes, de façon intégrée, avec la

possibilité d'utiliser aussi des modèles mathématiques, et de faire évoluer les modèles en fonction des besoins.

Il y a donc une convergence pratique entre trois types de préoccupations scientifiques : la conception de systèmes d'aide à la gestion de l'environnement et du territoire, la modélisation et la gestion dans les systèmes complexes, et enfin les systèmes multi-agents. L'ensemble de cette thèse s'inscrit à l'interface de ces domaines, et nous en aborderons successivement différents aspects.

1.2. Motivation

La motivation initiale de cette recherche était triple, avec, tout d'abord, une composante essentiellement théorique, relative aux enjeux de la compréhension et de l'action dans les systèmes complexes. Celle-ci peut être approchée de deux façons, soit par des travaux mathématiques (systèmes dynamiques, physique statistique, théorie du contrôle, etc.), soit par le recours à des modèles transcrits sur ordinateur, confrontés à leur application, et, dans l'idéal, construits de manière à orienter l'action (option de la résolution de problèmes relativement à la simulation). Cette seconde approche a été celle retenue dans cette thèse. Elle est objectivement plus facile à mettre en œuvre, même si moins fondée théoriquement.

La seconde motivation a trait plus largement à la place que peut prendre la technique, et en particulier les systèmes d'information, dans la gestion par les sociétés humaines de leurs activités au sein des milieux les supportant. La question latente est celle de la possibilité d'une pérennisation (rechercher la viabilité) des sociétés et des milieux par des voies raisonnées, instrumentales. Dans ce cadre, une motivation importante est liée à la prépondérance accordée dans l'approche des problèmes, aux sociétés et aux activités humaines. Cela se traduit par une conception « orientée usages » des systèmes informatiques, et la prise en compte, autant que possible, des acteurs et de la structure socio-politique qui les utilise. Cette motivation se traduit aussi par la volonté d'ouvrir les systèmes à la diversité des points de vue, et de leur permettre d'intégrer la complexité des processus qu'ils instrumentent. Elle participe ainsi d'une forme d'éthique et de responsabilité de la conception qui reste à fonder.

On peut aussi considérer que l'apport spécifique aux systèmes multi-agents a été supporté par une motivation strictement scientifique, issue d'une part de la conviction que ces systèmes constituent une voie fondamentale pour la modélisation et la gestion dans les

systèmes complexes, mais aussi, d'autre part, que leur développement est desservi par des lacunes énormes dans leurs bases théoriques. Il y a deux chemins à suivre pour renforcer la position des systèmes multi-agents : une voie mathématique, « ascendante », axée sur les systèmes multi-agents en tant que réseaux d'automates adaptatifs, et qui doit concerner la dynamique et le contrôle ascendant de ces processus « émergentistes » ; et une voie symbolique, structurelle, « descendante », axée sur la construction de systèmes sociaux artificiels, et fondée sur la sociologie comme référence, en y apportant autant d'attention qu'à sa contrepartie mathématique.

1.3. Approche informatique et concrétisation de la recherche

Dans l'orientation initiale de cette recherche [Ferrand, 1992b], il était prévu deux grandes parties : un travail essentiellement théorique portant sur la modélisation des systèmes complexes, applicable de façon analogue aux milieux, aux sociétés, et aux systèmes multi-agents, puis un travail plus spécifiquement informatique de développement d'outils d'aide à la décision utilisant éventuellement les résultats de la première phase.

En pratique, l'aspect « modélisation de systèmes complexes » a été abandonné en tant que finalité, mais a cependant perduré comme outil ; et, dans les travaux spécifiques sur les systèmes multi-agents, il est apparu que les propositions faites pouvaient participer d'une réflexion élargie sur la modélisation, ainsi que fournir de nouveaux outils de modélisation spatiale.

En définitive, cette thèse, bien qu'elle touche à différents domaines, et apporte peut-être quelques éléments à chacun, est avant tout un travail d'informatique, et, à ce titre, contribue certainement davantage à l'avancement des travaux sur les systèmes multi-agents, qu'aux autres champs.

Il reste que l'intégration du contexte d'utilisation, aussi bien cognitif, que social, ou environnemental, dans la démarche de conception est une direction choisie. L'informatique est ainsi envisagée comme un support fédérateur pour différentes problématiques ; et on s'est donc efforcé de préserver autant que possible la référence à leurs disciplines d'origine.

Par ailleurs, le projet initial était resté relativement flou, ou trop ambitieux, quant aux objectifs de développement. En pratique, c'est en fonction des besoins effectivement constatés et analysés en collaboration avec les experts « de terrain », que se sont

rapidement concrétisés des objectifs précis, et les orientations possibles pour résoudre les problèmes ainsi posés. Par la suite, au fur et à mesure que certaines solutions étaient apportées, et que la réflexion théorique progressait, de nouvelles questions sont apparues, qui ont suscité des extensions, ou des réorientations. Ce processus, très classique en recherche finalisé, s'il a permis de figer un programme, a été peu « contractant » en terme de volume de questions posés : il y a plus de questions résiduelles ou nouvelles, que de problèmes résolus.

2. Les directions de recherche

2.1. *Problématique générale*

Cette thèse a donc trois dimensions principales : les outils d'aide à la gestion de l'environnement et du territoire, la modélisation et l'aide à la gestion dans les systèmes complexes, et les systèmes multi-agents, ainsi qu'un domaine d'application pour les systèmes développés : l'aménagement du territoire, et en particulier l'expertise et la décision en aménagement. La problématique aborde ces différentes dimensions, ainsi que les liens existant entre elles. Nous donnons ici les différentes questions qui étaient posées au départ, ou qui sont apparues par la suite, et auxquelles nous nous sommes efforcés d'apporter des éléments de réponse :

1. concernant **l'aménagement du territoire et les outils dédiés d'aide à la gestion** :
 - Quels sont les problèmes, les enjeux et contraintes, les réponses actuelles ?
 - Quels sont les objectifs, les contraintes, les données, des systèmes d'aide ?
 - Quel est l'existant en la matière ? Quelles en sont les caractéristiques, et en particulier la nature des problèmes résolus et les orientations prises ?
 - Quelles sont les lacunes ? Comment y répondre ? Quelles sont les priorités ?
2. concernant **les systèmes multi-agents** :
 - Quelles sont les différentes approches et leurs enjeux ?
 - Quels sont les problèmes importants ? Comment y répondre ?
3. concernant la **modélisation et l'aide à la gestion des systèmes complexes** :
 - Qu'est-ce que la « gestion » dans les systèmes complexes ?
 - Quel peut être le rôle de la modélisation dans ce contexte ? Quelles sont les différentes approches possibles ?

- Quelles sont les lacunes, les problèmes non résolus ? Quelles alternatives peut-on proposer ?
4. concernant **l'intégration des domaines précédents** :
- Quelles relations existent entre ces domaines ?
 - Quels sont les apports possibles entre eux ?

2.2. La thèse défendue

On indique maintenant les questions informatiques qui ont été effectivement traitées dans cette recherche, avec des résultats plus ou moins significatifs, mais toujours en relation avec les objectifs de l'application, et en fonction de la motivation initiale :

- Conception et utilisation de systèmes multi-agents dans un cadre de simulation / résolution de problèmes / assistance à un processus informationnel coopératif.
- Propriétés spécifiques des systèmes multi-agents, et en particulier leur adaptation à la modélisation de systèmes complexes.
- Recherche d'un modèle simple permettant de passer de la spécification d'un problème spatial à sa résolution.
- Fondements formels de la conception, en particulier pour la résolution de problèmes.
- Fondement des modèles sociaux artificiels, et référence aux systèmes sociaux humains, et donc recours à la sociologie.
- Utilisation de systèmes multi-agents pour la modélisation spatiale
- Utilisation de systèmes multi-agents pour l'assistance à des négociations

2.3. Objectifs

Les objectifs **théoriques** sont de différents ordres :

- Proposer un modèle formel de système multi-agents réactifs pour la résolution de problème. L'exploiter pour la conception.
- Analyser les options réactif / cognitif en fonction du contexte d'application.

- Proposer une approche de la modélisation spatiale.
- Chercher en sociologie ce qui peut servir les systèmes multi-agents
- Analyser les modèles d'acteurs et leur portage en agents.
- Proposer une approche de l'aide à la négociation
- Proposer une approche de la simulation

L'objectif **pratique** est de développer un ou plusieurs systèmes d'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire. En définitive, un système opérationnel a été développé pour l'aide à la localisation d'infrastructures linéaires, ainsi qu'un prototype de système d'aide à la négociation de projets en aménagement. Des éléments relatifs à la simulation de négociation ont été rassemblés. Par ailleurs, une bibliothèque informatique dédiée aux systèmes multi-agents réactifs a été mise en place.

3. Méthodologie

3.1. *Une recherche soutenue par un partenariat de « terrain »*

Du fait d'une part de sa finalité ingénieuriste (vocation à concevoir et développer des systèmes utilisés pour résoudre des problèmes concrets), et, d'autre part, de l'importance et de la complexité du champ d'application, cette recherche devait être structurée autour d'un partenariat proche du « terrain ». Après une étude des différentes possibilités, il est apparu que les meilleurs partenaires possibles seraient des experts, observateurs des processus de gestion, mais non eux-mêmes impliqués dans la décision à son niveau politique. Nous avons donc proposé à un bureau d'étude en aménagement, la société CERREP S.A., de s'associer au projet, et d'y contribuer en fournissant des cas de référence, en orientant les applications, et en permettant la validation des choix scientifiques et techniques. L'interaction a pris la forme de réunions de concertation, de discussions de propositions, de présentations de produits, et d'évaluation conjointe. Mais surtout, la collaboration a permis de suivre des cas d'étude (dont en particulier une étude majeure pour EDF), d'observer la pratique de l'expertise, puis de les analyser ensemble. Le cadre de soutien de la région Rhône-Alpes a permis de finaliser un montage financier adapté.

3.2. *Orientation de la recherche*

Ce que nous appelons « l'orientation de la recherche », c'est les choix préférentiels qui ont été faits. Elle est très liée à la motivation initiale, mais a été aussi influencée par les interactions avec le partenaire industriel, qui, lui-même, souhaitait défendre un certain « message ».

1. Cette recherche promeut l'utilisation de systèmes multi-agents, non pas comme une finalité absolue, mais comme un outil pertinent par rapport à certains enjeux actuels des systèmes informatiques. En revanche, elle conçoit les systèmes multi-agents comme des outils, des supports, qui ne peuvent servir qu'à transcrire et instrumenter d'autres expertises, que ce soit en terme de résolution de problèmes, ou de simulation.
2. Nous considérons que les systèmes multi-agents n'existent qu'en tant qu'entité collective, et que donc ce sont les « propriétés collectives » qui intéresse la recherche. La notion d'émergence, malgré son imprécision, recouvre bien ce qui est caractéristique de notre objet.
3. Nous considérons que les propriétés des systèmes multi-agents ont déjà largement été abordées par de nombreuses disciplines, que ce soit en mathématiques (systèmes dynamiques, probabilités) ou physique (physique statistique, mécanique), en informatique théorique (réseaux d'automates), en automatique (contrôle distribué, adaptatif) ou à l'autre extrême, en sociologie, en économie, en psycho-sociologie. Il y a un travail résiduel énorme de « portage » théorique.
4. La plupart des problèmes peuvent être résolus en l'absence de représentation ou de logique, et leur structure est le berceau de leur solution. Nous allons donc plutôt dans un sens « réactif ». Et nous considérons que l'observateur ou utilisateur est une composante du système mis en œuvre.
5. En terme d'aide à la décision, nous avons appris à différencier technique et méthode. Les outils informatiques sont souvent des supports techniques, qui masquent une absence de méthode. De même, l'expertise, au moins dans le domaine de l'aménagement, est avant tout une capacité d'abstraction qui permet de sortir les déterminants d'un environnement très complexe ; mais c'est aussi une position sociale et un engagement qui ne peuvent se satisfaire d'une approche purement scientifique ou technique.

6. Dans ce contexte, nous sommes peu satisfaits pas les systèmes d'information géographique (SIG) actuels, en tant que prétendus outils d'aide à la décision et à l'expertise. Et nous souhaitons défendre cette idée.

3.3. Déroulement des travaux

Historiquement, comme nous l'avons indiqué, les objectifs étaient imprécis au départ. C'est en observant la pratique, qu'une de ses dimensions particulières, la détermination des fuseaux de moindre impact pour des infrastructures linéaires, s'est avérée concrétiser les problématiques identifiées précédemment. Cette question a, par la suite, donné lieu au développement d'un système, SMAALA, et à l'abord de différentes questions théoriques. Puis, en raffinant les analyses, la complexité des processus de négociation est devenue un motif récurrent de discussions. Nous avons donc commencé l'analyse des stratégies d'acteurs, afin de proposer des modèles d'acteur, et éventuellement de les implémenter dans une simulation de négociation. Mais, entre temps, le contexte scientifique avait évolué, et les recherches se focalisaient alors davantage sur les possibilités d'assistance aux processus de négociation. Ceci, de façon opportuniste, pouvait permettre, au travers d'un système d'aide à la négociation fondé sur une architecture multi-agents, de disposer d'une plate-forme de simulation, tout en réutilisant le travail sur les modèles d'acteur afin de doter les agents assistants de capacité de représentation des négociateurs humains. Finalement, le travail de simulation n'a pu être achevé, le système d'assistance occupant la fin de la thèse.

3.4. L'évolution du questionnement

On détaille ici le questionnement, selon une succession rendue à peu près chronologique. Entre parenthèses, on fait apparaître le domaine de référence dans la problématique donnée plus haut.

1. Le problème principal discuté dans cette thèse est l'intérêt de recourir à *des modèles multi-agents pour l'aide à la décision en aménagement du territoire*. (1)
2. L'aide à la décision en aménagement du territoire prend principalement deux formes : l'aide à *la décision mono-acteur*, et l'aide à *la décision multi-acteurs*, qui peut, entre autres, prendre la forme d'*une négociation*. (1)
3. La décision s'appuie sur un ensemble d'informations issues d'un processus préalable d'*expertise*, destiné à préparer la décision. En particulier, d'après les observations « de terrain », le problème principal de l'expertise relativement à la décision est celui *de la*

- détermination et de la proposition de différentes variantes de solutions, à partir des informations collectées ou produites sur l'environnement et le projet (la collecte de ces informations ne constituant pas le problème principal). (1)*
4. La détermination des variantes est fondée sur trois types d'informations : des données sur l'environnement, des données sur les contraintes structurelles du projet, des données sur le contexte socio-politique et les acteurs en présence. Il s'agit alors de déterminer en fonction de l'environnement et dans le respect des contraintes structurelles, les différentes possibilités telles qu'elles peuvent couvrir tous les « points de vue » possible, avec une information comparative pour chacune. (1)
 5. Des questions similaires, de type « problèmes spatialisés » ont déjà été traitées par des systèmes multi-agents réactifs. Comment peut-on transposer les résultats ? Quelles sont les alternatives multi-agents pour ce type de problème ? (2,4)
 6. Les modèles multi-agents utilisés sont spécifiques à chaque cas. Peut-on généraliser ? Peut-on en déduire certains éléments méthodologiques ? (2)
 7. Peut-on fonder la validité des solutions apportées sur des approches formelles de ces systèmes ? En particulier en terme de convergence et de contrôle de l'émergence de solution. (2)
 8. Quelles autres conclusions ou extensions peut-on en tirer pour l'application de ces systèmes multi-agents à des problèmes d'aide à la décision ? (1,2,4)
 9. Ces modèles semblant adaptés et performants pour la modélisation de phénomènes spatiaux, peut-on en généraliser les principes à la modélisation spatiale ? (2,3,4)
 10. Le problème pratique posé fait apparaître les différentes représentations d'un projet par les différents acteurs. Peut-on exploiter ceci dans un contexte multi-acteurs ? (1)
 11. Comment, en particulier, peut-on transcrire les processus socio-politiques et la structure des systèmes de décision dans les alternatives d'un projet ? Quels descripteurs (modèles) d'acteurs doit-on utiliser ? (1,3)
 12. Quelles références utiliser pour ces modèles d'acteurs ? (3)
 13. Quels sont les processus de décision ou de négociation qui sont en jeu ? Comment les modéliser ? (1,3)
 14. Peut-on envisager de simuler les négociations à des fins d'expérimentation ou d'articulation des argumentaires ? (1,3)
 15. Quel support doit-il être fourni à une telle simulation ? Comment l'utiliser, avec quelles finalité et contraintes éthique ? (1,2,3,4)
 16. Le support à la simulation étant une représentation dans un ordinateur de l'ensemble des acteurs en présence, ce système est sensé supporter le même type d'échange de représentations que le processus réel. Une fois mis en place, ne peut-il aussi servir en temps réel à assister le processus ? (1,2)
 17. Quels sont alors les enjeux de l'assistance au processus ? Quels sont les besoins ? (1)
 18. Comment une approche multi-agents peut-elle y contribuer, et comment peut-on exploiter la réflexion antérieure ? (1,2)

19. Comment ce système peut-il manipuler des représentations spatiales et permettre leur adaptation dynamique aux changements de points de vue ? (1,2)
20. Comment ce système peut-il s'intégrer avec les outils d'aide à l'expertise ? (1,4)
21. Comment ce système peut-il permettre l'échange d'argumentaire et la construction de stratégies autour de ces argumentaires ? (1,2)
22. Quelle organisation donner aux agents au sein de ce système ? (2)
23. Quelle représentation les agents du système peuvent-ils avoir du processus qu'ils instrumentent, et plus généralement du fonctionnement social des utilisateurs ? (2,3)
24. Le système multi-agents doit-il en particulier être construit sur le modèle d'un fonctionnement social humain, à supposer qu'il soit disponible ? (2)
25. Peut-on finalement rendre les agents suffisamment autonomes pour que leur comportement d'ensemble constitue une simulation de négociation ? (1,2)

4. Organisation du document

Cette thèse est organisée selon un modèle classique en trois parties principales : une partie de définitions, de cadrage, et de références, une partie de propositions (les « thèses ») avec une orientation décision en aménagement, et une orientation multi-agents, et enfin une partie d'applications, avec la présentation des deux applications développées. On conclut avec une discussion sur l'étendue de la thèse, ce qui a été fait, ce qu'elle apporte, ce qui n'a pu être fait, et les travaux qui devraient être poursuivis.

4.1. Première partie : éléments de définition

La première partie inclut quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, relatif à la décision et la négociation en aménagement du territoire, on commence par rappeler le cadre de l'aménagement du territoire, en en précisant les enjeux et contraintes. Puis on évoque les mécanismes de décision et de négociation. On montre en particulier que c'est un processus inscrit dans l'espace, multi-acteurs, multi-critères, multi-objectifs. On donne une description d'un processus classique en identifiant des phases d'expertise, de décision, de négociation, et de réalisation. Puis on aborde l'aide à la décision, et en particulier les systèmes informatiques d'aide à la décision. On insiste sur l'importance du contexte, et la difficulté de prendre en compte les jeux politiques.

Dans un deuxième chapitre, on traite des systèmes multi-agents et de l'intelligence artificielle distribuée. On en propose diverses définitions, ainsi qu'une définition originale, et on discute l'ensemble dans une perspective de conception et d'utilisation. On met en exergue la primauté du système multi-agents sur les agents. On justifie par différents arguments le choix multi-agents. Enfin on présente un modèle particulier, le modèle VOYELLES, qui se décompose en Agents, Interactions, Organisations et Environnements, et son application aux problèmes nous intéressant.

Dans le troisième chapitre, on fait un ensemble de rappels et références en sociologie, afin de détailler différentes notions clés, la façon dont elles sont analysées pour les sociétés humaines, et comment elles peuvent se transcrire pour les sociétés artificielles.

4.2. Deuxième partie : propositions

La deuxième partie inclut deux chapitres, qui constituent les propositions essentielles.

Dans le quatrième chapitre, on aborde la conception et l'utilisation des SMA selon cinq dimensions. Tout d'abord on contribue à la dialectique entre SMA réactifs et SMA cognitifs en montrant comment les deux approches se rejoignent, mais aussi pourquoi les SMA réactifs sont souvent suffisants. Puis on affine cette distinction selon les différentes problématiques de simulation et de résolution de problèmes. On montre qu'à l'inverse des choix classiques, on retient une approche réactive pour la résolution, et une perspective cognitive en simulation. On revient alors sur l'application du modèle VOYELLES. Dans un troisième temps, on reprend l'apport de la sociologie et quels sont les biais potentiels. On introduit ensuite et on décrit le modèle SMARRPS (SMA pour la Résolution de Problèmes Spatialisés). On en détaille, la mise en œuvre, et des exemples d'application. On illustre ainsi la spécificité de ce modèle centré sur le contrôle des interactions.

Le cinquième chapitre propose des éléments formels pour les systèmes multi-agents. Avec trois niveaux de modèles : un modèle booléen simplificateur, un modèle entier, et enfin la formalisation du modèle SMARRPS. On montre qu'à notre connaissance il n'existe pas encore de solution aux problèmes de convergence.

4.3. Troisième partie : applications

La troisième partie décrit les deux applications : SMAALA et SANPA.

Le sixième chapitre décrit le système SMAALA (SMA pour l'aide à la localisation d'aménagements), en donnant le contexte d'application, les objectifs du système, les choix techniques retenus (approche SMARRPS), les possibilités effectives et les perspectives spécifiques. On illustre comment ce système permet d'explorer les différentes solutions à un problème de localisation d'infrastructure linéaire, en contexte multi-acteurs. On donne quelques exemples d'utilisation.

Le septième et dernier chapitre présente SANPA (Système d'Aide à la Négociation de Projets en Aménagement), qui est un outil destiné à la négociation entre acteurs distants, avec un support "WWW", et différentes propriétés spécifiques. SANPA est supporté par un SMA de type cognitif, dans lequel chaque acteur est équipé d'un assistant qui va collaborer avec les autres pour faciliter le processus. On montre les problèmes que ce système pose, et les choix qui ont été faits pour les résoudre. On présente quelques aperçus de son utilisation.

On conclut avec un bilan général de la thèse, et une description des perspectives et développements possibles.

En annexe, on trouvera quelques éléments complémentaires sur l'action dans les systèmes complexes, les enjeux des systèmes d'information en environnement, la négociation, des composants périphériques de SANPA, et divers résultats pratiques.

Partie 1

Éléments de définition

La Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire

*Les Systèmes Multi-Agents et l'Intelligence Artificielle
Distribuée*

La Référence Sociologique

Chapitre 1

DECISION ET NEGOCIATION EN AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Diversité des acteurs, des intérêts et des espaces

1. L'Aménagement du Territoire

Nous précisons tout d'abord ici ce qu'est l'aménagement du territoire, quels en sont les enjeux, les principaux ressorts, et pourquoi il existe des besoins en matière de décision et de négociation. On se référera essentiellement à [Madiot, 1993]. Cette présentation est destinée à bien recadrer l'ensemble de la démarche par rapport à son domaine final d'application.

1.1. Aperçu et définition

Chacun peut facilement se faire une idée de ce qu'est l'aménagement du territoire. Mais il s'agit d'une notion floue et multivoque. Par ailleurs, depuis plus de quarante ans, ce sujet est récurrent dans les préoccupations de politiques publiques, car il touche tout le monde, et il connaît des répercussions à tous les échelons de la société et de l'économie. En particulier, en liaison avec la déprise agricole, et le développement d'une conscience environnementale renforcée, cette question est devenue la source de nombreux conflits à tous les échelons. La politique de décentralisation, mise en œuvre au début des années 80, a conduit à un éclatement et une dispersion des pouvoirs, qui ont encore accentué les disparités à l'intérieur du territoire, ainsi que la difficulté pour la puissance publique de gérer de façon unifiée et cohérente son occupation et les activités qu'il supporte. La mise en place, à partir des années 50, de structures officielles d'évaluation et d'orientation des politiques publiques (Sociétés de Développement Régional, 1955 ; Fonds de Développement Economique et Social, 1955 ; Comité Interministériel d'Action Régionale et d'Aménagement du Territoire, 1960 ; Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale, 1963), a suscité de nombreuses recherches, colloques, comités, qui, tous, selon des modalités et des approches diverses, ont contribué à structurer la réflexion

sur l'aménagement du territoire, ainsi qu'à nourrir des controverses sur la pertinence des différentes options stratégiques.

Claudius-Petit, père de l'aménagement du territoire en France, en proposait la définition suivante :

"Recherche, dans le cadre géographique de la France, d'une meilleure répartition des hommes en fonction des ressources naturelles et des activités économiques."

Cette définition appelle trois commentaires :

- Elle fait abstraction des critères permettant d'évaluer ce qu'est une « meilleure répartition », ce qui sous-entend sans doute que de tels critères absolus n'existent pas. Et, de ce fait, rappelle implicitement que l'aménagement du territoire traduit toujours un choix de valeurs, et constitue ainsi invariablement un processus politique, engageant la responsabilité des décideurs devant les citoyens.
- Il s'agit de la France... Et effectivement, la forme prise par l'aménagement du territoire en France est originale, une conjugaison de multiples facteurs historiques (évolution de l'espace et appropriation du sol), culturels (diversité des influences religieuses), géographiques (diversité, mais aussi perméabilité des milieux), et politiques (centralisation). Certains problèmes rencontrés en France depuis longtemps, ne sont apparus ailleurs que beaucoup plus tard (p.e. l'évolution de milieux anthropisés puis abandonnés).
- Enfin, s'agit-il de répartir les hommes en fonction des ressources, ou le contraire ? En fait, on peut penser que la situation a évolué, depuis l'époque (1950) où il s'agissait d'optimiser le fonctionnement économique global essentiellement à partir du développement de conglomérats industriels, et donc des zones résidentielles correspondantes. Depuis lors, on a plutôt cherché à désenclaver, à stabiliser le territoire, pour éviter que les déséquilibres s'amplifient en faveur des zones urbaines. On est passé d'une logique de mouvement des hommes, à une logique de mouvement des ressources, afin de fixer les populations (ou même d'inverser les processus précédents).

En résumé, l'Aménagement du Territoire est aujourd'hui devenu un très vaste programme incitatif visant à relocaliser les activités, pour maintenir un tissu homogène. Cela se traduit

par un ensemble complexe de perspectives de développement, orientées, facilitées, suscitées, par des mesures, des aides, des projets, des infrastructures, issues de tous les acteurs, qu'ils soient publics ou privés. A terme, comme l'indique le document introductif au débat national de 1993 [DATAR, 1993], il faut ainsi « permettre aux collectivités locales, aux entreprises, à l'ensemble des français de dessiner d'abord, de construire ensuite, l'image de la région et de la nation dans lesquelles ils veulent vivre. »

Dans ce même document, la DATAR identifie cinq principes d'action, parmi lesquels deux nous intéressent au premier plan : « donner aux collectivités locales des moyens adaptés », et « créer une véritable armature physique », car ils induisent des problèmes d'information et de décision individuelle et collective, que nous pouvons envisager d'assister. Il s'agit, pratiquement, d'une part, de faciliter l'élaboration et le suivi de politiques locales, en particulier en terme de gestion de l'espace, et, d'autre part, de développer les infrastructures d'échange et de transport à l'échelon national et régional.

1.2. Les objectifs

Ces objectifs nous intéressent, car, dans une perspective d'aide à la décision, il sont la justification ultime des développements engagés.

Madiot [1993], cite les objectifs suivants :

- le rééquilibrage du couple "ville-campagne",
- la réduction des disparités régionales afin de favoriser une répartition plus homogène des populations,
- le maintien d'un tissu rural et d'une façade urbaine cohérentes avec nos habitudes socioculturelles,
- la préservation du cadre naturel (préoccupation plus récente...)

Dans une approche plus politique, et donc tournée directement vers le citoyen, le rapport de la DATAR [1993], donne la liste suivante :

- « favoriser le développement et le bien-être de notre pays, et donc la création d'emplois » ; et, pour cela : « rendre notre pays économiquement plus attractif » ;
- « maîtriser la concentration urbaine », en rendant complémentaires villes et campagnes, en rétablissant la qualité de la vie dans les agglomérations, en mettant en valeur les

ressources du monde rural, et en jouant de la mobilité spatiale pour réorganiser les usages du territoire ;

- « réduire et prévenir les déséquilibres », entre régions, entre « pays », et en particulier en faveur de la capitale ;
- « répondre aux attentes nouvelles des français », en matière d'environnement, de qualité de la vie, d'accès au savoir ;
- « affirmer l'identité de la France au sein de l'Europe ».

On voit au travers de ces inventaires, que les objectifs « ultimes » de l'aménagement du territoire sont très divers, ne serait-ce qu'à l'échelle des politiques globales. On imagine dès maintenant que la prise de décision ne peut être envisagée selon un modèle réduit à un unique objectif, *a fortiori* quand, comme nous le verrons par la suite, il existe autant d'objectifs que d'acteurs en présence.

1.3. Les orientations pratiques

Les objectifs vont orienter la pratique en fonction d'orientations stratégiques, c'est-à-dire de modalités d'action en matière de politiques publiques. Parmi les orientations actuelles, Madiot [1993] retient :

- le choix d'une politique volontariste, c'est-à-dire définissant explicitement les orientations retenues par la collectivité (pas de pure logique de marché), mais non dirigiste : on a recours aux mesures incitatives (primes, aide, support technique), et non à la réglementation...
- un aménagement décentralisé, visant à impliquer les collectivités et à distribuer les responsabilités, tout en conservant la tutelle régulatrice de l'état...
- la référence systématique au cadre européen, en termes positifs (aides, échanges) ou négatifs (contrôle, concurrence), mais toujours avec un droit de regard, malgré la « subsidiarité »,
- la nécessité d'un aménagement sélectif, construit sur des priorités, et non une tentative de résolution concurrente de tous les problèmes,
- un aménagement souple et ouvert, fondé sur la contractualisation, les efforts de prospective, le recours à des approches interdisciplinaires, systémiques, et enfin, la citoyenneté active, condition nécessaire (mais non suffisante, comme certains le prétendent) de la démocratie...

Ainsi posées, ces orientations paraissent raisonnables, et cohérentes par rapport aux objectifs initiaux. Mais, lorsqu'on raisonne en termes de stratégie d'acteurs, on s'aperçoit assez vite que la volonté d'ouverture, de distribution des pouvoirs, de libéralisation (par opposition au dirigisme), conduit à une situation telle que chacun, ou presque, dispose de moyens d'action lui permettant de tenter de réaliser ses buts, quels qu'ils soient. Dans ce cadre, on arrive à l'extrême à une situation où l'expression des intérêts collectifs n'est plus assurée. Et en particulier, l'environnement, dans sa durée, sa complexité, est une dimension qui tend à être occultée. Pour exprimer cet aspect, on peut ajouter à l'inventaire précédent :

- un aménagement inscrit dans le long-terme, et tenant compte le plus largement possible de la diversité des intérêts et des contraintes.

1.4. Réalisations concrètes en aménagement du territoire

Comme on l'aura compris, la concrétisation des politiques d'aménagement du territoire se fait « dans l'espace », qu'elle prenne la forme de constructions, ou d'attribution de statuts particuliers, et des aides afférentes, à des zones du territoire.

Pour des raisons qui tiennent essentiellement à l'expertise du partenaire industriel de cette thèse, nous avons surtout considéré le cadre rural, ou périurbain. Comme exemple de réalisations, on peut alors citer :

- les aménagements routiers, ferroviaires, énergétiques, touristiques : les "Infrastructures" ;
- les implantations industrielles, ou de services (centrales de traitement, écoles, postes) ;
- les schémas de développement, schémas de bassin, de gestion des eaux,
- les POS, les plans d'urbanisme ;
- les politiques d'attribution de subventions, selon les zones et l'activité ;
- le génie paysager, et la préservation des paysages ;
- la création de parcs, réserves, zones réglementées ;
- le classement de sites.

Parmi ces classes de projet, on peut faire une distinction en fonction de la dimensionnalité de l'aire d'effet du projet concerné (qui est à distinguer de l'aire d'impact, ou aire d'interaction, qui généralement est continue dans une portion du territoire). Nous distinguons ainsi :

- des projets qualifiés de "ponctuels", donc de dimension nulle. Par exemple la localisation d'un poste EDF, d'une centrale d'épuration, ... Il s'agit alors de déterminer où on placera l'équipement à l'intérieur d'une zone considérée. On prendra en compte les contraintes existantes pour choisir un site.
- des projets de "fuseaux", pour les ouvrages linéaires, donc de dimension 1. Il s'agira alors de déterminer à l'intérieur d'un territoire des bandes susceptibles de porter un aménagement continu comme une route, une ligne EDF ou PTT, une voie ferrée... Le jeu est le même que précédemment à ceci près que l'on a des contraintes de continuité et de courbure. De plus l'extension de ces projets est plus grande, et donc on est amené à confronter davantage d'acteurs. Les contraintes se propagent sur les fuseaux : si une zone est interdite à une extrémité, cette contrainte va se propager « le long de la ligne », en fonction des conditions de milieu et des obligations de type courbure et continuité.
- des projets de "réseaux" ou "treillis" ou "arbres" ou "maillage", de dimension comprise entre 1 et 2. On pense aux réseaux de voirie, de distribution EDF ou d'eau, mais aussi aux aménagements de rivière ou même de bassins versants qui concernent un cours principal, mais aussi souvent ses affluents et canaux annexes. Ce type de projet vise à déterminer là aussi des fuseaux (cas d'une construction), ou à localiser des aménagements ou activités sous contraintes d'un treillis existant (aménagement de rivière). Dans ce cas les fuseaux à localiser seront astreints à une certaine connectivité, ainsi qu'à une certaine couverture territoriale, enfin des points de passage sont souvent imposés (transformateurs, usine).
- des projets "spatiaux" de dimension supérieure ou égale à 2, qui concernent des aménagements sur toute une zone avec des localisations éventuelles dans les 3 dimensions (un immeuble occupe l'espace visuel y compris « vers le haut »).

A noter que dans tous les cas, l'aire d'impact est de dimension 2, et inclut au moins l'aire de localisation.

Parmi les exemples cités, le cas des décisions catégorielles est particulier, car il n'y a pas de décision par rapport à une portion précise de l'espace, mais par rapport à des types d'activités inscrites dans l'espace. La concrétisation spatiale de ce type de politique, se fera en fonction des demandes des acteurs concernés. Ce type de schéma est donc intégralement

prospectif, et relèvera toujours de scénario de simulation. Par exemple, les mesures incitatives à la préservation des zones en herbe constituent une mesure d'aménagement, mais qui n'a pas de réalisation immédiate.

Une autre catégorisation importante est relative à la réalité de constructions liées à la décision d'aménagement. Ainsi la perception d'un projet de construction d'autoroute est différente de celle d'un zonage réglementaire, qui n'a pas de portée physique immédiate. Il existe en France de très nombreuses zones industrielles ou commerciales sur lesquelles rien n'est construit. Les acteurs sont très conscient de cette différence. On parle ainsi de projet matériel ou immatériel.

Une autre dimension importante est la portée du projet dans le territoire, ainsi que son ancrage pratique sur les lieux. Les grandes infrastructures sont caractéristiques de cette dimension elles occupent une place très importante dans l'espace et les consciences de l'espace, mais elles n'ont souvent aucun débouché (au sens propre du terme) local : il y a au plus une gare tous les 150 km sur une ligne TGV, les sorties autoroutières sont espacées de 40 km en moyenne. En revanche, une école est une « valeur » locale. A l'inverse, les nuisances éventuelles d'un aménagement sont naturellement considérées en fonction de leur portée.

En terme de décision, les problèmes de localisation, surtout ponctuelle et linéaire, sont, relativement, les plus simples à analyser, puisqu'il y a une construction effective à l'issue du projet, et donc des caractéristiques objectives que l'on peut prendre en compte.

2. La décision en aménagement du territoire

La décision en aménagement du territoire va se situer dans le cadre préalablement décrit, et en particulier l'approche doit être « volontariste, mais non dirigiste », « décentralisée », « souple et ouverte », « participative »... Nous allons en détailler les caractéristiques.

2.1. Caractéristiques

Il n'y a pas un visage unique de la décision en aménagement du territoire. Les conditions sont très variables depuis un individu isolé qui décide de couper ses haies, ou de repeindre sa maison, et qui suscite parfois une « intervention » des administrations, jusqu'aux grands

programmes pluriannuels d'orientation du territoire. Mais il existe quelques traits communs ; ainsi ces décisions sont :

- **Spatiales** : par définition même, ces décisions sont inscrites et définies en fonction de l'espace et des entités présentes ;
- **Multi-Echelles** : le plus souvent il existe un raffinement progressif d'un unique cadre de décision en fonction de l'échelle spatiale, temporelle ou organisationnelle (position des acteurs concernés ;
- **Multi-Acteurs** : par leur extension spatiale, la complexité de leurs effets, leur vocation concertée, ces décisions touchent de nombreux acteurs, aux attributions, pouvoirs, intérêts multiples ; et, de plus, tous les échelons sont actifs ;
- **Multi-Modes** : étant multi-acteurs, ces décisions sont collectives, et elles peuvent prendre des formes variées, depuis l'imposition autoritaire, jusqu'au marché, mais surtout, comme nous allons l'aborder, la négociation, intégrative (coopérative) ou distributive (conflictuelle) ;
- **Multi-Objectifs** : les objectifs plus ou moins explicites des acteurs peuvent être de très nombreuses natures (humaniste, hédoniste, arriviste, électoraliste, politique, écologique, économique, etc.), et aussi mélangés chez chacun d'entre eux ;
- **Multi-Critères** : les critères (dimensions de lecture d'un projet) sont aussi variés que les lectures possibles de l'espace et du fonctionnement social : écologie, économie, agriculture, culture, réglementations, jeux politiques, paysage, technologie, etc.

Par comparaison, la conception industrielle (conception de produits) présente une plus grande complexité interne pour les dépendances mécaniques, les structures, les fonctions, mais le contexte d'inscription du processus est plus simple, car les acteurs sont coopératifs, avec une « culture » proche, et le critère principal reste le bénéfice économique.

2.2. *Contraintes*

Les caractères inventoriés précédemment déterminent autant de types de contraintes qu'il faut prendre en compte lorsqu'on veut soit intervenir « pour ses intérêts », soit assister le processus, soit le modéliser ; avec en particulier :

- Diversité des acteurs (individus ou organisations) en présence,
- Absence de structuration des processus de décision, forte distribution des décisions,
- Forte sensibilité inter-échelles : la décision du maire d'un village peut freiner un projet d'ampleur européenne,
- Des temporalités très diverses, depuis « l'instant » d'un clin d'oeil déterminant durant une réunion, jusqu'à la croissance forestière,
- De multiples controverses scientifiques dues à la complexité des systèmes en jeu, d'où une position difficile de l'expertise,
- Un refus récurrent d'engagement de la part des politiques,
- Une territorialité inadaptée : les limites administratives ne traduisent pas les réalités écologiques ou les dynamiques économiques (notion de bassin d'activité),
- Un cadre légal très présent, mais parfois inadapté.

2.3. Enjeux

Les enjeux sont l'ensemble des attributs de l'espace ou paramètres du projet qui peuvent être pris en compte par les acteurs de la décision, pour se forger une opinion ou un argumentaire. C'est donc l'ensemble des éléments qui vont apparaître dans les « discussions » au cours de la décision, y compris l'ensemble des informations issues de l'expertise. Il n'y a *a priori* pas de limites quant aux enjeux possibles d'un projet en aménagement du territoire. Du fait du grand nombre d'acteurs, et de l'impact potentiel des projets sur l'ensemble de la société et de ses activités, on voit resurgir de très nombreux enjeux inattendus, qui permettent aux acteurs de formuler des stratégies cohérentes (s'agissant d'une implantation de ligne électrique, on va aborder le maintien de l'école). La démarche préalable d'expertise est désarmée face à cette ouverture possible dans toutes les directions, et elle se limite donc aux enjeux classiques, généralement utilisés comme critères.

2.4. Objectifs

Si la notion d'*objectif* peut avoir un sens en aménagement du territoire, elle devient beaucoup plus incertaine lorsqu'il s'agit de la décision afférente. En effet, il peut éventuellement y avoir consensus sur le type de territoire et d'organisation des activités qu'on souhaiterait obtenir, mais sa traduction dans une perspective de gestion, et en un ensemble d'objectifs concrets, relatifs aux enjeux affichés, dépend largement de systèmes

de valeurs, de références culturelles, ou d'orientations politiques. Par exemple, ne serait-ce qu'au sein des communautés écologistes, il y a débat sur la place de l'homme dans les milieux, certains avançant que l'homme est essentiellement une catastrophe naturelle (« deep ecology »), et que donc il doit s'effacer le plus possibles, d'autres défendant la thèse du développement durable, fondé sur la préservation des conditions de réalisations des activités humaines vitales. Selon d'autres conceptions, supportées par les tenants de « l'économisme », c'est la « valeur économique » qui oriente l'action, et cela conduit aux principes « d'internalisation » de l'environnement par des procédés de valorisation monétaire de ses composantes. Mais selon la tendance apparemment majoritaire actuellement, l'objectif des décideurs politiques est le « moindre conflit », c'est-à-dire l'état du territoire, des milieux et des activités qui suscitent le plus petit nombre d'oppositions, et, en clair, facilite la réélection. Ce type d'objectif est à opposer avec, par exemple, le « moindre risque », qui est le résultat du désormais célèbre « principe de précaution » : du fait des incertitudes multiples, l'action doit intégrer les hypothèses les plus larges, de manière à toujours conserver des « marges de manoeuvre ». On pourrait encore citer d'autres objectifs possibles, comme le « bien-être de tous », notion personnelle s'il en est, ou l'esthétique, tournée vers les paysages, ou la rationalité érigée en objectif, selon une approche technocratique (forme de positivisme fondé sur la réductibilité des comportements), ou encore la préservation, qui vise à la reproduction de l'existant.

En résumé, il n'existe pas d'objectif universel pour la décision en aménagement du territoire. Ceci a deux conséquences pratiques :

- la décision doit prendre en compte la multiplicité des objectifs, et contribuer à les expliciter et les confronter,
- tout assistance, expertise ou instrumentation doit s'efforcer d'abstraire ses propres objectifs de son intervention.

2.5. Acteurs

Comme nous l'avons dit, un acteur est un participant, individu ou organisme¹, à un processus de décision et d'action.

¹ Un organisme est représenté par un individu lors des réunions « physiques », mais il perdure dans la représentation de la décision

Pour préciser et situer, nous donnons ici une liste catégorielles des acteurs rencontrés dans une négociation ouverte sur un grand projet de ligne électrique : EDF, ses cadres, ses agents, plusieurs bureaux d'étude (les experts), de nombreuses administrations comme les préfetures, les DRIRE (Direction de l'Industrie), DIREN (Environnement), DDAF (Agriculture), des administrations territoriales (conseils régionaux et généraux, communes), des agences publiques (agences de bassin), des syndicats mixtes, des élus (ministres, sénateurs, conseillers régionaux et généraux, députés, maires et conseillers municipaux), des associations (agricoles, écologistes, territoriales, de chasseurs), des « personnalités », des universitaires, des « gens de terrain » (exploitants agricoles et forestiers), des citoyens « sans qualité particulière ». Certains individus² peuvent appartenir à plusieurs catégories.

A partir de cet inventaire, on peut établir une typologie, selon un ensemble de directions :

- l'acteur est-il un individu identifié ou une organisation ?
- l'acteur agit-il pour lui seul ou représente-t'il d'autres acteurs ?
- l'acteur peut-il agir « effectivement » sur l'espace dans une de ses activités ? ou est-il limité à des actions indirectes en influençant d'autres acteurs (acteur « intentionnel » vs. Acteur « effectif » [Mermet, 1992]) ?
- l'acteur est-il un opérateur, c'est-à-dire le réalisateur éventuel du projet ? est-il un institutionnel (agent de la collectivité) ? un associatif formel ou informel ?
- l'acteur est exploitant, ou gestionnaire, ou propriétaire, ou utilisateur des ressources concernées ?
- l'acteur est-il élu ? nommé ? quelle est sa position hiérarchique ?
- l'acteur est-il territorialisé (attaché à un territoire particulier) ? A quelle échelle ?
- l'acteur est-il sectoriel (thématique) ?
- l'acteur intervient-il par rapport au projet lui-même ou à ses enjeux et son contexte (références techniques et scientifiques) ?
- quelle est la durée de son intervention ?

Cette typologie est individuelle et ne fait pas référence aux interactions entre acteurs (la notion de « représentant » étant un attribut statique). Par ailleurs, on se limite à des

² Un individu peut « représenter » plusieurs acteurs, de même qu'un acteur peut être une organisation rassemblant différents individus. Lors d'une réunion, le comportement d'un individu correspond majoritairement à un acteur, mais il y a des effets liés aux autres « casquettes » de l'individu. La notion de rôle est encore différente (cf. Le rôle social, p. 91).

dimensions directement décidables. On ne fait ainsi pas référence aux objectifs individuels des différents acteurs, car ils sont nombreux, imbriqués, masqués, fluctuants... De même, on ne parle pas ici de rôle ou fonction.

La classification essentielle en quatre classes d'acteurs : opérateurs, institutionnels, élus, et citoyenneté active, ne semble pas suffisante ; car elle ne permet pas de localiser effectivement les différents services, organismes et sociétés. En effet, la position de certains acteurs est fonction du contexte du projet. D'autre part, l'introduction d'un acteur d'une des classes impose presque systématiquement la place des autres. L'exemple donné est celui d'EDF qui peut être présent soit en tant qu'opérateur, soit en tant qu'institutionnel, de même pour l'état qui est bien souvent l'opérateur effectif.

2.6. Description du processus

Comme on l'a vu, la décision en aménagement du territoire vise la localisation dans l'espace, ou selon des catégories spatiales, soit de réalisations effectives (constructions, aménagements), soit d'attributions réglementaires ou financières (zonages et aides). On considérera dans cette thèse essentiellement les processus institutionnels, c'est-à-dire ceux s'inscrivant dans un cadre officiel (p.e. déclarations d'utilité publique). De plus, du fait des cas considérés en pratique, on se référera aux projets de construction. Les projets réglementaires relèvent d'une logique différente, puisqu'il n'y a pas d'opérateur identifié *a priori*. On alors cinq phases essentielles, qui sont présentées dans leur ordre logique, mais pas forcément chronologique, car, le plus souvent, elles sont concurrentes.

2.6.1 Désignation, initiation

Cette phase relève de l'échelon administratif qui « décide » de démarrer le processus, et de « lancer » le projet. L'administration ou les politiques estiment qu'il y a un besoin, ou répondent à une demande. Pendant longtemps, en l'absence de processus de concertation et d'enquête publique, la désignation impliquait quasiment la réalisation. Désormais la désignation est déjà un risque politique, et c'est une phase qui peut rester confidentielle.

2.6.2 Expertise

La phase d'expertise vise à documenter le projet, en faisant recueillir ou produire les informations pertinentes par des experts, qui vont ainsi constituer la référence opposable

pour les discussions ultérieures. Cette phase peut être confiée soit à des experts publics (services techniques de l'état), soit à des experts privés (bureaux d'étude, associations). La partie strictement technique et financière est généralement réalisée directement par l'opérateur. Cette phase s'inscrit dans un cadre réglementaire puisqu'elle donne lieu à la production de documents dont le contenu est défini par la loi. La forme la plus classique de l'expertise est l'étude d'impact, réalisée soit en vue d'une déclaration d'utilité publique (DUP), soit simplement pour un avant-projet sommaire (APS : projet de définition).

2.6.3 Décision

Par « décision » nous entendons décision mono-acteur, c'est-à-dire le processus qui permet à chaque acteur, en fonction des informations mises à sa disposition (dont celles issues de l'expertise), ainsi que de ses orientations (valeurs) personnelles, de se déterminer par rapport au projet, de se forger une opinion, et éventuellement de générer des contre-propositions. Ce type de décision est toujours instruit à l'intérieur d'un processus relationnel complexe, et qu'il devient ainsi multi-acteurs. Mais, à la différence de la négociation, cette décision ne construit pas de stratégie relationnelle.

Tous les acteurs « se décident » par rapport à un projet. Il n'y a pas de cadre fixé pour cette phase. Les procédures d'enquête publiques permettent simplement de garantir que des citoyens n'ont pas été exclus. En pratique, la difficulté de la communication de l'expertise et de l'information sur le projet constituent des sources « d'indécision » ou d'incompréhension.

2.6.4 Négociation

Le plus souvent, les acteurs ont des positions différentes, du fait d'intérêts ou de systèmes de valeurs divergents. Or, dans un système démocratique et égalitaire comme le notre, les différents points de vue doivent être pris en compte pour la décision publique. On va donc rechercher une conciliation, selon différents modes, en allant vers un consensus ou un compromis. On passe ainsi par une phase de négociation, au cours de laquelle les acteurs élaborent et échangent des arguments afin de défendre leur position ou d'attaquer celle de l'autre.

Il n'y a pas de cadre officiel pour la négociation. Celle-ci est informelle, même si elle est organisée. Tous les acteurs peuvent en principe y participer, mais les principes de

délégation font qu'elles se déroulent souvent à « échelon » équivalent. Dans la plupart des projets, la négociation constitue le cœur du processus de décision. Elle nécessite souvent un retour sur l'expertise et la décision.

2.6.5 Concrétisation, Réalisation

Une solution commune ayant été trouvée, l'administration officialise la décision dans un acte ; et l'opérateur peut alors entamer la réalisation. Ceci ne clôt cependant pas les phases précédentes car il y a de nombreuses remises en question, et des renégociations ou adaptations.

Cette description est assez générale ; nous verrons plus loin, dans le cas des projets d'infrastructures linéaires, comment elle peut être détaillée.

3. L'aide à la Décision et à la Négociation

Ces décisions ou négociations sont supportées ou assistées par des artefacts ou des acteurs particuliers. Aider la décision ou la négociation, c'est donc soit fournir un support technique, soit intervenir spécifiquement pour faciliter le processus. Il existe alors un métier de l'aide à la décision et la négociation en aménagement, qui allie une compétence thématique, une expérience relationnelle, et la maîtrise d'outils.

3.1. Origine des besoins

Parmi les phases décrites précédemment, on trouve plusieurs opportunités d'aide à la décision.

La phase de désignation relève d'une démarche prospective qui fait apparaître la nécessité d'un aménagement. Le besoin d'assistance peut provenir d'un manque de distance par rapport à l'objet géré, ou d'un manque d'outils pour analyser la situation et son évolution prévisible.

La phase d'expertise nécessite tout d'abord le recueil de données existantes, puis une collecte d'informations sur le « terrain », suivie d'une analyse générale visant à décrire l'état et la dynamique de l'environnement, et enfin une réflexion argumentée sur l'effet possible du projet et les différents alternatives. L'ensemble doit être organisé et publié dans un document de communication. L'expertise étant déjà une aide à la décision, et non

réellement une composante de la décision, ce sont les outils pouvant faciliter ses étapes qui nous intéressent.

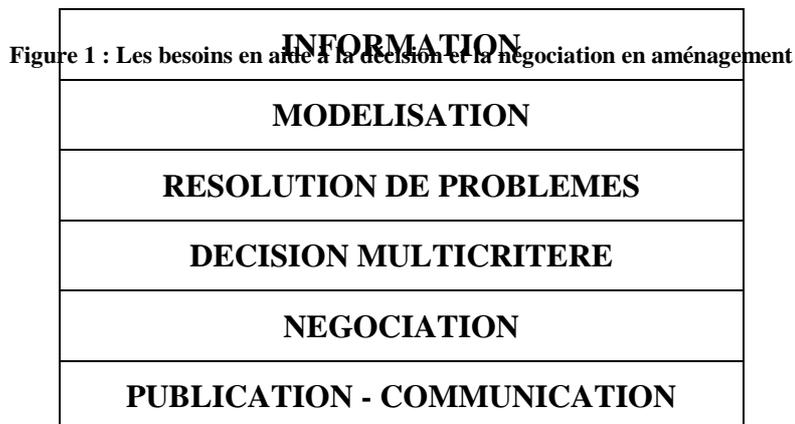
La phase de décision doit exploiter l'expertise pour déterminer les solutions préférées selon un point de vue particulier. Il s'agit donc de confronter ce qui est propre au projet à ce qui est « propre à soi ». Mais il est souvent difficile de se « faire une opinion » quand le contexte est compliqué et les critères multiples. L'aide doit donc essentiellement porter sur l'élaboration, l'évaluation, et le classement de représentations du projet. Accessoirement cela peut permettre de se déterminer relativement à d'autres solutions possibles. Par ailleurs, l'aide à la décision en tant que préparation de négociation, doit permettre d'évaluer ses marges de manoeuvre, ainsi que le contexte politique de la négociation.

La phase de négociation va confronter les positions à l'intérieur d'un processus relationnel. Il y a donc deux niveaux d'aide possible : d'une part, sur le contenu, l'objet, pour analyser comment les positions s'accordent et peuvent être adaptés, et d'autre part sur le contexte, le processus, pour déterminer la stratégie de négociation à retenir, et la mettre en place. L'aide peut être instrumentale ou personnelle.

La phase de finalisation et de réalisation est essentiellement technique, et ne nous intéresse pas ici.

3.2. Nature des besoins

Les besoins correspondants sont de six types :



La fonction **Information** concerne les activités de recherche, organisation et présentation de l'information, qu'elle soit issue de bases de données ou d'une collecte spécifique. La **Modélisation** recouvre les activités de construction de modèles c'est à dire de traductions

symboliques de *représentations particulières de la réalité* : l'information elle-même est souvent issue de modèles, et la construction de nouvelles informations composites en dépend ; la description de l'organisation de l'environnement constitue aussi un modèle. La **Résolution de Problèmes** inclut l'ensemble des activités de recherche de solution à un problème spécifié par des données et des contraintes sur la solution. La **Décision Multi-Critères** (ou plus canoniquement Aide MultiCritère à la Décision) doit permettre d'aider le choix parmi un ensemble de solutions possibles décrites par les valeurs attachées à des critères. La **Négociation** touche tous les processus relationnels entre acteurs d'une décision partagée. Enfin la **Publication - Communication** traite tous les aspects de médiatisation de l'information et son transfert entre acteurs, au niveau de sa mise en forme et du support technique.

4. Cas particulier : l'analyse des projets spatiaux et les Etudes d'Impact en Aménagement

La "prélocalisation" et les études d'impact en aménagement pour les infrastructures linéaires constituent des sujets très sensibles dans le contexte socio-politique actuel. Toutes les phases des grands projets donnent actuellement lieu à contestation par différentes parties. La procédure administrative très tôt mise en place en France (1976), n'a pas permis de réguler les conflits, et a même plus récemment suscité beaucoup d'interrogations sur les positions respectives de l'expert et du décideur [Theys & Kalaora, 1992]. En particulier la confusion entretenue dans l'identification des responsabilités et sur le rôle dévolu aux divers acteurs permet d'éclater la décision au sein d'un système de relations et processus complexes confondant régulièrement les intrants politiques et scientifiques ou techniques. Les systèmes d'information (géographiques ou non) utilisés ne paraissent pas pouvoir répondre à ces exigences d'élucidation du rôle des acteurs.

L'ensemble de ce contexte, ainsi que l'intérêt spécifique du partenaire industriel, nous ont conduit à choisir de travailler essentiellement sur les études préalables et études d'impact relatives aux infrastructures linéaires.

4.1. Situation de référence : le projet de ligne THT « BC »

Dans le cadre de la collaboration avec le bureau d'études CERREP S.A., nous avons été amené à suivre principalement un cas³ : le projet de ligne Très Haute Tension (THT) « BC »⁴. Il s'agit d'un projet qui perdure depuis presque 20 ans. La motivation finale est d'assurer la sécurité de l'alimentation d'une conurbation d'un million d'habitants. Pour cela il est nécessaire de doubler l'alimentation en THT. Il faut donc amener une ligne depuis les centres de production jusqu'à la ville. La zone globale d'étude fait environ 200 km de long sur 60 km de haut. Son centre est coupé à la fois par une très grande zone militaire, et un site naturel exceptionnel. Un autre site naturel occupe la partie est de la zone. La zone sud est très peuplée, avec un habitat diffus ; alors que la zone nord est plus éparse, avec seulement quelques villes. Le nord de la zone est assez montagneux. On trouve aussi deux lacs. L'activité agricole est essentiellement concentrée à l'ouest. Administrativement la zone couvre deux régions et trois départements. On retrouve dans ce cas tous les acteurs classiques, plus l'autorité militaire qui joue un rôle important.

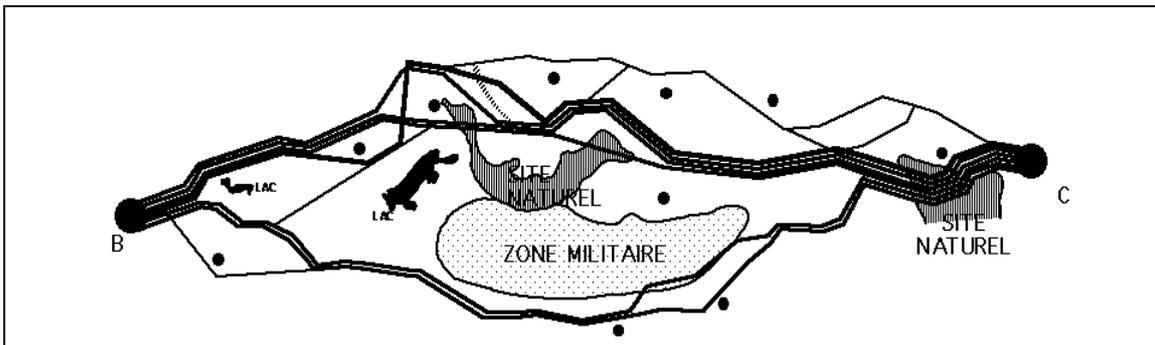


Figure 2 : Schéma succinct de la zone du projet THT "BC"

Le CERREP est intervenu sur ce projet dans une phase de contre-expertise, qui consistait, dans le cadre d'une convention entre l'état et EDF, à procéder à un contrôle des études antérieures d'EDF et à la proposition d'un ensemble de solutions possibles. Nous avons pu suivre la plupart des réunions importantes de cette contre-expertise. A son issue, le CERREP a pu proposer un ensemble de solutions documentées. L'état, représenté par la DRIRE, a fait un choix. Le projet a alors pu entrer dans une phase d'étude d'impact classique.

³ Différents cas ont été considérés, mais en définitive cet exemple a été retenu comme le plus représentatif.

⁴ Ce projet étant encore en cours de consultation, et à la demande d'EDF, nous ne pouvons le citer nommément.

A partir de cet exemple, et après discussion avec les experts, nous avons pu proposer le schéma d'analyse décrit par la suite.

4.2. Définition du problème

4.2.1 Les aménagements linéaires

Les aménagements linéaires (routes, rail, lignes électrique ou téléphone, etc.) constituent une part importante de l'ensemble des infrastructures réalisées. Ils forment le squelette de tout schéma d'aménagement du territoire, et sont représentés à toutes les échelles spatiales.

4.2.2 Impact des aménagements et Cadre Légal

Ces aménagements, en tant que construction dans un territoire, génèrent inévitablement des impacts (modifications induites) sur les divers enjeux en présence (valeurs intrinsèques préexistantes) : milieu naturel, paysage, économie, agriculture, populations, etc. Leur localisation résulte donc en un certain impact, différent (et non « pire » ou « meilleur », ce qui n'a pas de sens absolu) de celui d'une alternative. L'appropriation locale des enjeux par les acteurs sociaux conduit à des conflits d'intérêts liés aux impacts. La résolution de fait au bénéfice de certains (un acteur pouvant être une organisation) a longtemps constitué la règle. Mais l'émergence de « l'environnement » (la « nature ») en tant que patrimoine partagé et valeur socioculturelle, c'est à dire essentiellement « des-approprié », ainsi que le renforcement de la démocratie participative locale, ont conduit le législateur à contrôler et réguler toutes les constructions d'importance, en imposant des procédures administratives d'étude d'impact et déclaration d'utilité publique. Pour répondre au besoin ainsi engendré, des bureaux réunissant des « experts » issus de disciplines diverses sont apparus.

4.2.3 Etudes d'Impact

Rappelons la définition générale de l'étude d'impact retenue par Max Falque (citée dans [Simos, 1990]). Le cadre légal français est largement plus restrictif.

L'étude d'impact en environnement (EIE) est l'identification, l'organisation et l'évaluation des effets physiques, écologiques, esthétiques, sociaux et culturels d'un équipement ou d'une décision (technique, économique ou politique).

L'EIE est donc une activité très complexe, nécessitant des compétences larges, et par là-même sujette à de multiples contestations. Elle est préparatoire d'une décision.

Dans ce travail, nous nous référerons essentiellement à des études d'échelle régionale et nationale, pour des lignes électriques Très-Haute Tension (THT).

4.2.4 Données spécifiques aux aménagements linéaires considérés

On distingue deux types de contraintes sur l'aménagement : topologiques (sur l'emplacement) et morphologiques (sur la forme, en liaison avec les contraintes dites « structurales »). Un projet linéaire transrégional suppose donc d'une part la donnée de « points d'ancrages », c'est à dire de points de passage obligés. Dans le cas d'une ligne THT, il s'agit toujours au moins des deux postes extrêmes souvent préexistants. D'autres contraintes topologiques peuvent être spécifiées : passages obligés, pentes...

D'autre part, il faut préciser pour chaque type d'aménagement quelles formes sont tolérables (courbure essentiellement, et largeur des fuseaux).

Dans les cas considérés, la nature transrégionale de l'aménagement projeté rajoute un élément fondamental aux conflits d'intérêts : l'aménagement est surtout utile à des populations ne vivant pas dans le territoire qui subit les impacts. Ce caractère extra-territorial des avantages éventuels (récurrent dans les problèmes d'environnement : cf. les conflits aval-amont sur les rivières) embarrasse largement tout le processus, et conduit régulièrement à réviser le cadre spatial de l'étude et de la négociation afférente.

4.3. *Pratique Actuelle de l'Expert pour la Localisation des Fuseaux de Moindre Impact*

La procédure d'étude pour la détermination des fuseaux de moindre impact a été précisée par le CERREP en collaboration avec le CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement) de Lyon. La méthodologie retenue a été évaluée lors de nombreuses études antérieures. Elle distingue cinq phases principales qui donnent toutes lieu à validation et échange avec le décideur ou le commanditaire. Ces phases ne sont pas strictement séquentielles ; des retours sont possibles.

4.3.1 Détermination de l'aire d'étude

Dans cette phase, l'expert doit proposer l'aire d'étude, c'est-à-dire le territoire sur lequel on va rassembler des informations, produire l'expertise, et éventuellement choisir des tracés.

Cette phase est parfois négligée par rapport aux phases ultérieures, bien qu'il s'agisse d'une première *décision* très importante, puisqu'elle engage toute la poursuite du processus en le contraignant dans un cadre géographique. L'expert doit procéder à une première analyse sommaire d'un territoire très vaste, et justifier son choix par des arguments thématiques conformes aux choix ultérieurs de critères (orographie en particulier). Le critère du coût de l'ouvrage est déterminant à ce niveau, puisque l'extension conditionne les longueurs possibles. Le décideur ou commanditaire doit valider très clairement ce choix, puisqu'il est souvent remis en question par divers acteurs.

4.3.2 Expertise et cartographie thématique des enjeux,

La phase de recensement et de cartographie des enjeux constitue le fondement de l'expertise. Il s'agit d'identifier à l'intérieur de l'aire d'étude l'ensemble de tous les éléments qui font la "valeur" du territoire, soit qu'ils constituent un patrimoine au sens de De Montgolfier [1987], soit qu'ils soit l'objet d'une appropriation par des acteurs, soit enfin qu'ils aient directement une valeur économique. Les enjeux sont intrinsèquement liés à l'espace tel qu'il est, indépendamment de ce que sera l'aménagement. En particulier, on peut dans cette phase considérer *l'ensemble de tous les enjeux*, même si le projet n'a pas d'impact potentiel sur eux. Cependant, une première sélection est rendue nécessaire par les coûts de collecte. L'expert effectue une classification thématique des enjeux et produit les cartes afférentes. Les thèmes usuels sont : économie, urbanisme / habitat / population, milieu naturel (éventuellement détaillé en faune, flore, géologie, biotopes, etc.), paysage, agriculture, sylviculture, contraintes réglementaires. La cartographie s'appuie sur les fonds classiques ou sur des productions spécifiques. L'inventaire des enjeux est en principe très proche des données brutes produites par les différents services d'informations publics. Cependant, dès lors que l'on aborde le paysage ou le milieu naturel, l'expert seul peut évaluer les enjeux, à partir de travaux de terrain pour des observations et recensements, ou à partir de références à des travaux scientifiques antérieurs. La théorie voudrait que la cartographie des enjeux ne soit pas contestable ultérieurement dans le projet, dans la mesure où il s'agit purement d'une phase d'information ; mais, malheureusement, les controverses scientifiques bousculent souvent ce principe, en particulier pour les milieux naturels. La validation des cartes d'enjeux doit surtout garantir la prise en compte de tous les enjeux exprimables par les acteurs (expression de valeurs que l'on pourrait voir réapparaître ultérieurement dans le processus), et leur acceptation définitive comme base de discussion.

4.3.3 Cartographie des sensibilités par critère

La cartographie des sensibilités reste essentiellement du domaine de l'expert, mais participe déjà davantage de la décision elle-même. En effet, il s'agit, en croisant les cartes d'enjeux avec les données structurelles de l'aménagement, d'évaluer la sensibilité des enjeux (donc des "valeurs") à un impact potentiel. L'expert doit donc déterminer pour chaque point et critère le niveau de sensibilité, c'est à dire la valeur qui serait détruite si l'aménagement passait en ce point. Il intègre dans son évaluation des informations sur la "*réductibilité*" : l'existence de conditions locales particulières permettant d'envisager de réduire l'impact. Il peut aussi considérer que certains enjeux ne sont pas concernés par le projet. Il utilise en général 3 catégories d'impact (fort, moyen, faible). On comprend que ce travail soit moins objectif que le précédent, puisque l'expert opère une classification. Cette phase est ainsi plus sujette à contestation. Cependant la classification n'est pas globale : elle porte sur un point et un critère. Discuter l'impact du projet en un point pour un critère n'a pas en général d'effet sur l'ensemble de la décision. Et étendre sa critique au-delà sous-entend un autre niveau de contestation portant sur l'ensemble du processus, et donc non résoluble par l'expert.

La validation des sensibilités peut donner lieu à des modifications ponctuelles par les participants qui discuteraient des choix de l'expert.

A ce stade, le commanditaire ou décideur dispose de deux ensembles de cartes thématiques documentées donnant pour chaque critère les enjeux et les niveaux de sensibilité à l'aménagement. L'expertise scientifique et technique est terminée. Les phases ultérieures participent toutes de la décision elle-même ; en particulier elles impliquent des choix de nature "politique" et dépendent des décideurs. Elles devraient donc normalement leur être directement confiées. En pratique, comme on le voit ci-après, elles sont encore déléguées à l'expert qui est donc supposé se substituer au politique. Celui-ci transfère ainsi sa responsabilité sur un acteur perçu comme scientifique et technique, ce qui signifierait objectif et apolitique.

4.3.4 Choix des fuseaux de moindre impact

La phase suivante, dite de choix des fuseaux de moindre impact, doit produire un ensemble de fuseaux de largeur à peu près fixe (1km pour un Avant Projet Sommaire), vérifiant les contraintes morphologiques et topologiques du projet, et qui soient « préférables » aux autres options possibles. Il s'agit donc de chercher les tracés minimisant l'impact, à partir des cartes de sensibilités.

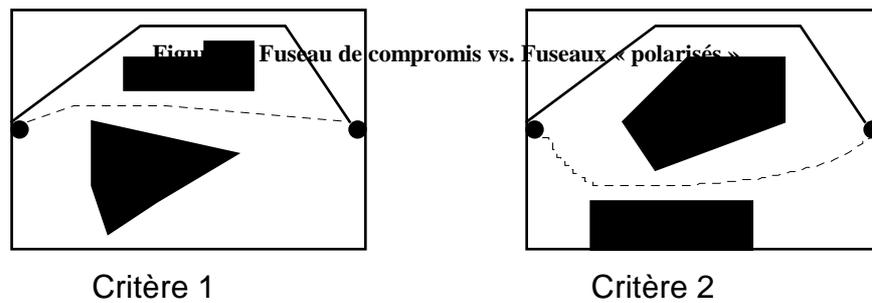
En l'état, le problème est mal posé : il manque le mécanisme d'intégration des divers critères permettant de discerner les fuseaux « préférables » (pour tout l'espace et tous les critères, et pour un acteur particulier). L'expert est donc contraint de faire un choix non justifié rationnellement. Ceci est caractéristique de la décision multi-critères : sachant qu'il n'existe pas d'ordre total sur les espaces vectoriels de dimension supérieure à 1, comment classer des solutions, et à fortiori quand on dispose d'une infinité de solutions. Ce choix est politique et se traduit par une hiérarchisation des valeurs, ce que l'on peut exprimer par un système de pondération des critères (suivant en cela la plupart des travaux de décision multi-critères [Vincke, 1989]).

Avec les seules cartes de sensibilité, il manque donc au décideur une information synthétique monodimensionnelle lui permettant de choisir. Il attend de l'expert qu'il la lui fournisse. Dans la pratique actuelle, celui-ci produit en réponse *une carte de synthèse* rassemblant les informations de sensibilité pour les divers critères sur un même plan, sans distinction d'importance. Il *sélectionne* souvent parmi les données de sensibilité. Et à partir de cette carte, l'expert détermine lui-même les fuseaux de moindre impact essentiellement en repérant les "passages blancs", c'est à dire ceux qui, toutes couches superposées, restent vierges d'impact. Ensuite en respectant les contraintes morphologiques et topologiques il les relie et en tire des fuseaux. De cette façon, l'expert a réalisé **un processus d'agrégation multi-critères implicite consistant à pondérer tous les critères au même niveau (compte-tenu de la présélection) et à appliquer une fonction d'agrégation "Max"⁵**. Le type de solutions obtenues correspond à un *compromis*, c'est-à-dire à des solutions moins bonnes que toutes les autres propositions des acteurs, mais qui ont l'avantage d'être acceptable par tous.

⁵ Ce choix n'est jamais explicité par l'expert.

En résumé, l'expert répond au mieux à la « commande » en l'absence d'information sur les orientations politiques du décideur : il fournit les fuseaux qui minimisent l'impact maximal tous critères confondus (procédure type "MiniMax"). Mais ce sont des fuseaux « apolitiques », dont le nombre est conditionné par le seuil de tolérance sur les zones grises. Et ils ne contiennent malheureusement pas toujours les fuseaux plus « orientés politiquement » que pourraient retenir certains acteurs extrémistes.

Ceci est illustré dans le schéma ci-dessous. On a la cartographie de deux sensibilités (par exemple milieu naturel et habitat) sur l'aire d'étude. Les points noirs sont les extrémités des fuseaux projetés. Les polygones noirs les zones d'impact fort. Pour chaque critère, on a en pointillé le fuseau idéal pour ce critère seul, et en noir le fuseau type MiniMax. L'expert va donner ce dernier fuseau, mais si un acteur plus « polarisé » intervient, il proposera certainement un des autres fuseaux.



En pratique, avec le seuil (implicite) de tolérance utilisé, le nombre de fuseaux proposés par l'expert est assez grand ; et on peut considérer que l'expert donne en fait *tous les fuseaux envisageables*, ce qui est formellement absurde, mais est réaliste dans la mesure du nombre limité d'acteurs rencontrés.

La validation de cette phase conduit d'ailleurs souvent à rajouter des fuseaux que l'expert n'avait pas retenus, mais qui ont paru important pour le comité au vu de la carte de synthèse⁶.

Comme nous le verrons dans le chapitre 6, cette phase a été la cible principale de notre travail, en cherchant à développer un outil qui facilite l'interaction entre le décideur et l'expert, et donne les moyens d'explorer davantage de solutions que les seuls compromis.

⁶ Ces ajouts postérieurs peuvent aussi correspondre à des évolutions dans les préférences des acteurs.

4.3.5 Analyse des fuseaux avec comparaison "intracritères".

Enfin la dernière phase d'expertise est en général imbriquée dans la précédente et consiste à documenter et quantifier l'impact des divers fuseaux proposés. L'expert donne donc pour chaque fuseau et chaque critère le linéaire d'impact fort, moyen, faible, et commente éventuellement en rappelant pour les impacts forts la nature des "points noirs" pour chaque fuseau (description qualitative des impacts). La présentation est faite sous forme d'organigrammes facilitant la lecture et la comparaison. Par exemple ici pour deux critères et deux fuseaux (toujours de longueurs différentes) :

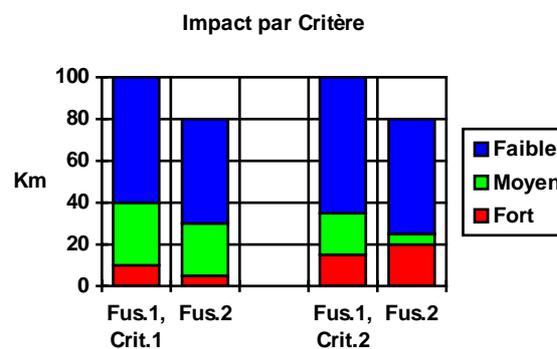


Figure 4 : Organigramme d'évaluation de fuseaux

La simple lecture de ces organigrammes permet parfois d'éliminer directement les solutions dominées, c'est à dire celles surclassées par au moins une autre pour tous les critères. La notion de "surclassement" n'est cependant pas triviale, car, comme on le voit, il n'y a pas une valeur simple par critère, mais autant que de niveaux de sensibilité. Il faut donc choisir un mécanisme de surclassement par exemple du type :

Fus1 >> Fus2 ssi

Pour tous les critères :

$L(\text{fort}, 1) < L(\text{fort}, 2)$

et $L(\text{moyen}, 1) < L(\text{moyen}, 2)$

où $L(\text{moyen}, 1)$ est le linéaire d'impact moyen du fuseau 1. Cet exemple ne prend pas en compte comme critère de surclassement la longueur totale du fuseau ; ainsi on peut avoir Fus1 >> Fus2 avec un fuseau 1 beaucoup plus long. Le critère de coût n'est pas ici pris en compte..

L'expert, en analysant ainsi les différentes solutions, oriente déjà largement les décisions individuelles. En effet, tel acteur, au vu des organigrammes, peut facilement déterminer le fuseau idéal en fonction de sa propre pondération, souvent monopolaire : pour le coût il choisira le plus court, pour un autre thème, il choisira le meilleur pour ce critère...

Il reste enfin les deux dernières phases, qui ne relèvent pas de l'étude experte :

- **Choix multicritères d'un fuseau** : ce choix peut être fait sans méthode explicite ou faire appel aux méthodes multicritères classiques [Vincke, 1989].
- **Négociation** : une négociation est initiée dès lors que différents acteurs confrontent leurs propositions en vue de parvenir à un accord mutuel.

Une description complète du processus d'expertise et de son interaction avec la décision ne saurait s'abstraire des problèmes de communication en terme de production de documents. Nous n'abordons pas ici ce thème qui se réfère à une autre problématique relative à la sémiologie cartographique et aux diverses approches "modernes" de la publication.

5. Orientation dans la conception d'un système d'aide à la décision : construction de représentations spatiales contingentes

Dès lors que l'on considère différents acteurs négociant un projet dans un territoire, seules les représentations qu'ils utilisent sont opératoires dans la décision. Nous cherchons donc à construire et illustrer ces représentations pour aider les acteurs à communiquer et à expliciter leurs différents points de vue.

Pour ce faire, nous en avons retenu quelques postulats :

1. L'instrumentation de l'accès à l'information sur le projet et son environnement n'est ici pas abordée - l'approche classique des « Systèmes d'Informations » (dont les SIG) n'est donc pas adaptée -, dans la mesure où on suppose que le rôle et la responsabilité de l'expert sont de fournir et certifier ces informations (phases 1, 2 et 3), et que ces outils doivent l'aider et non le remplacer. La question est donc déplacée vers le champ proprement politique de la décision.
2. A ce titre, et si on se réfère à la pratique décrite ci-dessus, les étapes 1, 2 et 3 restent « expertes », alors que l'étape 4 est fondamentalement politique en ce qu'elle requiert la hiérarchisation des critères. Cependant le politique s'en décharge très

largement sur l'expert qui doit procéder à une combinaison espérée consensuelle. Il faut donc expliciter et séparer les intrants techniques et politiques, et en illustrer les effets respectifs sur la décision spatiale.

3. L'instrumentation d'une décision ne se conçoit que par rapport à un acteur porteur d'un système de valeurs particulier (impliquant entre autres la « hiérarchisation » des critères). L'information utilisée comme fondement du choix provient d'une **construction dépendante du contexte**, et non d'un simple accès à des données exogènes. L'explicitation de l'intrant politique dans un outil informatique doit permettre d'explorer les possibles représentations du projet par les divers acteurs en présence. La recherche d'une représentation minimale partagée est alors envisageable, et conduit à la recherche d'un compromis.
4. La décision en aménagement du territoire étant toujours multi-acteurs, l'outil doit pouvoir replacer la décision mono-acteur dans son contexte socio-politique, et aborder ainsi la négociation. Cela suppose d'une part de prendre en compte dans la production des représentations des contraintes exogènes telles que la « territorialisation » des acteurs (variation de la capacité décisionnelle dans l'espace) ou l'existence d'intérêts spécifiques et localisés, et d'autre part de savoir modéliser et reproduire les échanges de représentations spatiales lors des négociations, en abordant leur communication et la construction des argumentaires. Ceux-ci doivent intégrer les éléments relationnels largement déterminants, ainsi que les contraintes exogènes précitées. L'outil doit ainsi permettre d'illustrer et de simuler la "co-évolution" de représentations disjointes vers une solution de compromis.

6. Conclusion

Dans le paragraphe 3.2, nous avons rapidement analysé les types de besoins d'assistance dans une décision en aménagement. Parmi ceux-ci, nous nous intéresserons plus particulièrement, d'une part à la résolution de problèmes, appliquée à l'aide à la localisation de fuseaux de moindre impact pour des aménagements linéaires, et d'autre part, à la négociation, et à sa facilitation par un outil de structuration de la communication, et d'échange d'argumentaires avec contenus spatiaux. Le cas des implantations de lignes THT sera un fil directeur tout au long de ce travail.

Chapitre 2

SYSTEMES MULTI-AGENTS ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE

Computation émergente et construction d'une intelligence collective

1. Eléments de définition

Il existe de nombreuses définitions et taxonomies afférentes à l'IAD et aux SMA [Huhns, 1987 ; Bond & Gasser, 1988 ; Demazeau & Müller, 1991 ; Pleiad, 1992 ; Ferber, 1995 ; O'Hare & Jennings, 1996], qui, pour la plupart, ne définissent l'IAD que par extension, en en donnant des composantes ou approches, alors que les « agents » et « SMA » reçoivent des définitions explicites assez variées. On définira plus aisément un objet ou un concept qu'un domaine ou un paradigme. Nous nous intéressons cependant ci-après à une définition de l'IAD, car nous souhaitons l'opposer à certains courants dans le domaine des systèmes multi-agents.

1.1. Intelligence Artificielle Distribuée

Elaborons donc rapidement une définition de l'IAD. Tout d'abord, rappelons que l'IA, est, selon la définition de Laurière [1987, p. VII], la « *discipline qui a pour sujet d'étude toutes les activités intellectuelles de l'homme pour lesquelles aucune méthode n'est a priori connue* », ou, pour Winston [1979], selon une définition assez inconsistante : « *the study of ideas which enable computers to do the things that make people seem intelligent.*⁷ » Avec la précision suivante : « *[... The goals of AI] are to make computers more useful and to understand the principles which make intelligence possible.*⁸ ». L'IAD s'intéresse alors à la sous-partie de l'IA dans laquelle l'intelligence résulte, est « mimée », ou comprise comme la combinaison structurelle d'activités ou processus plus élémentaires. Cependant, de même qu'on assimile parfois l'IA aux systèmes informatiques qui la sous-tendent, l'IAD est parfois comprise comme la « distribution » d'un système d'IA sur un ensemble de sous-systèmes

⁷ L'étude d'idées qui permettent aux ordinateurs de faire les choses qui font paraître les gens intelligents

⁸ Les objectifs de l'IA sont de rendre les ordinateurs plus utiles et de comprendre les principes qui rendent l'intelligence possible.

interdépendants. Par ailleurs, selon les termes d'une discussion déjà classique, la décomposition séquentielle d'un problème en sous-problèmes, telle qu'elle est proposée très tôt en IA, résulte en une « combinaison d'activités ou processus plus élémentaires », et entrerait donc dans le cadre défini pour l'IAD. Mais l'organisation de ces sous-problèmes ou sous-processus n'est envisagée que temporellement et selon un principe de hiérarchisation lié strictement aux enchaînements d'inférences. En revanche, la décomposition et la distribution propres à l'IAD relèvent bien de la structure du problème, avec une possibilité (et même une nécessité) intrinsèque de réaliser les sous-tâches, actions ou processus, en *parallèle*. Or, souvent, il y a un glissement entre la facilité de comprendre et produire des artefacts de l'intelligence humaine par des mécanismes distribués parallèles, et la consistance de l'hypothèse d'une « ontologie distribuable » de l'intelligence en tant qu'action. Il ne s'agit pas d'argumenter ici sur le paradigme du « traitement parallèle distribué », tel qu'il s'est développé très largement en sciences cognitives et s'est concrétisé dans les réseaux connexionistes et en IAD ; mais simplement de rappeler que, quand bien même on obtiendrait des résultats probants (une « démonstration d'intelligence ») par une approche distribuée, il ne faudrait pas pour autant en conclure qu'une telle apparence d'intelligence résulte intrinsèquement de propriétés dues à la distribution. Une analyse systématique des processus à l'œuvre peut permettre de reformuler un système d'IAD dans un cadre classique, non distribué (ceci est particulièrement vrai pour des systèmes multi-agents, qui, lorsqu'on « trace » leur processus, présentent un comportement séquentiel, les agents se succédant dans le traitement de l'information). Et dès lors, hormis pour des raisons de facilité de mise en œuvre, de robustesse, et parfois de performance, qui en elles-mêmes suffisent à justifier l'approche, il n'y a pas lieu de particulariser ce « type d'intelligence artificielle », que ce soit du point de vue du calcul (à des fins d'ingénierie), ou cognitif (à des fins de compréhension de l'intelligence humaine).

Ce prolepse étant fait, il reste précisément que l'objet caractéristique de l'IAD doit être l'intelligence spécifique d'un système distribué, celle que l'on ne peut réduire à un traitement séquentiel. Les notions clés attachées à cette forme d'IA sont « *le traitement émergent de l'information* » (« *emergent computation* » en anglais, où « *computation* » ne se réduit pas à « *calcul* ») et la *production de sens à partir de structure*. Cette déclaration d'intention nous laisse cependant dans une grande incertitude quant à la délimitation de cette « intelligence distribuée ».

Finalement, on peut ici remarquer que Jacques Ferber [1995], dans son ouvrage de synthèse, semble se refuser désormais à parler d'IAD en tant que tel, alors que tous ses travaux sont reconnus par la communauté scientifique internationale de ce domaine. Et il est conforté en cela par de nombreux autres ténors de la discipline. Ceci montre que le terme d'IAD ne satisfait pour le moins pas la communauté francophone, alors qu'il est le support des principales publications anglo-saxonnes⁹.

Nous retiendrons donc que l'IAD cherche à *reproduire les formes d'intelligence et exploiter les mécanismes de traitement de l'information qui reposent spécifiquement sur leur distribution en des formes plus simples, organisées et « co-agissantes »*.

L'alternative parfois retenue en l'absence de référence à l'IAD, est la notion d'*intelligence collective*, qui rend explicite le fait que l'intelligence d'un collectif est plus que la « somme » des intelligences des parties. Mais ce terme n'est sans doute pas satisfaisant, car il oublie le caractère *artificiel* de l'objet, en tant qu'il est une production finalisée en fonction d'objectifs de résolution de problème ou de simulation. De plus, il ne s'agit plus ici de faire réaliser à une machine des opérations qui dénoteraient son intelligence selon des critères humains, mais de parvenir à des résultats similaires à ceux de sociétés plus ou moins organisées, constituées soit d'animaux, soit d'humains. Ainsi, alors que l'IAD était à rapprocher des sciences cognitives, en tant qu'elle s'intéresse à la production et au traitement de représentations (en négligeant ici la controverse sur le "représentationnalisme") par un individu, l'intelligence collective touche aux sciences sociales, dans leur versant non individualiste. La source d'inspiration a ainsi « sauté » de l'individu au collectif. Or, si en IAD, on recherche un enrichissement mutuel entre le traitement artificiel de l'information et la compréhension de l'intelligence humaine, qui est un postulat ; dans les travaux se réclamant de l'intelligence collective, les questions portent essentiellement sur l'explicitation de cette intelligence, et son étude par la voie de simulations ascendantes visant à en reproduire les effets structurels ; mais ils ne traitent que marginalement de leur applicabilité à la reproduction de comportements intelligents par des systèmes artificiels de ce type. La vocation descriptive et compréhensive de nombreux travaux sur l'intelligence collective obère leur pertinence quant à la conception ascendante d'une intelligence artificielle dédiée à un objectif fixé *a priori*. Mais, d'un point de vue social, répondre à ce type de question reviendrait à élucider le problème de la capacité de l'acteur ou

⁹ Cela tient sans doute à notre plus forte segmentation disciplinaire, qui conduit à dénommer spécifiquement ce qui est original, et à bannir les limites floues. Le glissement entre IAD et « systèmes distribués » est une expression d'un tel risque que l'on souhaite éviter.

du pouvoir d'un individu à influencer la destinée globale de la société ; ce qui fait partie des problèmes largement ouverts en sciences sociales. L'objet intéressant l'ingénieur n'est donc pas la nature ou les « ressorts » d'une intelligence collective, mais la construction intentionnelle d'une telle intelligence dans un cadre contraint, avec une finalité donnée.

Ceci étant, et au delà de cette notion récente d'intelligence collective, dont les tenants se rapprochent plus souvent de la biologie, l'IAD n'est pas monolithique. Dans la classification historique, on admet généralement deux sous - domaines issus des orientations ou convergences des chercheurs au sein des communautés du domaine :

- **la résolution distribuée de problèmes (RDP)** : cette approche postule la donnée d'un problème, et vise à le faire résoudre par un ensemble d'entités informatiques, appelées agents, qui coopèrent ou « co-agissent » au sein d'une organisation au contrôle plus ou moins centralisé, et qui sont individuellement responsables d'un sous-domaine ou d'une sous-tâche.
- **les systèmes multi-agents (SMA)** : ce domaine suppose la donnée d'agents, et s'intéresse davantage à l'étude et la construction contingente d'un processus collectif à partir de ces agents, susceptibles de "co-agir" au sein d'un environnement commun.

Dans les communautés francophones, on oppose plus facilement la RDP et la « simulation multi-agents » ou « simulation décentralisée de systèmes » (SDS), par référence à la différence entre la donnée de tâches induisant des agents (RDP), et la donnée d'agents produisant des tâches (SDS). Ceci est parfois aussi reformulé de façon discutable en : « approche descendante » vs. « ascendante ».

Le paradoxe de la catégorisation classique (RDP vs. SMA) - ainsi que des dénominations choisies - est qu'elle donne le sentiment que les systèmes multi-agents s'opposent à la résolution distribuée de problèmes. Or, dans cette thèse, nous abordons précisément la résolution *intentionnelle* (ou construite) de problèmes complexes par un SMA. Il n'y a donc pas d'exclusive dans le champ d'application des différentes approches. La distinction provient sans doute des types de problèmes abordés. A cet égard, Ferber [1995, p. 39] introduit la notion de « *résolution distribuée de problème distribué* » pour caractériser l'application de ces techniques dans des domaines eux-mêmes distribués, et pour lesquels il est difficile d'utiliser les méthodes classiques de décomposition, ou celles recourant à un critère global dans des

approches d'optimisation. Nous intéressant à des problèmes de décision en environnement complexe, nous nous situons certainement dans un tel cadre.

Par la suite, et peut-être de façon abusive par rapport à leur définition canonique, nous nous référerons aux SMA, bien que, dans certains cas, nous partions du problème pour en inférer les agents nécessaires et les mettre en œuvre.

1.2. Quelques définitions classiques

Bond [1988], s'appuyant sans doute sur les travaux d'Hewitt [1985] et Davis et Smith [1981], propose une première définition (largement reprise depuis), qui s'appuie sur la notion de coordination : *« la recherche sur les Systèmes Multi-Agents porte sur la coordination de comportements intelligents au sein d'un ensemble « d'agents » autonomes intelligents (éventuellement préexistants), et sur la coordination de leurs connaissances, de leurs buts, de leurs compétences, et de leur plans, afin de réaliser collectivement des actions ou de résoudre des problèmes »*. En commentaire, il précise *qu'un agent est « un processus informatique ayant un unique mécanisme de contrôle et/ou d'intention »*, mais il note que cette définition est très problématique. Par ailleurs, il précise que les buts des agents peuvent être différents et interdépendants, que les agents peuvent partager des connaissances, et qu'ils doivent raisonner sur leur propre coordination, même dans des situations ouvertes, sans possibilité de contrôle ou d'information globale. Bond ne fait pas apparaître la démarche de conception en tant que telle, et admet le principe d'une modification d'agents préexistants pour les rendre « coopératifs ».

D'autre part, Ferber [1987], définit un agent comme *« une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec des autres agents »*. Cette définition, explicitement axé sur l'agent, ne fait pas référence à l'ontologie du SMA, ni à sa construction. On notera que les notions clés sont la représentation et la communication. Plus tard, Ferber [1992], indique qu'un SMA est *« un monde artificiel peuplé de processus interagissants »*, i.e. les agents. Cette dernière proposition reste imprécise, et dans son ouvrage [Ferber, 1995] il donne finalement une définition globale et constructive :

On appelle système multi-agents (ou SMA), un système composé des éléments suivants :

- *Un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.*
- *Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.*
- *Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.*
- *Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.*
- *Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O .*
- *Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.*

Il y a une différence notable entre cette définition et les précédentes, car elle fait apparaître la plupart (il n'est fait mention ni du concepteur, ni de l'utilisateur) des entités ou concepts à prendre en compte dans la définition d'un SMA ; et non les seuls agents. L'ordre et la localisation des éléments peuvent être discutés ; mais on retrouve ici un modèle descriptif global, qui suscite, de façon systématique, les questions de conception que l'on peut être amené à se poser. En revanche, il s'agit d'une définition très orientée sur les SMA « situés », et influencée par de nombreux travaux portant sur des modèles réactifs (cf. la notion « d'objet »). Comme nous le verrons, nous contestons la notion d'Objet telle qu'elle est posée, car la définition d'entités interagissantes (sujet ou objet) relève, à notre sens, de la conception d'agents. Par ailleurs, « relations » et « opérations » sont distinguées, et non des attributs propres des agents, ou du processus d'observation afférent. Cette distinction leur donne cependant un statut et une forme particulière, qu'il reste à expliciter. A tous égards, cette définition de Ferber s'inscrit dans une démarche que nous reprenons, orientée vers le travail de modélisation et de conception, et dans un cadre mettant en exergue les processus collectifs.

A titre encore de comparaison, et du fait de la proximité scientifique de son étude, nous rappelons enfin la définition proposée par Boissier [1993], qui fait des choix originaux. Il pose qu'un agent est « *un système informatique (matériel ou logiciel) placé dans un environnement qu'il est capable de percevoir, de représenter, même partiellement, et sur lequel il est capable d'entreprendre des actions. Ces dernières constituent l'unique moyen pour l'agent de signifier son existence dans l'environnement.* » La perspective est donc radicalement opposée, puisqu'elle prend l'action comme caractéristique de l'existence, alors que nous nous fondons sur l'état des agents et leur dynamique. Puis, il pose que l'environnement désigne « les autres

agents et le monde extérieur » ; ce qui réfute une ontologie unique de l'environnement, et le relativise. Enfin, *la société est « un ensemble d'agents, auxquels est offerte la possibilité d'interagir, et leurs interactions. »* Les interactions sont distinguées, mais les agents conservent une identité propre. Cette définition s'inscrit dans un certain contexte, et est sans doute adaptée à un cadre symbolique, de type « multi-experts ».

Comme on le voit au travers de ces quelques définitions, il y a différentes orientations possibles, et un choix particulier traduit, logiquement, le cadre habituel de travail, et le type de questions abordées. Nous avons souhaité, dans la proposition suivante, expliciter les enjeux de la conception, et ainsi que la dimension globale et collective dans les SMA.

1.3. Agents et Systèmes Multi-Agents : proposition de définition

Dans le cadre de recherche spécifique à l'IAD, nous considérons donc la production de systèmes artificiels « intelligents » à partir de la combinaison, coaction, structuration, d'entités plus simples que le système global, et dotées individuellement de capacités similaires. Nous refusons donc d'envisager ici de considérer comme fondement de l'approche un agent pris isolément. Notre proposition se porte alors sur le système multi-agents lui-même, dont un constituant est l'ensemble des agents :

*Un système multi-agents (SMA) est un ensemble d'entités **artificielles**, appelées **agents**, lorsque :*

- 1. elles partagent un même **environnement**, constitué de données externes au SMA, statiques ou dynamiques, mais dont l'éventuelle dynamique interne est donnée a priori, indépendamment de l'état du SMA,*
- 2. elles sont **conçues** par référence au SMA dans lequel elles s'inscrivent, et intègrent dans leur dynamique les structures cohérentes (**organisations**) et les contraintes que le concepteur souhaite préserver ou obtenir, aux différentes échelles du système,*
- 3. elles ont des **attributs d'état** dépendant de l'état du SMA, et donc, d'une part, de l'environnement (dynamique externe) et, d'autre part, des autres entités (dynamique interne), avec lesquels chacune a des **interactions**, dont la structure peut évoluer,*
- 4. elles **évoluent** en parallèle, conformément à l'organisation du SMA,*
- 5. elles peuvent avoir un mécanisme **d'adaptation** de leurs attributs et paramètres internes en fonction de l'état du SMA,*

6. *l'observation et la manipulation contrôlée du SMA par un utilisateur peut le renseigner sur certaines propriétés particulières de l'environnement ou du SMA lui-même, qualifiées alors de résultat.*

Définition 1 : un Système Multi-Agents

Revenons sur chaque point important de cette définition (qui, par nature, est un choix).

1.3.1 Les agents comme entités artificielles

Un système multi-agents (SMA) est un ensemble d'entités artificielles, appelées agents

Les agents sont des entités artificielles. Il n'est pas question ici de considérer les utilisateurs humains comme des agents¹⁰, ni, d'ailleurs, un quelconque élément naturel (animal) qui viendrait à intervenir dans une expérience. Les agents sont des artefacts, ou éventuellement des constituants d'un modèle abstrait. Mais, dans tous les cas, ils résultent de l'intention initiale d'un concepteur. Cette proposition est parfois obscurcie lorsque des agents en produisent d'autres, ou évoluent de telle façon que l'intention initiale soit dévoyée. Mais cela n'enlève rien à la responsabilité du concepteur, que ces agents « dégénérés » constituent un « résultat », au sens de l'observation (point 6), ou qu'ils participent simplement d'un état transitoire du système.

1.3.2 L'environnement comme complément découplé des agents

Elles partagent un même environnement, constitué de données externes au SMA, statiques ou dynamiques, mais dont l'éventuelle dynamique interne est donnée a priori, indépendamment de l'état du SMA

L'environnement est extérieur au SMA, et constitue une donnée. En terme de « système », il est hors de la « clôture dynamique ». Si des éléments du système évoluent de façon explicite en fonction d'autres (par opposition aux mécanismes indirects de production de l'environnement par les agents), ils prennent le « statut » d'agents. Cette propriété de séparation de l'environnement est très importante lorsque l'on s'intéresse à la convergence du SMA. En effet, tout élément découplé, et donc l'environnement, n'est pas pris en compte dans

¹⁰ Il ne faut pas confondre ici le modèle et la réalité : on peut parler d'un système multi-agents constitué d'agents modélisant des individus humains, à des fins de simulation par exemple ; en revanche, un utilisateur humain qui interagit avec un SMA n'est pas un agent dans un SMA « plus large ».

l'étude de la convergence. L'environnement est une « entrée » du système. Comment, dans une telle conception, modélise-t'on les capacités de certains agents d'agir sur l'environnement, de le modifier, et parfois simplement de l'utiliser comme vecteur des interactions internes (stigmergie) ? Cette question se pose de façon caractéristique dans trois situations couramment rencontrées dans la littérature : quand un « agent robot » déplace des objets du monde, quand un agent informationnel « publie » de l'information sur des réseaux ouverts, ou lorsqu'un agent recourt à des marqueurs inscrits dans l'environnement pour le structurer. Nous y reviendrons plus loin, mais nous donnons ici une proposition alternative.

a. L'environnement actif

Les auteurs classiques considèrent que l'environnement est modifiable par les agents, soit globalement, et sans présomption des contraintes propres à l'environnement qui pourraient empêcher ces modifications, soit en distinguant des « objets passifs » [Ferber, 1995, p. 15], subissant l'action des agents. Or, plus récemment, Ferber et Müller [1996], pour des problèmes de spécification, ont été amenés à introduire des notions « d'influence » et de « réaction », qui permettent de préciser le résultat effectif de la combinaison des actions produites par les agents, que ce soit sur les agents eux-mêmes, ou sur l'environnement. En adjoignant à l'état de l'environnement un état des influences courante, ainsi qu'une dynamique engendrant le nouveau couple *<état, influences>*, ils font de l'environnement une entité qui change et agit, en produisant de nouvelles influences. Les agents peuvent soit produire directement des influences à partir de leur perception de l'environnement (agent « tropiques »), soit prendre en plus en compte un état interne, et le mettre à jour (agents « hystériques »). Les « percepts », sont dans ce modèle, issus des influences. En bref, et hormis par le fait que l'ensemble des influences est « localisé » sur l'environnement, plutôt que distribué sur les agents, les caractéristiques dynamiques des agents et de l'environnement sont exactement similaires, chacun produisant des influences, soit à partir d'autres influences, soit à partir d'états internes, eux-mêmes mis à jour à partir d'autres influences.

Cette proximité entre environnement et agent, pour leurs parties dynamiques, incite à s'orienter vers notre proposition, dans laquelle toute entité qui accepte des entrées (influences) issues d'autres entités, est un agent. En revanche, toute entité qui ne subit aucune influence appartient à l'environnement. Un « objet passif » n'existe pas : soit il n'a qu'un comportement « balistique » et il appartient à l'environnement, soit il peut subir des influences, et alors sa

« réponse » est l'objet d'une modélisation, prenant en compte sa dynamique propre, ainsi que la nature de l'influence, quel qu'en soit l'émetteur.

b. Exemples de séparation environnement / agent

Si on revient à notre question pratique initiale, un bloc mobilisé par des « agents robots » *est un agent*. Car, son état peut évoluer en fonction des influences produites par les « agents robots ». Et la cooccurrence d'influences sera prise en compte par un mécanisme de combinaison appelant une addition quelconque, ici vectorielle.

Dans le cas de l'agent informationnel, on considère un groupe d'agents coopérant dont l'environnement est constitué par l'ensemble des informations disponibles sur le réseau. Quand un agent « publie », soit il diffuse par lui-même, et alors il s'agit simplement d'une fraction de son état interne (sa mémoire) qu'il rend accessible aux autres, soit il dépose des informations dans une base de données, dont le gestionnaire constitue intrinsèquement un agent, dans notre cadre de définition. Dans ce contexte ouvert, le concepteur ne maîtrise que ses propres agents, mais la communication d'informations particulières à l'environnement, quand elle se fait par envoi de message, suppose la prise en compte d'un service destinataire, qui, lors de la conception initiale, devra avoir été modélisé, même de façon abstraite et générique. Le concepteur, en mettant en place la fonction de communication vers l'environnement, avec une certaine finalité d'action, construit, *de facto*, pour ses agents, l'image d'agents réceptionnaires, même si les concepteurs des services concernés se sont situés dans un autre cadre. En particulier, il ne peut y avoir publication d'informations par émission intentionnelle de messages, que s'il existe des conventions plus ou moins élaborées sur le langage utilisé. Le fait de concevoir un agent informationnel dans une perspective multi-agents implique ainsi de « plaquer » sur les parties de l'environnement qui sont modifiables, l'image d'un agent. Ceci, afin que le modèle d'action de l'agent ainsi conçu soit cohérent et calculable. Cet artifice n'a rien d'exceptionnel ou de pathologique, car il s'agit simplement d'une forme de régularisation explicative (une métaphore) pour des environnements ouverts. En faisant l'hypothèse qu'il existe un agent « en face », on rend possible la mise en place de processus collectifs.

La question de la stigmergie est beaucoup moins triviale. Et pour en comprendre la finesse, on imaginera que dans un cadre multi-robots stigmergique, il existe un robot « pont » utilisé pour franchir des difficultés, ou que les robots s'organisent pour franchir les obstacles et permettre

le passage d'autres robots (il existe des espèces de fourmis ayant ce type de comportement). Si un chemin marqué passe par le robot pont, il est clair que les marques dépendent de ce robot. Dans une approche classique, l'environnement a des attributs modifiables qui vont décrire la présence de marques. Mais dès qu'il donne aux marques un comportement particulier (affaiblissement du marquage dans le temps, diffusion spatiale), afin de produire certaines formes de processus, le concepteur transforme les marques en des entités ayant une certaine activité, une dépendance aux agents, et éventuellement à l'environnement (et s'il pleuvait ?). Il n'y a pas d'opposition à en faire des agents, n'ayant pas la même complexité, le même « grain » que les agents robot, mais qui, sans doute, concourent au processus, et résultent d'une construction volontaire.

On voit dans ces exemples que le critère caractéristique du statut d'agent réside essentiellement dans la propriété 2 de notre définition : une entité du système modélisé, qui a une dynamique décrite ou construite intentionnellement par le concepteur, en fonction d'objectifs posés pour le SMA, et d'exigences de cohérence fonctionnelle, prend le statut d'agent dans le SMA. A l'inverse, l'environnement regroupe toutes les entités qui, soit ne changent pas, soit ont une dynamique découplée de l'état du SMA, et qui, par là-même, ne constituent qu'une entrée ou une commande sur la dynamique productrice de résultats.

1.3.3 De l'organisation du SMA vers les agents

*Elles sont **conçues** par référence au SMA dans lequel elles s'inscrivent, et intègrent dans leur dynamique les structures cohérentes (**organisations**) et les contraintes que le concepteur souhaite préserver ou obtenir, aux différentes échelles du système.*

Cette proposition insiste sur l'interdépendance des agents et des SMA, dès la conception. Plus précisément, on pose ici implicitement qu'on ne peut concevoir un agent particulier en l'absence de connaissance *a priori* sur le contexte (l'environnement) et les autres agents avec lesquels il sera amené à interagir. Même dans des environnements ouverts (p.e. communautés d'agents sur les réseaux), pour lesquels on n'a que de vagues notions relatives aux autres agents avec lesquels on peut interagir, il existe tout un ensemble de normes, de protocoles, de conventions, de langages, qui traduisent implicitement l'existence d'un « système social » (cf. chapitre 3) qui s'impose à tout nouvel agent. *A fortiori*, dans la plupart des situations « closes », dans lesquelles le concepteur maîtrise les types de contextes, il prend en compte, et transcrit dans la construction des agents, les représentations qu'il se fait du SMA, qu'il est en

train d'élaborer à partir de ses agents. Formellement, on peut donc considérer que le concepteur « imagine » d'abord le SMA¹¹ ; puis, il le matérialise lors de la conception des agents. Cette proposition n'est pertinente que pour le cadre de l'IAD que nous avons décrit précédemment, et dans lequel les formes et processus collectifs priment sur les capacités individuelles. Elle n'est pas universelle au sein des travaux sur les SMA, car bien souvent la construction est fondée sur un choix d'agent, qui induit mécaniquement la nature du SMA obtenu. Cette alternative est « empiriquement fondée » en l'absence de consensus sur une méthodologie générale de conception de SMA . En effet, ignorant quels agents peuvent effectivement produire le SMA attendu, on est conduit à faire des hypothèses et « essayer » un type d'agent, que l'on va raffiner par la suite dans un cycle de conception « activation - observation - correction »¹². La proposition 2 ne pose donc pas l'adéquation stricte entre le SMA « souhaité » (la référence), et celui effectivement obtenu. On reconnaît ces divergences, mais on rend explicite la primauté conceptuelle du modèle de SMA sur le modèle d'agent, et ses implications sur la démarche de conception.

Par ailleurs, dans cette proposition, on postule la donnée d'*organisations* qui, d'une part, sont initialement induites par le concepteur, et, d'autre part, s'imposent aux agents comme des schémas structurant leur dynamique. Cette hypothèse ne préjuge pas de la façon dont ces organisations sont représentées, ni comment les agents en dépendent. En particulier, on ne rentre pas ici dans le débat opposant la représentation d'organisations en tant qu'organigramme de fonctions, ou en tant que schémas d'action sociale au niveau des acteurs. On se borne, ici encore, à expliciter l'existence d'organisations *a priori*, que le concepteur impose au système. Il n'y a donc pas, dans notre approche, de SMA sans organisation, même lorsqu'elle est transcrite dans les dynamiques internes des agents. Cela n'enlève rien à la possibilité d'*auto-organisations*, c'est-à-dire de l'apparition, au cours du processus, d'organisations qui n'auraient pas été conçues à l'origine. Cependant, du fait même que l'on ne maîtrise pas systématiquement la production des formes collectives à partir des structures d'agent, la délimitation entre structures issues des organisations plus ou moins explicites posées *a priori*, et structures auto-organisées apparues *ab nihilo*, est un sujet très controversé que nous ne développerons pas ici [Jean, 1997].

¹¹ Le terme anglais « design » traduit d'ailleurs mieux cette proximité entre conception et création

¹² Ceci est la source de nombreuses critiques de la part des autres communautés en informatique.

L'organisation posée par le concepteur a deux dimensions principales : d'une part, ce que le SMA doit respecter tout au long de son évolution, que nous appellerons la « règle », et d'autre part, ce qu'il doit atteindre au terme du processus, « l'objectif ». Pour que le SMA soit réalisable, il faut que l'objectif soit « conforme » à la règle. En pratique, la règle est généralement suffisante pour spécifier l'organisation, car l'objectif est une forme particulière, attractive au sens de l'évolution du SMA. Pour le concepteur, le respect de la règle, pour peu qu'il sache la transcrire dans les dynamiques des agents, revient à contraindre l'évolution de façon instantanée, sans présomption de l'évolution. En revanche, l'organisation « objectif » nécessite une planification ou une optimisation qui va diriger la dynamique. Le cas des jeux est exemplaire : la règle est une organisation qui détermine la classe des structures acceptables à chaque instant ; l'objectif est une organisation particulière, que le processus ne peut atteindre directement, et qui doit permettre de contrôler le choix parmi les structures acceptables.

Enfin, bien que dans le vocabulaire « social » classique, la notion d'organisation s'applique essentiellement à l'action sociale et la structure des relations entre individus, pour les SMA, la notion d'organisation doit être étendue aussi aux interactions entre les agents et leur environnement. L'organisation va ainsi caractériser les formes de relation que les agents vont entretenir non seulement entre eux, mais aussi avec les données externes.

1.3.4 Définition et dynamique des états d'agents

*Elles ont des **attributs d'état** dépendant de l'état du SMA, et donc, d'une part, de l'environnement (dynamique externe) et, d'autre part, des autres entités (dynamique interne), avec lesquels chacune a des **interactions**, dont la structure peut évoluer.*

On se situe ici clairement dans un formalisme d'état, qui permet, au choix, de raisonner sur des agents « réactifs » ou « cognitifs », comme nous le verrons plus loin. L'état d'un agent est défini par un ensemble d'attributs, dont les caractéristiques structurelles définissent des classes d'équivalence pour les agents. Les « types » d'agents sont ici donnés par les ensembles décrits par les attributs.

L'état d'un agent va évoluer au cours du processus, selon trois dynamiques concurrentes : **une dynamique « balistique »** indépendante de toute interaction, **la dynamique interne** due aux interactions avec les autres agents, et **la dynamique externe** avec l'environnement. Hormis la balistique, les dynamiques dépendent des interactions, qui donnent à chaque instant les

informations issues des agents ou parties de l'environnement qui « agissent » sur l'agent sujet. Dans notre proposition, une interaction n'est pas une action, au sens d'une modification de l'état induite par une entité extérieure à l'agent ; les interactions sont **l'expression de dépendances**, c'est-à-dire de l'existence de facteurs externes susceptibles de modifier l'état. Cette approche des SMA traduit un concept récurrent dans la littérature, mais que nous avons volontairement occulté jusqu'ici : l'*autonomie*. En effet, en décrivant les agents comme des « machines à état », qui prennent en entrée leur propre état, mais aussi des informations issues d'interactions avec les « autres » et l'environnement, on pose que l'agent contrôle son évolution, et reste éventuellement dans le cadre des contraintes posées par le concepteur. L'action physique d'un agent sur un autre se traduit ainsi par l'existence d'une interaction particulière que l'agent cible va prendre en compte dans sa dynamique, et non, comme dans un modèle mécaniste classique, par la modification « de l'extérieur », de l'état de la cible. De même, la production d'un message de A vers B est une modification spécifique de l'état de A (plus précisément de la partie « publique » de son état), qui, pour B, en interaction avec A à ce moment là, se traduit par une entrée pour sa propre évolution. Cette approche suppose l'intégrité du modèle conceptuel, car il faut que tous les agents actualisent effectivement les interactions ; mais elle permet une approche cohérente de l'autonomie, et, surtout, chaque agent devient le moteur de sa propre évolution, selon la règle et l'objectif posés par le concepteur.

Dernière caractéristique des interactions dans les SMA : leur structure peut évoluer en fonction de l'état du SMA. Formellement, on peut considérer (comme on le fait pour les « poids de connexion » dans les réseaux de neurone) que la structure des interactions est une composante de l'état. Elles ont donc une dynamique posée par le concepteur selon la règle et l'objectif. La situation la plus classique est celle dans laquelle l'agent est localisé dans l'environnement, et est alors en interaction avec son voisinage dans l'environnement. Mais on peut aussi citer l'exemple du mimétisme qui impose que les interactions internes se fassent avec les agents qui sont « proches de soi » (quelque soit la distance sous entendue). Comme le concepteur détermine à l'avance la dynamique de la structure d'interaction, il est clair que cette dynamique participe largement des propriétés des SMA. Elle en constitue d'ailleurs une caractéristique distinctive par rapport à la plupart des autres classes de réseaux d'automates.

1.3.5 Un processus parallèle

Elles évoluent en parallèle, conformément à l'organisation du SMA.

Jusqu'à présent, nous n'avons pas fait référence au mode d'activation des différentes dynamiques. Or, si, comme nous l'avons rappelé dans la définition de l'IAD, il est acquis que les agents évoluent en parallèle, le processus peut largement varier selon l'enchaînement des actions. De plus, on travaille le plus souvent sur des machines séquentielles sur lesquelles il faut simuler le parallélisme. Il y a donc d'une part une nécessité d'explicitation et de prise en compte de la dynamique parallèle, mais aussi, d'autre part, un risque de confusion entre les problèmes d'implémentation et les attributs propres de la dynamique du SMA. Si on fait abstraction de l'implémentation, il reste que depuis l'enchaînement des différentes dynamiques « à l'intérieur » d'un agent, jusqu'à la succession des actions de différents agents au sein du SMA, il y a de nombreuses options possibles. Mais, en fonction des organisations que le concepteur a prévu, les schémas sont souvent très contraints. Par exemple, dans une organisation hiérarchique qui abstrait ou simplifie quand on monte dans la hiérarchie, il est inutile que les agents « haut-placés » activent leurs interactions « vers le bas » tant que celui-ci n'a pas été mis à jour. De même, si la structure interne prime sur la dynamique externe, on peut rendre séquentielles les phases de mise à jour interne et externe. En résumé, si les organisations déterminent les dynamiques, elles contrôlent aussi les activations. Et le concepteur doit donc les expliciter.

1.3.6 Des agents adaptatifs

*Elles peuvent avoir un mécanisme **d'adaptation** de leurs attributs et paramètres internes en fonction de l'état du SMA.*

Nous avons déjà évoqué la dynamique de la structure d'interaction, mais, afin que les agents puissent s'adapter plus efficacement à des environnements changeants, certains systèmes recourent à des agents dont les dynamiques d'activation sont elles-mêmes modifiables. Nous n'insisterons pas ici sur les questions relatives à l'adaptation ou à l'apprentissage ; mais nous rappelons seulement que, dans un SMA, la flexibilité, et donc l'adaptabilité éventuelle, sont « localisés » à différents niveaux : soit à « l'intérieur » même des agents, en tant que possibilité de modifier les dynamiques propres à chacun, soit « entre » les agents, en tant que reconfiguration ou réorganisation des processus collectifs. Cependant, en dernier ressort, il s'agit toujours d'une modification des agents, qui se différencie selon que l'adaptation est individuelle ou collective. De même, le « producteur » de cette adaptation peut être soit l'agent lui-même, soit un ensemble d'agents suivant une stratégie collective, soit l'utilisateur.

On notera ici que, en général, un agent isolé n'a pas accès à une information descriptive de l'état d'ensemble du SMA. Son adaptation traduira donc toujours un état local, selon les modalités d'interaction qui lui sont propres. Ceci justifie, entre autres, l'utilité de processus collectifs permettant d'élargir l'accès à l'état global du système.

1.3.7 Observation et contrôle du SMA

L'observation et la manipulation contrôlée du SMA par un utilisateur peut le renseigner sur certaines propriétés particulières de l'environnement ou du SMA lui-même, qualifiées alors de résultat.

On aborde ici la dernière partie de la proposition, dans laquelle on introduit un facteur essentiel de la fonctionnalité d'un SMA, mais qui est malheureusement souvent occulté : *l'utilisateur*. Nous avons déjà insisté sur le rôle du concepteur, mais celui-ci, dès que l'on sort d'une stricte perspective de recherche, n'est pas l'utilisateur de « son » système. Lors de la conception, il cherche à obtenir un certain comportement, qui présente des régularités suffisantes pour être exploitables pour des environnements changeants, puis, il « remet les clés » à un utilisateur qui a une représentation (une image mentale) différente du problème, du système, et de l'état d'avancement du processus. Et la conception doit intégrer ce facteur.

a. Observation d'un SMA par l'utilisateur

En particulier, du fait de sa complexité intrinsèque, mais aussi du caractère global de son fonctionnement, un SMA doit être muni d'un processus d'observation, qui en donne une représentation utilisable par rapport à l'objectif fixé. Dès lors que l'on travaille avec plusieurs agents, et qu'il s'agit réellement d'un SMA, il devient inopérant de suivre en parallèle, et sans présentation partagée, les dynamiques individuelles des agents. Dans le cas où les agents sont plongés dans une espace topologique, la représentation au sein de cet espace est une solution « naturelle » ; mais quand il n'existe pas de tel support, il faut choisir une « projection » qui illustre les interrelations et la structure globale. A cet égard, l'utilisateur est lui-même un instrument du processus, car la production du sens ou la traduction symbolique de l'état du système, résultent, la plupart du temps, de l'interprétation par l'utilisateur de ce qui lui est présenté.

b. Dimensions d'observation

En matière d'utilisation des SMA, il est difficile de généraliser, mais on peut cependant retenir quelques dimensions d'analyse :

- Le SMA est-il supposé converger, c'est-à-dire atteindre un état stable dans le temps ? ou, est-ce son évolution elle-même qui est l'objet de sa construction ?
- Existe-t'il une hiérarchie de signification ou d'importance entre les agents, c'est-à-dire y-a t'il des agents qui sont exploités par d'autres, mais qui ne sont pas représentatifs de l'état « observable » du système ?
- L'état des agents est-il signifiant individuellement, ou est-ce la structure globale qui est pertinente ?
- Le système est-il sensible à l'initialisation ? Celle-ci est-elle imposée par la donnée de l'environnement ?
- Peut-on « mesurer » l'état du système de telle façon que cette mesure soit suffisante pour son exploitation, et permette de s'affranchir de l'observation directe du SMA ?

L'analyse en fonction de ces questions doit permettre de déterminer le type de processus d'observation qu'il faut mettre en œuvre, depuis une forme distribuée, directe (p.e. une « carte » des agents), jusqu'à une forme synthétique, abstraite (p.e. un indice numérique unique de distance à l'objectif, ou un codage grammatical). Le concepteur, qui fournit l'interface du SMA, va donc avoir non seulement un modèle du fonctionnement de son SMA, mais aussi un modèle de la perception de son SMA par l'utilisateur. Et ce modèle, pour que le SMA soit « efficace », doit induire une interface qui évite les mauvaises interprétations quant à la dynamique du système.

c. Contrôle par l'utilisateur

Par ailleurs, si certains SMA sont « autonomes », au sens qu'ils peuvent produire *automatiquement* un résultat (une forme observable) à partir d'un environnement, le plus souvent, l'utilisateur reste « dans la boucle » pour spécifier ce qu'il recherche, pour ajuster en fonction de l'état du processus, ou parce que le SMA est exploité itérativement pour identifier un modèle (cas des simulations). L'interface est donc naturellement « bidirectionnelle ». Les points d'entrée possibles pour l'utilisateur sont multiples :

- Tout d'abord l'environnement, qui est l'entrée principale ou la commande, lorsqu'il existe et est accessible. Sa modification entraîne en général une reconfiguration du

SMA, qui, observée par l'utilisateur, traduit l'abstraction de nouvelles caractéristiques par rapport à l'environnement précédent.

- Puis tous les paramètres internes des agents, qu'il s'agisse des dynamiques, des schémas d'interaction, ou des critères de stabilité. Leur modification est plus sensible par rapport au système initialement conçu. Un SMA « stable » au sens de sa conception, et utilisé comme outil de traitement de l'information de l'environnement, ne devrait que marginalement être modifié par l'utilisateur dans ses paramètres internes. Les variables accessibles dans ce cas se limitent le plus souvent aux variables collectives (nombre d'agents, organisation). En revanche, lorsque le SMA est utilisé comme outil d'exploration de dynamiques complexes, et sert à identifier des modèles, alors l'ajustement se fait précisément sur les dynamiques locales, en fonction des formes globales obtenues. Le cas des « agents assistants » ou « agents interfaces » est particulier, dans la mesure où ils maintiennent en permanence une représentation interne de l'utilisateur. Mais il n'y a pas de différence fondamentale avec un autre système de croyance, et le contrôle par l'utilisateur transite par la modification soit indirecte de l'environnement, soit directe via une entrée explicite.
- Enfin, le processus et la structure même du SMA peuvent être modifiés ; mais dans ce cas, l'intégrité du SMA par rapport aux intentions du concepteur n'a plus grand sens, et l'utilisateur devient, de fait, "co-concepteur" du SMA. Dans ce cas, il s'agit plutôt d'un outil de développement de SMA, que d'un SMA en tant que tel.

d. Relations entre utilisateurs

Comme nous l'avons dit en préalable, les agents sont des entités artificielles ; et donc, malgré la tentation d'une vision unifiée des SMA, l'utilisateur ne peut être considéré comme un agent. En revanche, et en particulier pour les agents « informationnels » ou « communicants » sur les réseaux ouverts, l'ensemble des « autres » utilisateurs peut être considéré comme une partie de l'environnement du SMA ; car, même s'ils varient dans le temps, ils constituent une entrée du processus. Le statut de l'utilisateur « cible » est différent, car il accède au SMA, qui accède à l'environnement, qui inclut les autres utilisateurs. Du point de vue du concepteur, il y a bien deux types de modèles : un utilisateur « client », et un ensemble d'autres utilisateurs « sources ».

1.3.8 Finalité du SMA

Enfin, et pour conclure les commentaires sur cette définition, nous rappelons qu'un SMA est conçu en fonction d'un résultat attendu. Et il existe essentiellement trois finalités possibles pour un SMA :

1. la résolution de problèmes, au sens classique en Intelligence Artificielle ;
2. l'analyse et la gestion de systèmes complexes, par un processus de modélisation, simulation, analyse, adaptation ;
3. l'exploitation et la gestion de systèmes d'informations, et en particulier, dans le contexte des réseaux ouverts, l'aide à l'information et la communication décisionnelle.

L'organisation des différentes composantes conceptuelles d'un SMA énoncées précédemment, est fonction de la finalité retenue parmi celles-ci. Mais, dans tous les cas, la conception doit expliciter la nature des résultats attendus, et en particulier déterminer le statut objectif du SMA, qui peut être soit un outil intermédiaire, soit l'objet même du processus, en tant que modèle explicatif analogique. Les grandes problématiques classiques des SMA, comme, par exemple, la coopération, la planification collective, la répartition de ressources, la négociation, l'apprentissage, le contrôle distribué, ou le partage de connaissances, ont ainsi des traductions et des implications différentes selon la finalité du système, et les phases de conception ou d'utilisation. Dans cette thèse, nous nous efforçons de distinguer clairement les modalités conceptuelles en fonction de la finalité du système conçu, et d'en inférer des stratégies de conception.

En résumé, pour peu que l'on aborde les SMA en les réintégrant dans leur processus de conception, de réalisation, et d'utilisation, on obtient un cadre élargi par rapport aux modèles classiques, qui ne décrivent souvent que des architectures d'agent et leur propriétés. Mais cette démarche est nécessaire lorsque, comme c'est le cas dans le domaine d'application de cette thèse, le SMA doit prendre place comme un intermédiaire au sein d'un processus social « réel ».

1.4. Quels « Agents » hors des systèmes multi-agents ?

1.4.1 Des agents partout...

On remarque que le vocable « agent » devient omniprésent dans les différents domaines de l'informatique, et en particulier pour les systèmes d'information et les réseaux ouverts. On

parle d'agent « informatique », d'agent « intelligent », d'agent « logiciel », d'agents « informationnels », d'agent « assistant », etc. Et il existe de très importantes conférences réunissant les chercheurs se reconnaissant dans ce cadre (« PAAM », « Intelligent Agents »), ainsi que des systèmes commerciaux dont l'intitulé inclut le terme « agent ». En volume, ils dépassent les conférences classiques du domaine SMA et IAD. Mais les références explicites à l'Intelligence Artificielle Distribuée, et plus encore aux SMA, sont rares. Même si la proximité n'est que lexicale, on peut s'interroger sur les propriétés de ces agents sortis du cadre multi-agents.

Objectivement, le lien existe lorsque ces agents présentent des propriétés reconnues comme caractéristiques dans les définitions d'agent en IAD : existence d'une finalité plus ou moins explicite, capacité de communication, existence de connaissances sociales et sur l'environnement, mise en place de processus coordonnés avec d'autres. Ces agents constituent l'évolution naturelle de différents domaines cohérents, suscitée par les besoins des réseaux ouverts (Internet). Mais il y a cependant souvent un « glissement de sens » pour tous les programmes ou processus dont les interactions se limitent à accepter des requêtes de leur utilisateur, puis à les réaliser en interrogeant différentes sources d'information ou en exploitant des capacités propres, et enfin à communiquer les résultats. A cet égard, il ne s'agit de rien de plus qu'un logiciel communicant. Le « statut » d'agent est reconnaissable dans des termes proches de l'IAD, lorsque, pour atteindre ses buts (fixés par l'utilisateur), l'agent fait appel à sa connaissance des autres agents, et communique avec eux pour exploiter les informations qu'ils détiennent. En particulier la dynamique peut être qualifiée de multi-agents lorsqu'il y a élaboration d'une action collective en vue de la réalisation de buts.

1.4.2 Conception « orientée multi-agents » vs. « orientée agent »

En terme de conception, il faut distinguer deux cas : soit un concepteur unique (que ce soit un individu ou une organisation *ad hoc*) développe différents agents et les diffuse pour qu'ils soient exploités par différents utilisateurs, et mis en interaction entre eux, pour produire ainsi une plus-value collective ; soit différents concepteurs, non coordonnés, développent indépendamment des agents, qui, par le jeu des réseaux ouverts, peuvent être amenés à interagir, et éventuellement à coopérer. Dans le premier cas, le cadre de conception est contrôlé. Le concepteur développe *de facto* un SMA qui a la particularité d'avoir plusieurs utilisateurs connectés, et dont la « structure sociale » peut évoluer au gré des besoins des

utilisateurs. Les questions afférentes ont alors surtout trait aux organisations dynamiques, et la sélection de partenaires.

En revanche, dans le deuxième cas, le cadre d'utilisation du ou des agents est *a priori* largement inconnu, surtout par rapport aux agents avec lesquels on pourrait être amenés à interagir. Il faut donc alors travailler dans deux directions : d'une part raisonner sur la construction incrémentale et adaptative d'un modèle des autres, et d'autre part, élaborer des référentiels partagés par tous les concepteurs, pour la communication et les modèles d'agents. A l'heure actuelle, ces référentiels se limitent aux normes de bas niveau exploitées sur les réseaux : formats de requêtes et formats de fichiers échangés. Mais il ne s'agit pas là du type de normes correspondant aux « grain » des modèles d'agents : il faudrait disposer de langages permettant aux agents de se décrire eux-mêmes et d'interroger les autres sur leurs compétences, souhaits et activités. Il existe déjà des éléments (KQML, introspection dans Java Beans, FIPA), mais pas de normes reconnus par tous. Relativement à la définition que nous avons proposée pour les SMA, ce cadre revient à remplacer le « concepteur » par un collectif de conception, dont la coopération n'est pas acquise *a priori*. La démarche doit alors organiser cette incertitude...

Cette situation interpelle les recherches sur les SMA de façon très aiguë, en suscitant des questions jusque là peu abordées, comme l'interaction entre les modèles internes des agents et des SMA et la structure d'un processus global inconnu, ou les finalités multiples qui donnent lieu à leur conception. Différents « agents » sont produits et diffusés par des équipes ou des sociétés qui ignorent totalement les travaux antérieurs du domaine, et appuient leur indéniable intérêt intrinsèque sur la qualité des interfaces, les mécanismes de communication et d'exploitation de bases de données, ou des moteurs d'inférence classiques. En réponse, les travaux sur les SMA et plus généralement en IAD, doivent se focaliser sur les processus collectifs, les représentations partagées, les processus de réorganisation et de « socialisation », et, au delà, sur les perspectives d'évolution des systèmes lorsque le nombre d'agents devient très important, et que cette « société globale des agents intelligents » prend une certaine autonomie, et fait éventuellement apparaître des propriétés émergentes (regroupements fonctionnels, conventions, encombrements) non prévues par les concepteurs individuels des différents agents.

2. Evolution du domaine

Pour un historique complet de l'IAD, on se reportera utilement à [Ferber, 1995, pp. 29-36], [Bond & Gasser, 1988], et [Chaib-Draa *et al.*, 1992]. On notera simplement que, comme nous avons pu l'évoquer dans le paragraphe précédent, la spécificité des recherches en IAD s'est peu à peu évanouie, avec une convergence de nombreux travaux en IA ou informatique classique vers des problématiques de multi-expertise, d'échange, de coordination, de confrontation, et l'expansion des travaux en IAD dans de nombreux domaines d'application non spécifiques.

Par rapport au thème général de cette thèse, nous retiendrons deux aspects :

- les systèmes multi-agents ont, relativement tôt, été utilisés à des fins d'aide à la décision, dans des contextes distribués, et pour des environnements complexes.
- la convergence avec les sciences des organisations, ou les sciences de gestion, au départ aux Etats-Unis, et de plus en plus en Europe.

3. Que distribue t'on ?

Selon Bond & Gasser [1988], la distribution peut concerner :

- l'action sur le monde, qu'elle soit spatiale ou temporelle,
- les points d'intérêts considérés par les agents,
- l'autorité,
- la crédibilité,
- les interprétations,
- la connaissance,
- la perception,
- la fiabilité,
- les ressources,
- les valeurs (utilités),
- l'activité.

Dans la définition que nous avons retenue (Définition 1, p. 60), qui prend en compte explicitement le concepteur et l'utilisateur, on peut aussi envisager de distribuer l'observation du système, son contrôle ou paramétrage, et la démarche même de conception.

Nous verrons plus loin que, dans un cadre réactif, on peut tout distribuer puisque l'agent « atomique » peut être très petit, mais la complexité de la conception et du contrôle sont alors en rapport. En revanche, dans un cadre cognitif, symbolique, la distribution est contrainte par l'architecture « logistique » qu'il faut impérativement mettre en œuvre pour chaque agent, afin de lui permettre d'assurer une communication par message, et le raisonnement symbolique.

4. Les questions posées par la conception d'un SMA

A partir de notre définition initiale d'un SMA (Définition 1, p.60), on a, en regard de chaque caractéristique du modèle, les questions afférentes :

0. **Finalité du SMA** : quel résultat est attendu ? que cherche t'on à étudier ? Ces questions apparemment triviales doivent souvent être considérées avec attention pour bien discerner l'objectif de la méthode.
1. **Définition de l'environnement** : où s'arrête l'environnement du SMA, quelles sont ses caractéristiques structurelles et dynamiques ? Respectivement, quels sont les agents ?
2. **Conception locale relative à un objectif global** : quelle individualisation, structure et dynamique donner aux agents, en fonction de l'objectif général du SMA ? Comment structurer et activer les organisations ? Comment spécifier localement les contraintes ? Comment hiérarchiser et « récursifier » le système ?
3. **Choix d'un modèle interne, d'une représentation d'état, et des dynamiques** : quel espace d'état ou langage utiliser pour représenter l'état interne des agents ? Quelle dynamique et contrôle de la dynamique ? Quelle composition des dynamiques ?
4. **Structure et contrôle des interactions** : comment décrire les interactions ? Quelle dynamique leur donner ? Quelle structure et évolution ?
5. **Activation individuelle et collective** : quel ordre dans les activations des dynamiques internes d'un agent ? Quel enchaînement ou dépendances dans les actions des différents agents ou groupes ? Quel lien avec les organisations ?
6. **Adaptation** : quelle capacité d'adaptation, d'évolution, d'apprentissage, individuel ou collectif mettre en œuvre pour optimiser le résultat ? Comment permettre aux agents d'observer l'état du système pour s'adapter ?
7. **Observation et contrôle du SMA** : quelle représentation donner du SMA pour un utilisateur ? Quels outils de « mesure » de l'état ? Quelles aides au contrôle ? Quels paramétrages ? Quels critères d'arrêt ?

5. Différentes approches des SMA

La question 3 de l'inventaire précédent porte sur le choix d'une représentation d'état, et des dynamiques associées. En pratique, on peut, catégoriser les SMA en fonction de la complexité et de la nature des modèles internes, avec la classique distinction réactif / cognitif, mais aussi selon que l'agent a, ou non, une mémoire d'état, et selon le « volume » relatif des attributs statiques (contraintes structurelles, paramètres externes) par rapport aux attributs dynamiques.

Tout d'abord, indépendamment de la distinction « Résolution Distribuée de Problèmes / Systèmes Multi-Agents » déjà évoquée, il existe deux grandes classes de SMA, et plus précisément deux types d'agents, classiquement appelés « cognitifs » et « réactifs ». Ces deux catégories trouvent leur origine dans les disciplines ou les modèles de référence qui les ont suscité.

5.1. *L'approche cognitive*

En premier lieu, au début des années 80, et dans la lignée des « systèmes experts » et de l'Intelligence Artificielle classique, des chercheurs ont proposé de distribuer les tâches de résolution entre différents modules organisés. Cette approche a lancé la mouvance « cognitive », qui fonde sa spécificité sur le recours à des connaissances explicites, exprimées sous forme symbolique, au moyen de règles, et sur la généralisation du raisonnement à base de logique, appliqué à toutes les actions réalisables par un agent. En particulier, le modèle cognitif suppose classiquement l'existence de représentations de l'agent par lui-même, des autres, de l'environnement, des processus en cours, ou de l'utilisateur. Afin de pouvoir gérer globalement ces ressources symboliques, chaque agent dispose d'un mécanisme d'inférence qui met à jour l'état de l'agent. Inscrit dans un cadre symboliste, ces approches s'appuient sur des considérations anthropomorphiques proches des sciences sociales et des sciences de la communication ; et, lorsqu'elles considèrent le groupe d'agents, elles se réfèrent directement à la sociologie ou aux sciences des organisations. Du fait du volume de connaissances nécessaires pour maintenir la viabilité des agents ainsi que leur satisfaction, les agents cognitifs constituent, en général, des entités informatiques assez importantes ; et leur complexité individuelle est déjà forte. En conséquence, un SMA cognitif rassemble

habituellement un *petit* nombre d'agents. Cependant, cette dernière caractéristique tend à évoluer avec l'apparition des SMA distribués sur les réseaux ouverts¹³.

5.2. L'approche réactive

En second lieu, et plus récemment, le paradigme « réactif » s'est développé en défendant l'hypothèse que les agents ne doivent pas nécessairement être individuellement « intelligents », et donc complexes, pour que le SMA, dans son ensemble, soit lui-même « intelligent ». En particulier, la construction de SMA peut se faire à partir d'agents au comportement « sensori-moteur », « réactifs » à l'environnement, et ne disposant d'aucune représentation explicite, sous forme logique, de leur environnement et des autres agents. Les sources d'inspiration de cette approche varient selon la culture initiale des chercheurs. Et on peut citer de nombreuses influences, elles-mêmes interdépendantes, par exemple : les réseaux connexionistes, la vie artificielle, l'étude des capacités calculatoires des systèmes complexes (« Emergent Computation », [Forrest, 1991]), l'éthologie, l'écologie, la recherche opérationnelle, l'automatique des systèmes distribués, la reconnaissance de formes. Tous ces domaines s'intéressent au passage du « local au global », et éventuellement, à la construction de systèmes finalisés. La référence omniprésente reste cependant l'éthologie, avec l'incontournable exemple de la fourmilière [Bonabeau & Theraulaz, 1994]. Du fait de la simplicité des agents, et pour des raisons non encore bien explicitées (en l'absence de travaux sur « l'échantillonnage » d'un SMA), les SMA réactifs sont constitués d'un grand nombre d'agents.

En résumé, nous relèverons la proposition suivante [Ferber, 1995, p. 24] : « l'agent réactif contient une connaissance compilée des actions à effectuer. [...] La simplicité de ses comportements témoigne plus de l'intelligence des concepteurs que de la sienne propre. ».

5.3. Agents téléonomiques ou réflexes

Erceau & Ferber [1993] proposent de raffiner cette distinction réactif / cognitif, en raisonnant, de plus, par rapport à l'existence ou non d'un but explicité dans les agents. Cela induit la catégorisation suivante :

¹³ Malgré tout, la taille réelle des graphes d'interaction est limitée par les contraintes de communication : tous les agents du Web ne sont pas en interaction entre eux au même moment.

Relation au monde Conduites	Agents cognitifs	Agents Réactifs
Téléonomiques	Agents intentionnels	Agents pulsionnels
Réflexes	Agents « modules »	Agents tropiques

Tableau 1 : Classification des agents selon Erceau & Ferber [1995]

Mais cette classification nous paraît discutable, non dans sa discrimination, mais dans le recouvrement du domaine qu'elle réalise. Tout d'abord, comme le signale Ferber [1995, p. 22], les agents « modules » ne sont, en fait, pas des agents, mais plutôt des opérateurs ; et à cet égard, ils peuvent être soit fondus dans l'environnement, soit fondus dans d'autres agents. Par ailleurs, l'absence de finalité supposée dans les agents « tropiques » nous semble un leurre, car l'intention existe dans la construction qui est faite par le concepteur. La difficulté provient de la difficulté de rendre explicite le but de l'agent. Pour cela, il faut distinguer le but objectif de l'agent, qui est posé plus ou moins intentionnellement par le concepteur, du but subjectif, qui est une construction interne de l'agent, qui « légitime » un comportement ou sert de rationalité.

Le fait qu'il existe une composante des attributs d'état qui soit utilisée pour le codage du but de l'agent, et qui est ainsi rendue accessible, est un critère plus significatif. Par ailleurs, cela induit directement une autre distinction possible selon l'existence d'une anticipation : y-a t'il construction au sein de l'agent d'un état prévu, qui n'est pas actualisé, mais constitue une référence pour l'action ?

5.4. Une alternative au dilemme réactif / cognitif

Il existe un débat récurrent sur la pertinence de la distinction réactif / cognitif. Et, de plus en plus, on assiste au développement de systèmes hybrides intégrant conjointement des agents réactifs et des agents cognitifs. Par ailleurs, même parmi les « adeptes du réactif », il n'y a pas consensus sur la délimitation. Ainsi, même si nous ferons référence à ces catégories par la suite, en raison de leur large reconnaissance, nous proposons les dimensions de catégorisation suivantes :

- **type d'attribut d'état** : connaissance exprimée sous forme linguistique, catégories qualitatives discrètes, paramètres quantitatifs, compositions de ces formes
- **type de mise à jour** : inférence logique ou calcul mathématique
- **extension temporelle de l'état** : existence d'une mémoire des états antérieurs, prédiction d'état, système réflexe pur (pas de bouclage sur l'état)

- **représentation explicite de l'état des autres ou de l'environnement** : existence pour chaque agent d'un ensemble de descripteurs représentant son image des autres
- **dynamique active** (envoi de messages, action sur le monde) **ou passive** (prise en compte de l'état d'interactions pour une mise à jour de l'agent)
- **modes d'interactions avec l'utilisateur**

6. Hiérarchie structurelle et récursivité

Dans le cadre de définition retenu pour les SMA, on peut, comme le fait précisément Le Strugeon [1995], distinguer trois « niveaux » principaux :

- le SMA dans son ensemble, y compris l'environnement, l'interface, et l'utilisateur,
- le « groupe » des agents, plus ou moins organisé,
- chaque agent pris individuellement.

Chaque niveau, en tant qu'il puisse être identifié, influence les autres de différentes façons. Et le concepteur doit, soit exploiter, soit tenir compte, des dépendances hiérarchiques. De plus, dans sa démarche, il doit déterminer les représentations explicites de chaque niveau par les autres, ainsi que leur utilisation. Par exemple, le « groupe », s'il s'agit d'une entité constituée, peut disposer d'une représentation des agents qu'il inclut, mais il peut aussi bien ne déterminer qu'une structure ou des propriétés, être utilisé comme référence, et ne pas alors « savoir » quels agents se « réclament » de lui. De même, les agents peuvent ignorer l'existence constituée du SMA auquel ils appartiennent. Leurs interactions seront alors purement situées, et répertoriées en fonction de "conditions de co-action" (présence de deux agents sur un même site).

Par ailleurs, une hypothèse importante est que l'on peut concevoir l'architecture interne d'un agent selon le modèle d'un SMA. L'environnement du SMA incluant l'agent, ainsi que les autres agents « externes », deviennent l'environnement du SMA « interne ». L'utilisateur accède au SMA interne via les observables de l'agent englobant, et le contrôle en accédant aux agents internes. Cette possibilité de récursivité est intéressante lorsque les propriétés de l'approche distribuée sont recherchées aussi au niveau des agents, lorsque l'on souhaite réutiliser des composants structurels, et lorsqu'une clôture interne au SMA est souhaitable.

7. Approche MAGMA

Relativement à l'ensemble du domaine que nous venons de décrire, nous nous situons par la suite dans un cadre spécifique, identifié comme l'approche « MAGMA », par référence à l'équipe de recherche qui l'a initié.

7.1. Objectif de l'approche

Suite à différents travaux antérieurs, Demazeau [1995] a proposé de développer une plate-forme de conception et de programmation multi-agents, qui permette de mettre à niveau et comparer différentes approches, et de faciliter l'analyse et le développement d'applications multi-agents. Il a donc précisé un modèle conceptuel, qui est mis en œuvre dans des « bibliothèques », chacune fournissant une des composantes fondamentales de la conception multi-agents. Par ailleurs, les travaux actuels cherchent à organiser des démarches de conception à partir des différents éléments et pour des contextes variés d'application. En revanche, aucune hypothèse de généralité n'est faite pour un quelconque modèle intégré : chaque besoin, chaque application nécessite une analyse particulière, qui peut alors venir s'appuyer sur la plate-forme.

7.2. Le modèle conceptuel VOYELLES

Le modèle support de l'approche recouvre quatre catégories essentielles : *les Environnements*, *les Agents*, *les Organisations*, *les Interactions*, ainsi qu'une référence complémentaire à *l'Utilisateur*. Pour chaque catégorie, l'objectif est de disposer d'une analyse globale des différentes approches, et de mettre en place, au fur et à mesure des besoins, des bibliothèques de modules réutilisables.

Ainsi, par exemple, pour les Environnements, l'enjeu principal est la détermination des structures d'environnement, de leur dynamique éventuelle, et des modalités d'accès, à des fins d'exploitation par les SMA. On va donc trouver les modèles spatialisés classiques, supportés par une carte topologique de référence ; mais aussi les environnements que constituent des bases de données, dont l'accès est réalisé par leur gestionnaire ; ou encore les réseaux informationnels ouverts, représentés par leurs caractéristiques de format et d'accès. De façon générale, les Environnements sont peu étudiés formellement, car, selon le modèle retenu, ils constituent une donnée, et non une construction. Le cas des simulations est, à cet égard, particulier, mais peu abordé par les travaux antérieurs.

Pour les Agents, il va s'agir de proposer différents modèles internes (architectures), documentés en fonction de leur pertinence, et de leur performance dans différents contextes. Jusqu'à présent, les travaux ont permis de dégager trois modèles principaux : un modèle de type cognitif horizontal avec une architecture de contrôle hiérarchique [Boissier, 1993], un modèle à base de tableau noir adapté au temps réel [Ocelllo & Demazeau, 1997], et un modèle réactif fondé sur l'utilisation de filtres d'accès [Ferrand, *et al.*, 1997].

Le travail sur les Organisations [Baeijs, 1996], encore en cours, doit fournir une tentative d'approche unifiée, proposant différentes alternatives, avec des approches essentiellement structurelles, pouvant être assemblées en des organisations plus complexes. La question de la réorganisation est envisagée, mais non encore traitée. Le fait que les organisations soient posées en tant qu'objet conceptuel constitué, n'est pas neutre¹⁴, puisque cela suppose que l'on puisse « manipuler » des organisations indépendamment des agents qui les instancient. Mais, comme on le voit plus loin, la démarche de conception, accordée sur sa finalité, pose l'antériorité de l'un par rapport à l'autre.

Enfin, on propose une réflexion unifiée sur les Interactions, avec, d'une part, des formes situées d'interaction, adaptées au contexte réactif, et d'autre part, des formes symboliques, construites comme des protocoles structurant la communication par message.

Conjointe à ces quatre composantes fondamentales articulant la construction de la partie « artificielle » d'un SMA, nous envisageons aussi de disposer d'éléments méthodologiques ou opératoires susceptibles d'assister l'utilisateur dans son accès et sa manipulation du SMA. Ceci inclut d'une part une démarche réflexive sur la pratique de la conception, de l'adaptation, et de l'utilisation des SMA ; mais, aussi, respectivement, la concrétisation de modèles d'utilisateurs, que les agents, en particulier cognitifs, peuvent utiliser à des fins d'adaptation de leur service. Ces modèles d'utilisateurs ne doivent pas se substituer à des modèles de type « apprenant », tels qu'utilisés en EIAO, ni à des modèles d'ergonomie cognitive, spécifiques au développement des interfaces homme-système. Il s'agit de modèles articulant la composante sociale des utilisateurs, de manière à fournir au processus artificiel une image du corps social qui l'utilise. De plus, relativement à l'utilisation, les options d'observation et de contrôle peuvent être documentées.

¹⁴ C'est un choix « à la Durkheim » (cf. « Fragments d'une histoire de la sociologie », p. 85)

Ce modèle donne lieu dans cette thèse à une instantiation particulière relativement à l'articulation simulation / résolution de problèmes / information.

7.3. Approches pertinentes dans le contexte de l'aide à la décision et la négociation

Comme nous le verrons par la suite, l'aide à la décision en aménagement du territoire se ramène, dans une perspective simplifiée, à la détermination de « meilleures » localisations en fonction de différents critères, et pour des contextes variés. Il s'agit de résolution de problèmes spatialisés. L'Environnement est déterminé par les données spatiales et environnementales (au sens des « milieux »). On va choisir un cadre réactif. Ce sont alors les organisations, décrites selon leurs agents et interactions qui vont déterminer les structures recherchées (organisations spatiales). Par activation du SMA, on obtient des formes adaptées à l'Environnement et conformes à l'organisation, que l'utilisateur observe et interprète comme des solutions. L'utilisateur peut modifier soit l'environnement, soit les organisations afin de préciser de nouvelles contraintes.

La perspective de l'aide à la négociation est différentes puisqu'il va s'agir de faciliter pour des acteurs les processus d'échange de points de vue, leur reformulation, et la construction de consensus ou compromis. Dans ce cadre, chaque acteur étant donné, et le contexte étant précisé par des études préparatoires, il va s'agir de construire des agents, attachés à des acteurs, préalablement organisés, et susceptibles d'évoluer et de restructurer leurs modalités d'interaction afin de faciliter le processus social humain. L'Environnement est donné. L'Organisation est largement déterminée par l'organisation de fait des acteurs. On conçoit alors des agents et des interactions.

Chapitre 3

LA REFERENCE SOCIOLOGIQUE

1. Introduction

Ayant auparavant, dans d'autres travaux [Ferrand et al., 1997], considéré les capacités de résolution de problèmes de systèmes constitués d'agents réactifs, nous allons nous intéresser ici plutôt aux Systèmes Multi-Agents cognitifs, et aux apports potentiels de références sociologiques, afin de discuter l'intérêt pour l'ingénieur de systèmes fondés sur un modèle social humain. Nous avons donc initié une analyse comparative entre la sociologie et les concepts des systèmes multi-agents. Nous en reprenons ici les grandes lignes.

2. Motivation du recours aux sciences sociales

La motivation qui supporte notre intérêt pour les processus collectifs est d'ordre pragmatique et constructive. En effet, on peut considérer que la plupart des phénomènes observés dans notre environnement résultent de « l'émergence » d'organisations, de formes structurées, ou même d'intelligence, à partir des dynamiques enchevêtrées des objets ou entités impliqués [Casti, 1994 ; Ruelle, 1991]. De plus, les capacités de calcul symboliques ou non, la robustesse, et plus généralement l'autonomie de ces systèmes naturels "collectifs", en font des modèles aptes à susciter l'attention d'observateurs et gestionnaires de systèmes complexes. Dès lors, étant admis que le « collectif » est un objet digne d'étude, et qu'il offre à l'ingénieur des perspectives quant à la résolution de ses problèmes, on se propose de l'aborder aussi largement et méthodiquement que possible. Si on se réfère à la très importante littérature relative aux systèmes multi-agents dits « cognitifs » [Demazeau & Müller, 1991 ; Ferber, 1995], à leurs ancêtres, ou apparentés (cf. la vie artificielle [Heudin, 1994]), c'est à dire à la plupart des systèmes collectifs artificiels, les analogies sociales ou psychosociales constituent un outillage permanent, et induisent un jargon structuré [PLEIAD, 1992] appelant inévitablement la construction de représentations mentales « socialisant » les processus collectifs considérés ; mais les références explicites aux fondements des disciplines sources sont peu nombreuses.

Afin donc de raffiner l'analyse de ces processus collectifs, à des fins d'ingénierie, nous choisissons d'une part de préserver autant que possible les énoncés de modèles des perturbations dues à des migrations conceptuelles, et d'autre part d'aborder explicitement la référence sociale en reformulant les propositions et modèles utilisées comme des transpositions affirmées du savoir sur le social. Ceci suppose de repartir des bases théoriques sur les processus sociaux.

Cependant, dans les communautés de l'informatique (dont l'Intelligence Artificielle, la Vie Artificielle, etc.) ou celles des mathématiques ou de la physique, l'image des sciences sociales est en général très dégradée. Par conséquent cela paraît être une gageure que de demander d'accepter ces sciences réputées infondées, comme des références cohérentes pouvant structurer un raisonnement et une construction.

Mais, penser le collectif est un des avatars multiples des sciences de la complexité. Et la science moderne se retrouve largement démunie d'outils aussi rationalisés et étalonnés qu'elle le souhaiterait pour aborder la complexité des phénomènes réels, qu'ils se situent dans la sphère du physique, du biologique, ou du cognitif. Les approches formalisées, axiomatisées, et empiriquement vérifiées ne produisent généralement de résultats que sur une fraction du réel, ou sur des modèles idéaux largement réducteurs. En particulier, les travaux en physique statistique, ou en physique « non-linéaire » et son pendant mathématique, qui constituent un réservoir théorique incontestable, s'ils abordent effectivement l'analyse de systèmes complexes, n'en apportent pas pour autant de réponse immédiate aux interrogations pragmatiques et ingénieristes que posent la compréhension et la régulation (gestion) de systèmes « cibles » réels, tels la cognition humaine et son support biologique, les écosystèmes anthropisés, les grands systèmes d'information ouverts, ou encore les organisations sociales et économiques. Par ailleurs, ces systèmes ne sont pas accessibles à l'expérimentation, que ce soit de par leur taille, leur intangibilité « éthique », ou leur résistance structurelle à la perturbation inquisitrice. Tout au plus peuvent-ils être observés.

Instituant le complexe comme objet d'étude non réductible, on se trouve ainsi rapidement dépourvu de perspectives méthodologiques scientifiquement fondées (c'est à dire testables, réfutables, au sens de Karl Popper). La recherche oscille alors entre deux pratiques : la confrontation dialectique (fondation discursive d'une rationalité intersubjective, construite de façon incrémentale par modification et enrichissement de concepts et validation

consensuelle) et la modélisation / simulation, rendue opératoire par l'utilisation des ordinateurs. Mais dans l'un et l'autre cas, les sciences du complexe, dès lors qu'elles abordent le réel, perdent leur légitimité rationaliste, et subissent une dévaluation théorique au regard de leurs disciplines parentes, réputées « dures ». Parvenu à ce point de l'analyse, il apparaît que ces recherches, issues essentiellement de sciences dures, se retrouvent dans la situation et avec les mêmes difficultés que les sciences sociales, coutumière d'un objet toujours complexe.

En complément, il faut s'élever contre l'illusion qui veut que les objets considérés nous étant quotidiens et donc connus, point n'est besoin d'une référence à leur étude disciplinaire. En effet, comme le fait remarquer Paul Lazarsfeld (cité dans [Bourdieu *et al.*, 1968]), sens commun et faits sociaux sont souvent contradictoires. Et par conséquent, seule une recherche approfondie, maîtrisant autant que possible la subjectivité de l'observateur, peut nous renseigner sur la réalité. Notre objet n'étant pas directement le social, si nous souhaitons l'utiliser comme archétype, il faut en chercher les analyses à leur source. Et s'appropriant les concepts, on veillera à les intégrer dans leur totalité, structurés dès leurs fondements, et cohérents avec un cadre méthodologique nécessairement limitant quant à leur validité. Ce faisant on évite de n'en extraire qu'une version affaiblie et superficielle. Nous ne cherchons pas ici à faire ce travail par rapport à une question particulière qui nous serait posée en tant qu'ingénieur, mais plutôt à illustrer à partir de quelques concepts clés communs aux sciences sociales et à « la » science des systèmes collectifs, quels gains on peut attendre d'un tel investissement.

Dans la suite on a distingué dans chacune des parties le rappel des notions et concepts de sociologie, et en italique, l'analyse que l'on peut en faire dans la perspective de l'ingénierie des systèmes sociaux artificiels.

3. Pourquoi le social ? Définition et conditions d'existence

Dans cette partie nous nous efforcerons d'expliquer comment les sociétés humaines se construisent et se maintiennent à partir d'un collectif d'individus.

3.1. Fragments d'une histoire de la sociologie

Historiquement, on fait généralement remonter l'institution de la sociologie à Auguste Comte (1798-1857), qui a forgé le terme, et, le premier, a exprimé la nécessité de procéder

à une analyse méthodique et rationalisée des faits sociaux et politiques, poursuivant ainsi son projet d'unification du savoir sur une base scientifique. Cette approche positiviste n'a en réalité fait que concrétiser des réflexions philosophiques et historiques antérieures, relatives à l'organisation des sociétés et à leur évolution. En particulier on considère souvent que les fondements d'une sociologie raisonnée sont à rechercher dans Montesquieu (1689-1755) et sa théorie du gouvernement. En montrant que des principes d'action individuelle peuvent structurer une organisation sociale, il amorce le débat relatif à **la permanence de certains faits sociaux**, et à leur origine. Nous ne nous référerons ici que marginalement à ses travaux, car ils transparaissent dans les théories ultérieures.

C'est dans les révolutions politiques et industrielles du XIX^{ème} siècle que vont se poursuivre les fondements de la sociologie avec Comte, Marx (1818-1883) et Tocqueville (1805-1859). Ceux-ci vont s'opposer largement sur le déterminisme des faits sociaux et leur articulation dans l'histoire. La perspective politique de Montesquieu et Tocqueville laisse une plus large part à la liberté individuelle que les approches structurelles de Comte et Marx, qui insistent sur la stabilité et le persistance de phénomènes sociaux dans les sociétés industrielles. Reprenant la lignée de Comte et Marx, Emile Durkheim (1858-1917) en France et Max Weber (1864-1920) en Allemagne vont achever de structurer les deux grands courants classiques de la sociologie selon des approches respectivement "positive" et "compréhensive" que nous retrouvons aujourd'hui dans des conceptions opposées des processus collectifs. L'oeuvre de Wifredo Pareto (1848-1923) relative essentiellement à la rationalité des comportements humains va introduire l'idée d'**une société organisant l'irrationalité des intentions et des actions des individus**.

Enfin, tout au long du XX^{ème} siècle, de nombreux courants attachés à des personnalités spécifiques et à des écoles de pensée (souvent politisées) vont contribuer à enrichir les acquis "classiques", et vont en particulier produire une école américaine forte, avec George Mead (construction sociale de la personnalité psychique), Kurt Lewin (théorie du champ social), et Talcott Parsons (théorie de l'action). En France, plus récemment (à partir de 1960), nous retiendrons essentiellement ici deux courants attachés respectivement à Alain Touraine (sociologie des mouvements sociaux) et à Crozier / Friedberg (approche stratégique de l'acteur social). L'analyse des faits sociaux n'a pas été l'apanage des seuls « littéraires humanistes » ; ainsi, Comte, Pareto, ou plus tard de nombreux américains comme Kurt Lewin et Herbert Simon, ont fondé leurs travaux sur un corpus de

mathématique ou de physique, en appliquant une perspective scientifique rationalisante à l'étude des sociétés.

*Cette aperçu historique montre qu'au cours de ses deux siècles d'existence structurée, la sociologie a vu s'affronter les tenants d'une part de la rationalité positiviste, davantage intéressés par les **phénomènes globaux comme objets cohérents d'étude**, et d'autre part les défenseurs d'une approche « locale », compréhensive (au sens de la capacité du sociologue de **comprendre de l'intérieur les ressorts de l'action sociale**), et interactionniste (**la forme d'interaction entre individus comme déterminant de la structure sociale**). On retrouve ici transposé le débat actuel relatif aux systèmes collectif, et à leur appréhension respectivement par les approches descendantes (« top-down », des organisations vers les agents) et ascendantes (« bottom-up », des agents vers les groupes). On notera qu'en France le courant positiviste de Comte puis Durkheim a très longtemps été dominant.*

3.2. L'action sociale

Ce que la sociologie appelle « l'action sociale » va nous intéresser au premier plan, car ce terme recouvre *l'ensemble de l'action humaine dans et relativement aux différents cadres sociaux*.

3.2.1 Niveaux d'analyse

L'action élémentaire est l'*interaction* entre deux individus. L'étude spécifique de la structuration et du comportement d'une personne relève de la psychologie que nous n'abordons pas ici. La combinaison et la structuration des interactions produit des systèmes sociaux intermédiaires comme la famille ou d'autres groupes restreints, qui se combinent pour engendrer les sociétés globales, cohérentes. Il est acquis désormais (cf. Gurvitch, cité dans [Rocher, 1968]) que la séparation des différentes échelles n'a pas de sens ; ainsi l'analyse *microsociologique* (interactions unitaires) et l'observation *macrosociologique* sont inséparables.

Dans la sociologie moderne, on se réfère aussi aux *réseaux sociaux*, des systèmes transversaux, structurés comme des systèmes d'interaction plus étendus mais non institués symboliquement, et qui constituent ainsi des maillons cohésifs de la société.

3.2.2 Définition

Par **Action Sociale**, nous entendons toute manière de penser, de sentir et d'agir dont l'orientation est structurée suivant des modèles qui sont collectifs, c'est à dire. qui sont partagés par les membres d'une collectivité quelconque de personnes [Rocher, 1968]. On retiendra ici que aussi bien la manière de penser, que la manière d'agir, et même la manière de sentir (cf. les préférences gustatives) sont structurés socialement. En particulier la perception et la représentation que l'on a d'autrui déterminent les processus d'action collective.

Dans une perspective artificielle, l'action sociale des agents recouvre ainsi leurs attributs et comportements qui directement (explicitement) ou indirectement (après analyse et transcription dans la structure des contraintes sociales) prennent en compte l'existence et le comportement des autres agents. Il s'agit ici de modèles collectifs "par construction", et non par "observation".

Il existe deux approches principales de l'action sociale, qui ont trait au niveau d'analyse retenu. Tout d'abord la définition subjective de Weber aborde l'action sociale par l'individu et ses interactions. L'idée principale est que l'action est sociale quand elle tient compte des autres, avec une triple condition :

- elle tient compte du comportement des autres et de leur présence et existence ;
- elle a une valeur signifiante ou symbolique pour les autres, et respectivement l'action affiche symboliquement la reconnaissance des attentes perçues des autres (avec tous les malentendus possibles) ;
- elle est modifiée en fonction de l'action des autres et de soi-même.

Pour un agent, la première condition signifie la dépendance (statique) de son état à l'état des autres, la deuxième qu'il existe un mécanisme d'interprétation symbolique de l'action des autres, et un processus d'élaboration d'une réponse effective, enfin la troisième implique que le comportement même de l'agent (sa dynamique, sa stratégie comportementale) dépend de l'état des autres et de lui-même.

Par ailleurs, dans la définition objective de Durkheim, l'action sociale consiste en « des manières d'agir, de penser, et de sentir, *extérieures* à l'individu, et qui sont douées d'un

pouvoir de coercition en vertu duquel elles s'imposent à lui » (Durkheim, 1904, cité dans [Rocher, 1968]). L'exteriorité des modes d'action sociale situe cette analyse comme davantage globale et structurelle. Durkheim introduit ainsi le concept de *conscience collective*, qui vient s'opposer à la *conscience individuelle*. La force de coercition des modes collectifs d'action est variable selon les sociétés ; et détermine le processus d'intériorisation de la conscience collective en chacun. La contrainte est ainsi remplacée par l'habitude et par la conscience morale. Dans la perspective durkheimienne, l'action individuelle peut donc être influencée par le collectif sans qu'il y ait interaction effective, tout en restant cependant sociale.

Il faut rappeler ici que l'objectif premier de la sociologie est l'analyse et la compréhension de l'action sociale, et non sa construction. On peut donc s'interroger sur la pertinence des distinctions opérées entre les deux niveaux d'explication de Weber et Durkheim, lorsqu'elles sont appliquées à l'ingénierie des systèmes collectifs artificiels. En particulier le développement de la « conscience d'un agent » n'a a priori pas de sens dans la mesure où leur construction doit être achevée pour envisager l'utilisation effective du système collectif artificiel. Mais cette hypothèse de "pré-construction" n'est pas indispensable ; en effet on peut tout à fait envisager un processus d'adaptation par apprentissage, et donc effectivement d'intégration du fait social au fur et à mesure des interactions.

Par ailleurs, les deux analyses ont bien une transcription possible : soit (« subjectivement ») on ne spécifie pour les agents que des modes d'interaction sociale qui vérifient tout ou partie des conditions "weberiennes", et on va alors observer ou non l'émergence de processus collectifs particuliers, et l'obtention d'une réponse fonctionnelle à certain état de l'environnement ; soit (« objectivement ») on construit a priori un répertoire d'actions et de connaissances (une conscience collective artificielle), un ensemble de règles parmi lesquels les agents vont puiser pour déterminer leur comportement. Le travail de construction de cette « conscience collective artificielle » suppose que l'on ait analysé auparavant les différentes configurations collectives possibles afin de toujours pouvoir orienter l'action. En pratique il semble que les deux approches doivent être concomitantes et qu'il est souvent difficile de tout spécifier individuellement, sans en passer par des déterminants collectifs donnés a priori. Le cadre de l'agent autonome (p.e. un « agent WWW ») nous limite cependant souvent au local, par méconnaissance

exhaustive des situations et autres agents que l'on peut rencontrer (on touche ici au problème des systèmes collectifs artificiels en environnement ouvert).

3.3. Les normes dans l'action sociale

Les *normes* vont permettre d'ajuster la conduite des individus, plutôt naturellement tournée vers la satisfaction du plaisir, aux manières collectives d'agir. Elles vont leur donner un cadre comportemental commun. On peut donc lire la signification de la conduite des individus à partir de règles ou *normes de communication et d'action*, sur lesquelles il existe un consensus accepté par les acteurs. On notera que *les normes se réfère bien à des actions et comportements concrets et observables*. Elles n'ont pas directement d'expression symbolique (la sentence « tu ne tueras point » n'est pas une norme ; l'interdit du meurtre en est une).

Les normes assurent la régulation fonctionnelle du collectif. Elles en constituent le « code de fonctionnement ». Par exemple « les agents laissent toujours passer plus gros qu'eux », ou en terme de communication, « ils respectent tel protocole ». Du point de vue constructif, il est difficile de distinguer clairement les normes imposées par le concepteur des simples limitations fonctionnelles non évoquées en sociologie, comme celles relevant du principe de réalité : « on ne peut pas voler », « on peut mourir », etc. On peut admettre que les normes sont des limitations imposées à des fonctions disponibles (les agents se déplacent : fonction, verticalement : norme). Mais ceci est très artificiel, car inversement on peut admettre que certaines contraintes fonctionnelles humaines résultent de normes.

D'autre part, le caractère non symbolique des normes peut être traduit par ce qu'on qualifie parfois de registres de comportements des agents, c'est à dire des ensembles d'actions accessibles en fonction directement de percepts (registres sensori-moteurs).

L'interaction est ainsi structurée à partir de normes collectives, mais celles-ci peuvent relever de différentes « sous-sociétés » ou « tribus ». L'individu est donc le « produit des tribus » [Rocher, 1968], au sens que sa conscience individuelle est forgée par la combinaison des différents niveaux de conscience collective qu'il intègre.

Si on définit différentes « classes d'agents » par des registres d'action, un agent particulier peut éventuellement être construit par combinaison de classes.

D'autre part, les normes sont fondamentales pour assurer la deuxième condition "wéberienne" : la conduite humaine n'est significative et cohérente aux yeux d'autrui que par référence à une structure de règles ou normes collectives. Elle s'inscrit dans un cadre reconnu qui la rend sociale. Et cette cohérence permet à tout individu de prévoir les comportements d'autrui, et donc d'élaborer des stratégies sociales. La prospective des actions et réactions des autres obéit ainsi à un ensemble de *modèles culturels* (« *cultural patterns* »).

Le respect des codes décrits par les normes est certes une garantie de bon fonctionnement. La référence au code de la route est édifiante : en fonction de ce qui est supposé respecté par autrui, chacun construit une stratégie locale. La confrontation des modèles culturels français et anglais de code de la route est évidemment désastreuse.

3.3.1 Le rôle social

Le répertoire de normes utilisés par les différents acteurs n'est pas identique. Même s'il y a cohérence des différents systèmes, l'action des sujets qui occupent une position ou une fonction particulière dans un groupe ou une collectivité est soumise à un ensemble spécifique de normes, qui définissent ainsi un *rôle social*. Celui-ci est modulé selon les personnalités, mais il garantit certaines stabilités comportementales utiles à l'action sociale. Le *rôle* doit être bien différencié de la *fonction* : le *rôle* est l'ensemble des manières d'agir qui, dans une société donnée, sont censées caractériser la conduite des personnes dans l'exercice d'une *fonction* particulière (cette définition du *rôle* n'est pas automatique).

Pour assurer une fonction donnée, un agent doit respecter un ensemble de normes, qui précisent son rôle : la fonction de balayeur suppose qu'en présence de déchets l'agent les balaye...

Etant donné la multiplicité des fonctions que remplit un individu particulier au sein d'un collectif, il est donc amené à « jouer » différents rôles sociaux. Ce qui a conduit (dès Weber) à la notion d'*acteur social* (reprise et enrichie par Touraine et Crozier), qui dispose, de même qu'au théâtre, d'une capacité de modulation de son jeu. Cependant, la complémentarité et l'interdépendance des rôles au sein d'une société cohérente contraignent leurs variations. De manière générale, il est souhaitable (mais difficile) de distinguer les rôles (plus que les fonctions) pour bien comprendre le fonctionnement social.

La modulation du jeu de l'agent est l'élément de fluctuation qui doit permettre une plus grande souplesse dans les comportements collectifs. Ainsi, toujours dans l'exemple du code de la route, le comportement face à un feu orange peut osciller entre l'arrêt et l'accélération, en fonction des capacités du véhicule (paramètre intrinsèque), ou de la présence d'un policier (paramètre extrinsèque).

3.3.2 Sanctions

Les normes sont fonctionnellement justifiées au titre du collectif social, mais cela ne suffit pas à les imposer aux individus, qui peuvent vivre avec des systèmes d'action « anormaux ». Il existe donc un mécanisme de *sanction* : la conformité est récompensée, et l'insoumission punie. On distingue classiquement [Rocher, 1968] quatre types de sanctions (négatives ou positives) :

- *physiques*, qui instituent la violence sociale,
- *économiques*, par contrôle social des biens et richesses de l'acteur,
- *surnaturelles*, par imposition d'une logique symbolique magique ou surnaturelle,
- *sociales*, par modification des processus d'interaction et de la place sociale.

L'ensemble des sanctions assurent la cohésion et le fonctionnement de la société, et permettent le *contrôle social* (mise en conformité des conduites aux modèles établis).

Par construction l'agent est conforme. Cependant si on accepte les fluctuations ou l'adaptation, à des fins d'amélioration du système, il faut pouvoir sélectionner. Dans les systèmes évolutionnistes artificiels on définit ainsi la « fitness », et un paramètre énergétique qui éliminent peu à peu les moins adaptés. C'est un exemple de sanction artificielle de type « économique ». Si on reprend les différents types de sanction, on observe que pour permettre une sanction physique, il faudrait concevoir une forme d'intégrité « corporelle » de l'agent qui pourrait être dérangée, l'extrême étant la disparition (mort). Imaginer une sanction surnaturelle nous entraînerait trop loin dans les fondements sociaux du surnaturel. Par contre, la sanction sociale est fondamentale car elle recouvre tous les processus d'avancement hiérarchique, d'éviction, et de « boycott » social.

Au delà de la réalité des sanctions, c'est davantage l'image qu'a l'acteur de la sanction, qui va influencer son comportement. Or, les sanctions vont s'appliquer aux agents sans qu'il y ait eu « crainte » auparavant, puisqu'un tel niveau de

représentation n'est pas utilisé. Comme la représentation de la sanction permet de traduire l'existence du collectif dans la décision individuelle, les agents ne peuvent tenir compte du collectif que relativement à des interactions particulières. Par conséquent, il ne peut alors y avoir adaptation des agents.

Une théorie récente (Coleman, 1990, *Foundation of Social Theory*, Chicago), d'orientation apparemment « utilitariste », pose différemment le problème de la norme et de la sanction. Elle énonce que les normes n'ont de réalité qu'au travers d'un ensemble d'acteurs les supportant, et qu'en particulier les normes ne s'imposent pas *a priori* aux acteurs. Il faut pour que le contrôle social s'effectue que des acteurs « s'en chargent », et en aient les moyens. Car en effet l'imposition de normes n'est pas gratuite. Comme toute activité, elle a un coût. Dès lors, il faut que le collectif institue un ou des acteurs comme régulateurs et leur attribue une part des ressources collectives à cet effet. Cette théorie est justifiée par l'idée que si le collectif fonctionne bien, alors la part distribuable est augmentée ; mais qu'en général chacun n'a pas intérêt à collaborer (problème standard du compromis vs. consensus en terme d'utilités). Ce mécanisme de sanction est très élaboré, car il suppose déjà constituée une conscience collective, ainsi qu'une capacité de représentation sociale.

3.3.3 Socialisation normative

Que ce soit dans l'éducation de l'enfant ou l'intégration d'un « étranger » dans une société, il doit y avoir acceptation et intériorisation des normes sociales. Cette *socialisation* vise le développement de dispositions ou tendances conformistes. Pour ce faire, les désirs, attentes ou besoin subissent par le jeu des sanctions un processus de sélection, qui institue « le bien et le mal ». Les normes sont ainsi toujours relatives à une société particulière, et elles n'ont pas de valeur absolue.

Le processus de socialisation illustre l'imbrication des perspectives de Durkheim et Weber. En effet, évoluant au sein de ce qui est collectivement accepté, chaque individu se construit en intégrant et faisant sien des rôles particuliers, qui structurent intégralement son être. L'intériorisation due à la socialisation conduit même, comme Freud [1930] l'a montré, à produire une image sociale "autocontraignante". La conformité est alors désirée.

Dans les systèmes sociaux artificiels clos, la socialisation n'a de sens que relativement à l'arrivée d'un agent dans un groupe préétabli, ou à sa migration. Par contre, dans les systèmes ouverts (du type agents sur réseaux télématique), la

socialisation est fondamentale car elle permet l'intégration des « nouveaux » au système préexistant, sans connaissance a priori du contenu. Pour généraliser, on peut remarquer que la socialisation, à la différence des notions précédentes, est un processus. Pour un agent artificiel, l'équivalent sera tout ce qui relève de l'apprentissage et de l'adaptation, pour les normes et les représentations sociales.

3.3.4 Ordre social et liberté des acteurs

L'ordre du social ne reflète que le processus de régulation permettant le fonctionnement, et non un quelconque contrat explicite ou « ordre naturel ». Le déterminisme social qui conduit à la standardisation des conduites individuelles laisse cependant une place à la spontanéité (jusqu'à même affronter l'ordre social). Comme on l'a énoncé précédemment, il existe une échelle « de rigidité » des modèles allant du plus impératif au plus facultatif, de l'interdiction à la préférence ; par ailleurs, les modèles sont plus ou moins réalistes, certains relevant de « l'idéal ». Rappelons aussi qu'il existe un ensemble de choix possible de modèles : il y a donc toujours une part de décision, en particulier entre des modèles divergents. La liberté de l'acteur réside alors dans ce choix (*variance*).

Le recours à des modèles marginaux ou interdits reste possible, il y a alors *déviance*. Ce choix peut être source de changement social lorsqu'il y a reconnaissance par un groupe marginal. La coévolution des différents systèmes de normes est une des lectures possibles de l'histoire sociale.

Le déviance d'un agent est un concept séduisant, mais difficile à mettre en oeuvre sans utiliser des processus aléatoires. On peut aussi introduire une proportion de déviants et observer s'ils persistent et quel effet ils produisent.

3.4. Eléments symboliques de l'action sociale

Parmi les problèmes que posent la distinction entre « collectif et social », la place du symbolisme nous paraît déterminante car il est le propre de l'homme, et donc on en vient toujours à s'interroger sur les propriétés sociales qu'un système collectif non symbolique peut et ne peut pas présenter.

3.4.1 Valeurs

Les valeurs d'une personne ou d'un collectif sont les manières d'être ou d'agir reconnues comme idéales (références positives), et qui donc rendent désirables ou estimables les êtres ou les conduites auxquelles elles sont attribuées. La valeur est dans l'ordre idéal, mais elle se concrétise par des conduites ou des objets concrets. Les valeurs permettent le jugement (« de valeur ») et le choix des conduites. Les modèles (normes) se justifient à l'intérieur d'un système de valeur particulier. Cependant on observe dans les processus historiques des déviations relatives aux valeurs, qui peuvent conduire à des modèles perçus comme inconsistants.

Les valeurs donnent des critères d'évaluation, qui permettent de choisir des actions. En l'absence de valeurs, le comportement est indéfiniment réactif. Et tous les choix de modèles précités sont impossibles. Sans valeurs l'agent n'est pas libre, au sens qu'il ne dispose pas de l'outillage symbolique lui permettant d'élaborer un raisonnement spéculatif et le jugement afférent. Par contre dans le cadre artificiel les valeurs ne sont pas indispensables pour obtenir une société structurée, puisque le concepteur peut traduire des systèmes implicites de valeur dans les modèles qu'il impose. Cependant le système collectif artificiel ainsi formé vit avec ces valeurs sans les reconnaître (de même que beaucoup de sociétés humaines n'explicitent pas certaines valeurs).

De même que les normes, il y a relativité des valeurs vis à vis d'une société et d'un temps. Et la place des différentes valeurs à l'intérieur d'une société n'est pas immuable. La hiérarchie des valeurs ainsi constituée pose des valeurs dominantes et des valeurs variantes, dont les places respectives peuvent s'inverser à l'occasion d'un changement social.

Par ailleurs, les valeurs sont acceptées par un processus plus émotionnel ou intuitif que raisonné. Dès lors le recours individuel ou collectif à des systèmes de valeurs contradictoires est possible.

Selon Talcott Parsons, le choix d'un système de valeurs (« pattern variables »), traduit cinq alternatives sociales :

- 1) *affectivité* (« le flot des sentiments ») vs. *neutralité affective* (contrôle et rationalisation),
- 2) *universalisme* (unicité du jugement relatif aux acteurs et faits sociaux) vs. *particularisme* (usage de normes particulières spécifiques et contextuelles),
- 3) *option de l'être* (évaluation d'autrui en fonction de son être propre) vs. *option de l'action* (jugement en fonction des actions),
- 4) *globalisme* (autrui vu comme un tout cohérent) vs. *spécificité* (autrui réduit à une dimension de son être ou action),
- 5) *égocentrisme* (selon des buts personnels) vs. « *sociocentrisme* » (selon des choix et buts collectifs).

L'alternative 1) a peu de traduction artificielle du fait de l'absence de « sentiment ». Le particularisme peut se traduire par une priorité accordée à certains autres agents. L'option de l'être ne considérera que les attributs d'autrui, alors que l'option de l'action verra son état. La spécificité s'intéressera à une fonction particulière, alors que le globalisme retiendra un agent donné. Enfin le dilemme le plus important est celui de l'égo vs. socio centrisme car il se réfère aux conflits entre intérêts locaux et globaux.

Les choix (« options ») de valeur peut être fait soit par la communauté soit par un individu. Les options individuelles sont cependant conditionnées par les options collectives. Toute option individuelle non collective est facteur d'innovation sociale.

3.4.2 Fonction sociale des valeurs

Les valeurs ont différentes fonctions sociales :

- la *mise en cohérence* des modèles (normes) : les valeurs permettent d'expliquer (en partie seulement du fait de leur caractère irraisonné, et donc parfois contradictoire) la coexistence de modèles culturels apparemment discordants ;
- les valeurs permettent l'*unité psychique des acteurs* en rendant cohérent et structuré leur perception de soi et du monde, ainsi que leur processus de décision (motivation unifié) ;
- enfin, et surtout, elles assurent la *cohésion sociale dans le champ symbolique* : l'intégration sociale passe par l'adhésion aux valeurs communes.

La cohésion du champ symbolique d'un système collectif artificiel renvoie à la définition de standard de communication (choix de langages et protocoles) au niveau le plus technique, mais aussi surtout à la définition de symboles permettant aux agents de se décrire eux-mêmes, de communiquer leur perception des autres et du social, et ainsi de pouvoir élaborer des décisions collectives relatives à l'organisation sociale.

3.4.3 Rôle des symboles

Pour assurer leur fonction sociale, les valeurs doivent être affirmées et donc visibles. Or elles sont idéales, et ne sont représentées que par certains modèles « de référence ». Si on retient qu'*un symbole est une chose qui tient la place d'autre chose*, alors on conçoit que l'univers des valeurs et des modèles est un vaste ensemble symbolique dans lequel baigne l'action sociale. En particulier, les symboles vont matérialiser les valeurs, et vont donc permettre leur échange ou leur réfutation. Ainsi, les symboles vont faciliter les changements de valeurs, et donc l'adaptation de la société aux contraintes du milieu. L'extension de sa capacité symbolique a ainsi permis à l'homme de maîtriser le monde en se socialisant, et inversement la socialisation a facilité et renforcé l'activité symbolique.

On est ici au coeur du débat relatif à la nécessité d'un systèmes symbolique dans les collectifs artificiels. Si on fait l'hypothèse d'agents non « symbolistes », les valeurs ne peuvent être affichées. Dès lors, il ne peut y avoir de changement explicite du système de valeurs. Par ailleurs, les valeurs ne persistent que telles que le concepteur les a choisies, et transcrites dans des modèles culturels (systèmes de normes) artificiels. L'adaptation de la société aux contraintes du milieu est alors limitée à ses évolutions sélectives. L'identification d'une structure complexe, imbriquée, de sous groupes identifiés par des modèles culturels cohérents dépend entièrement de l'observateur extérieur, en l'absence de système symbolique interne. La possibilité d'un changement social est réduite aux réorganisations prévues par le concepteur en fonction de la situation ; et la cohérence globale reposera sur la continuité du milieu environnant.

Au contraire de ce qui est énoncé pour les sociétés humaines, les modèles culturels artificiels ne sont pas forcément symboliques. Car, en tant que systèmes cohérents de normes, ils constituent essentiellement des répertoires de

comportements réductibles à de simples processus sensori-moteurs conditionnés par le milieu.

La fonction sociale des symboles est de deux types :

- 1) *communication* sous différentes formes et langages de différents concepts ;
- 2) *participation des acteurs au collectif* au travers de l'appropriation de symboles de solidarité, d'organisation hiérarchique (le symbole représente une échelle sociale exogène), de l'histoire collective (mémoire collective structurante), ou encore religieux ou magiques.

La fonction symbolique de communication est prépondérante pour les systèmes collectifs artificiels. Elle permet d'opérer une distinction fonctionnelle entre les actions et interactions avec les objets de l'environnement et avec les autres agents. Car, en l'absence de symbole, les interactions sont limitées à des processus passifs, où les états des agents sont interdépendants. L'action éventuelle d'un agent sur un autre ne résulte que de l'application d'une norme, sans référence à un quelconque message signifié par cette action. Dès lors, la société n'est plus différente de l'environnement, puisque les processus sont strictement de même nature. Autrui perd ainsi son statut de « semblable ».

Cette analyse est trop extrême, car le concepteur / observateur est toujours susceptible de distinguer les normes relatives à l'environnement de celles relatives au corps social. Hormis pour des besoins analytiques formels (unification des interactions), on peut donc conserver, même pour des systèmes très « réactifs », deux catégories fonctionnelles séparées.

Les symboles restent toujours ambigus, car il n'y a pas vérification et réactualisation perpétuelle des significations. Or les symboles remplacent la réalité, et donc la société peut fonctionner avec une structure symbolique incohérente avec son environnement réel ; jusqu'à ce qu'elle en subisse les conséquences.

Dans le cas des systèmes collectifs artificiels ouverts, la construction symbolique doit en permanence être adaptée, puisque l'environnement n'est pas clos (condition d'un système symbolique statique). On peut ici faire référence aux systèmes de révision de croyance en Intelligence Artificielle.

Pour résumer cette partie, on voit que l'action sociale a trois fondements : les normes, les valeurs (idéaux) et les symboles (qui permettent l'actualisation des valeurs).

Quels que soient les systèmes collectifs artificiels, les normes sont toujours présentes, alors que les valeurs et les symboles peuvent n'exister que dans l'esprit du concepteur qui les transcrit dans des structures et processus d'interaction.

3.5. La culture

La culture est le niveau le plus global d'analyse de l'action sociale. Nous retiendrons que la culture est l'ensemble lié de manières de penser, de sentir et d'agir plus ou moins formalisées, qui étant *appprises et partagées* par une pluralité de personnes servent, d'une manière à la fois objective et symbolique, à constituer ces personnes en une collectivité particulière et distincte. On peut distinguer deux fonctions de la culture :

- 1) **fonction sociale** : réunir une pluralité de personnes en une collectivité spécifique. La culture est donc l'univers mental, moral et symbolique commun à une pluralité de personnes, grâce auquel et à travers lequel des personnes peuvent communiquer, se reconnaître, se lier, et se sentir membres d'une même entité.
- 2) **fonction psychique** : la culture constitue le moule des personnalités ; elle offre un choix de modèles, de valeurs, de significations symboliques ; mais ce choix n'est pas illimité, il caractérise les options possibles. La culture confère ainsi une « forme » aux individus de la société.

Une culture artificielle est donc un cadre symbolique dans lequel inscrire les agents. Elle caractérise l'ensemble des attributs d'un système social et de ses individus. On peut admettre que tout système collectif artificiel apte au symbolisme a une culture.

Guy Rocher [1968] établit un parallèle intéressant entre la culture et l'instinct. Il montre ainsi que si l'instinct traduit « l'adaptation principale de l'animal à ses besoins et à son environnement », et donc lui permet de « répondre à la réalité », la culture, qui est propre à l'homme, remplit le même rôle pour l'homme dans son cadre social. Cette hypothèse implique en particulier que le recul de l'instinct chez l'homme correspond aux avancées de la culture, comme le montre aussi différentes analyses des évolutions de l'enfant.

La coexistence dans un système social artificiel de processus de type instinctifs (ou réactifs), et culturels (symboliques), traduit une distinction désormais explicite entre société et environnement.

3.5.1 Idéologie

L'idéologie est un système d'idées et de jugements, explicites et organisé, qui sert à décrire, expliquer, interpréter et justifier la situation d'un groupe ou d'une collectivité, et qui, s'inspirant de valeurs, propose une orientation précise à l'action historique de ce groupe ou de cette collectivité [Rocher, 1968]. L'idéologie est donc cohérente, explicative, et oriente l'action. Elle constitue une représentation symbolique de la société et de ses valeurs par elle-même, et dans sa globalité. Elle affiche explicitement son intention de faire l'unanimité (alors que ceci n'est qu'un effet des systèmes de valeurs). Elle est le premier niveau d'expression symbolique de la société comme entité objective. Et donc elle est un prérequis pour l'élaboration d'une stratégie de changement social.

Une idéologie dans un système collectif artificiel est une construction symbolique qui a pour objet l'action sociale elle-même. Il s'agit donc de ce qu'on pourrait appeler un niveau « méta-social » qui n'est pas encore très répandu, à notre connaissance, parmi les agents artificiels. Cependant, dans tous les systèmes collectifs supervisés (avec un contrôle centralisé) il existe au moins une idéologie implicite qui est celle utilisée par le superviseur.

Les idéologies sont souvent le fait d'élites qui ont la capacité d'analyser le social. Il peut coexister des idéologies différentes autour d'une même société.

3.5.2 Socialisation « culturelle »

Il s'agit ici des processus d'apprentissage et d'intériorisation des éléments socioculturels du milieu, et de leur intégration à la personnalité, sous l'influence d'expériences et d'agents sociaux significatifs. Il y a successivement acquisition symbolique de la culture, intégration à la personnalité, et donc tendance vers la conformité.

Les mécanismes de socialisation sont de nature psychique (et non biologiques), et ils s'inscrivent dans une évolution liée à l'histoire de chaque individu au sein de la collectivité. D'une part, il y a *apprentissage* par essai, répétition, imitation, avec des récompenses et des punitions. Le milieu social transfère ainsi la culture instituée. D'autre

part, il y a *intériorisation d'autrui* par des processus spéculaires (j'imagine l'image que j'ai), ou le développement de ce que George Mead appelle la « notion d'autre généralisé », c'est à dire une image unifiée du collectif.

La perspective de construction d'un mécanisme de socialisation culturelle artificielle nous paraît utopique pour au moins deux raisons : tout d'abord la durée et la quantité d'information intégrée durant la socialisation humaine est bien supérieure à tout ce qu'on peut imaginer dans un système artificiel, et d'autre part les bases fonctionnelles physiques et psychiques de la socialisation sont d'une telle complexité que l'on imagine mal de les reproduire (en supposant que l'on puisse les connaître...).

L'apprentissage est un processus artificiel déjà largement étudié. Articulé autour de normes, valeurs et sanctions, il se rapproche des notions de « renforcement ». L'intériorisation d'autrui est aussi intégrée dans les modèles artificiels d'agents cognitifs, qui disposent de modèles des autres et de processus spéculaires d'élaboration de plans coopératifs.

3.6. L'alternative stratégique

Les théories sociologiques sont très nombreuses et très variées. Nous n'avons considéré ici que les théories classiques. Nous souhaitons cependant citer l'approche « stratégique » de Crozier et Friedberg [1977] (voir aussi l'annexe sur « acteurs et négociation »), qui pose trois postulats :

1. les acteurs conservent toujours des objectifs propres, et ne sont donc jamais de simples rouages dans une « grande machine sociale »,
2. les acteurs se conservent toujours une marge de manoeuvre, une liberté individuelle, et en usent,
3. la rationalité des stratégies est limitée (cf. les travaux de Simon [1977]).

Sur cette base s'élabore une théorie compréhensive qui illustre en particulier comment le social est une combinaison de tensions contradictoires qui s'équilibrent, et donc qui instituent le conflit comme « moteur social ».

4. Conclusion : implications sur la conception des SMA et agents

Cette approche de la sociologie n'a pas vocation à servir directement pour l'analyse des contextes de décision dans les domaines nous intéressant ici. Comme nous l'avons annoncé en introduction, il s'agissait plutôt d'avancer quelques hypothèses sur le fondement de la conception des systèmes sociaux artificiels, à partir de l'analyse des systèmes sociaux humains.

Nous reprenons ici quelque unes des caractéristiques principales susceptibles de nous intéresser :

1. L'action sociale peut être considérée soit du point de vue individuel (dépendance de l'action à celles des autres acteurs), soit du point de vue collectif (existence de structures contraignantes). Classiquement, pour les systèmes multi-agents, la première approche est retenue, car elle repose sur la définition des agents, et la spécification de modes interactifs particuliers. Mais la deuxième approche, fondée sur l'*explicitation des organisations*, peut être intéressante dans une perspective de réorganisation dynamique, où la structure, représentée sous une forme symbolique, devient l'*objet* d'une stratégie. A cet effet, l'organisation peut être décrite en tant que système d'interactions, ou en tant qu'ensemble de normes attachées à des rôles particuliers. L'innovation sociale repose alors sur la reconfiguration des interactions, ou sur l'émergence ou la disparition de nouveaux rôles. La conception ou négociation d'une nouvelle forme d'organisation ne préjuge en rien de l'acceptation des positions sociales par les acteurs concernés.
2. La position sociale, les valeurs, la culture, d'un acteur résultent d'un processus évolutif, au cours duquel l'acteur a été confronté à autrui, et s'est, peu à peu, déterminé socialement. En général, les systèmes multi-agents sont construits statiquement, et le concepteur suppose un ensemble cohérent, qu'il serait capable de spécifier *a priori*. Par référence au cadre social humain, on peut donc proposer une approche dynamique, dans laquelle les différents déterminants sociaux sont acquis par l'agent en fonction d'interactions. Ce type d'approche est déjà reconnue dans le cas des agents adaptatifs, mais elle concerne souvent les connaissances de l'agent, et non sa structure d'action, ou ses déterminants stratégiques.
3. L'idéologie, en tant que justification construite d'un fonctionnement social particulier, peut être le support d'une négociation portant sur le changement social. Cette référence

gagnerait cependant à être enrichie par une analyse du caractère « stabilisateur » des idéologies, en particulier dans le cas de systèmes sociaux soumis à des contraintes fortes.

4. L'appréhension d'une sanction négative par un agent artificiel pourrait être l'instrument d'une forme de socialisation. De plus, la représentation de la sanction permet d'éviter la sanction elle-même. Or, la sanction, lorsqu'elle est effective, conduit à une perturbation majeure du système, qui, dans une approche constructive, est rarement souhaitable. Ainsi, si les agents peuvent élaborer leur action et ses conséquences prévisibles, sans l'expérimenter dans le cadre interactif réel, alors on fait l'économie d'une « crise structurelle ». On notera cependant, que le recours, pour la décision des agents, à un modèle d'évaluation fondée sur une fonction de préférence, revient à considérer des possibilités de sanctions positives ou négatives, traduites en coûts.

L'ensemble de ces options sont discutées de façon plus appliquée dans le chapitre 4, partie 3. Par ailleurs, à partir de cette réflexion, nous avons raisonné les bases « sociales » du système SANPA (chapitre 7), notamment les modèles d'acteurs et d'organisations que les agents utilisent (explicitation de l'organisation), et l'acquisition progressive des modèles de communication (structuration du graphe de performatifs).

Partie 2

Propositions

De la conception des Systèmes Multi-Agents

Modèles formels de Systèmes Multi-Agents

Chapitre 4

DE LA CONCEPTION DES SMA

Vers une approche distribuée, ouverte et contingente

Le travail ici présenté a été conçu initialement avec une double finalité. Tout d'abord, il s'agissait d'aborder les problématiques de la décision et de la négociation en aménagement comme des processus fondés sur la construction individuelle ou collective, ainsi que l'échange et la "co-évolution" entre acteurs, de représentations (modèles) de l'espace et d'un projet ; et donc d'en envisager l'instrumentation informatique comme une facilitation et une structuration de ces différents processus informationnels. En particulier, cet objectif supposait de tenir compte de la juxtaposition de différents systèmes complexes en interaction : le système "naturel" sous-tendant l'environnement, le système socio-politique substrat de la décision collective, le système cognitif mis en oeuvre par chaque acteur dans son idéation du monde, et enfin le système informatique utilisé (éventuellement) dans ce contexte. Dès lors, et au vu des éléments apportés dans les chapitres précédents, on est fondé à proposer une approche multi-agents, justifiée par le caractère distribué des structures et processus, ainsi que par l'exigence d'une modélisation locale, "par entité", adaptée aux modes de cognition des acteurs.

On rencontre alors l'autre finalité affichée à l'origine de la recherche, et relative celle-là aux SMA eux-mêmes : en fonder l'étude sur les disciplines sources des modèles utilisés par analogie (physique pour les systèmes réactifs, sciences sociales pour les systèmes cognitifs), et bénéficier des problèmes soulevés par les applications choisies, pour proposer des innovations conceptuelles ou techniques généralisables au "domaine" des SMA.

Nous relevons donc ici nos apports spécifiques pour les SMA, issus de la réflexion sur les questions de l'instrumentation de la décision collective en aménagement, et susceptibles de contribuer à l'avancée du domaine. Nous abordons en premier lieu l'articulation entre les approches réactives et cognitives, d'une part vis-à-vis des différents cadres d'utilisation des SMA, et d'autre part dans leur interconnexion. Puis nous étudions les aspects proprement spatiaux, avec la généralisation de l'approche réactive de la résolution de problèmes, et les

avantages d'une modélisation "orientée agent". Enfin nous considérons la transcription de modèles issus des sciences sociales dans la conception des dynamiques d'agents.

1. La dialectique Réactif / Cognitif

L'intelligence artificielle distribuée est largement dominée par les SMA cognitifs. Il suffit pour s'en rendre compte de considérer le ratio dans les conférences ou grandes publications, ou n'apparaissent qu'une faible part de travaux sur les systèmes réactifs. Historiquement cela s'explique par l'origine de l'IAD en tant qu'évolution de l'IA classique vers une distribution des tâches entre des agents "experts" dans leur domaine, et coopérants. Par ailleurs, les communautés anglo-saxonnes sont structurées différemment des communautés françaises : les travaux sur les systèmes réactifs sont affichés essentiellement d'une part comme des évolutions parallèles des réseaux d'automates, et relèvent donc bien souvent de la physique, et d'autre part comme des émanations de la Vie Artificielle, en particulier dans leurs applications à la simulation de systèmes complexes. Les quelques articles d'anthologie de l'approche réactive (Agré & Chapman, Toru & Ishida, Brooks) dans le domaine même de l'IAD, s'ils restent souvent cités, n'ont pas pour autant connu de suite "explosive" avec constitution de courants de recherche institués en IA. Ce n'est que très récemment que l'on a vu apparaître en IA des programmes de recherche fondant explicitement la dynamique des interactions et la structure organisationnelle comme sources de la résolution de problèmes.

A l'inverse, l'école francophone de l'IAD a une composante "réactive" très structurée, avec la présence de différents auteurs de référence (Ferber, Müller, Demazeau, Drogoul, Ghedira) qui ont chacun contribué à enrichir le domaine, en introduisant les concepts "d'écorésolution" [Ferber, 1989], de champs d'interaction [Demazeau, 1991], d'influence, de communication réactive via l'environnement.

Cependant, même si l'approche réactive tend à se diffuser, on ne voit encore que peu d'applications à des problèmes réels. De nombreux travaux se cantonnent soit à des "simulations de problèmes" sur des environnements "jouet" de type "pengi", soit à des apports formels et des tentatives de comparaison méthodologique, qui, s'ils sont indispensables pour justifier l'approche, ne produisent pas de démonstrations strictement convaincantes pour des industriels plus soucieux de solutions que de méthodes.

1.1. Systèmes Multi-Agents réactifs et cognitifs : différences et similitudes

Nous avons déjà partiellement abordé les deux notions classiques de “réactif” et “cognitif”. Or la validité et la pertinence de cette distinction sont largement discutées et controversées. Nous proposons donc quelques éléments devant permettre d’en mesurer l’intérêt éventuel selon les différents paramètres intéressant l’ingénieur.

En l’absence de réflexion approfondie, et pour la plupart des chercheurs familiers de ces concepts, la catégorisation est facile et immédiate. A la lecture d’un article décrivant un système multi-agent ou un aspect s’y référant, on identifie très vite une “approche cognitive” lorsqu’on rencontre des mots-clés comme “représentation”, “connaissance”, “raisonnement”, “plan”, “stratégie”, ou “logique”. Cette catégorie est en général implicite. A l’inverse, pour des articles assez récents (après 1991 : Demazeau, Müller, 1991, “From reactive to intentional agents”), l’approche réactive est rendue explicite, et en général on la confirme immédiatement par les classes d’exemples retenus (la fourmilière constitue la métaphore reine) ou d’après les références peu nombreuses dans ce domaine. De façon générale, l’approche réactive rejette le paradigme "représentationnaliste" et fait appel à des modèles comportementaux très simples, souvent qualifiés de “sensori-moteurs”, en ce qu’ils décrivent la sélection d’actions directement à partir des percepts instantanés. On cite aussi souvent l’absence de mémoire comme caractère distinctif (ce critère est cependant trop imprécis car la plupart des systèmes sont au moins markoviens : la variation d’état dépend de l’état lui-même).

Dans le modèle d’agent réactif que nous proposons dans cette thèse, l’espace d’état des agents peut être quelconque (p.e. {position} x {couleur}). Le changement d’état est évalué à partir de l’état courant de l’agent, de l’état d’un certain voisinage dans l’environnement, et de l’état de certains autres agents. La sélection du voisinage atteint et des agents pris en compte, est contrôlée par des filtres posés *a priori* ; de même que la fonction d’activation finale est elle aussi donnée. Il n’y a pas de mécanisme de perception en tant que tel, ni de communication. L’état du monde est directement intégré dans la dynamique locale via les filtres, qu’il s’agisse de l’environnement ou des autres agents. Le passage par des “actions” de perception ou de communication n’est ici pas nécessaire puisque la finalité est de produire de façon externe une dynamique globale du système. A notre sens ces agents sont réactifs tout simplement car la taille de l’automate nécessaire pour les implémenter est strictement constante. Il n’y a que des variations de leurs différents attributs internes. Dès

lors cela suppose que tout état que l'on peut atteindre est connu *a priori* sans recours à une combinatoire complexe. En ce sens, l'émergence de formes utilisée par la résolution n'est pas ouverte, comme par exemple dans la production automatique de discours.

Ce modèle est-il généralisable à un cadre "cognitif" ? Sans doute, mais il faut préciser ce qui est symbolique. On peut tout d'abord utiliser un environnement (un jeu de données) symbolique, et donc constitué d'un ensemble d'assertions ou de mots. La structure de cet environnement doit cependant être bien défini : s'agit-il d'un lexique, d'un texte linéaire, d'un environnement hypertexte ? Dans chacun de ces cas, il existe une topologie utilisable par l'agent lors de ses accès à l'environnement. D'autre part, l'espace d'état de l'agent aussi peut être "symbolique". L'état de l'agent est alors donné par une collection d'assertions avérées. Les opérateurs de changement d'état doivent alors produire de nouvelles assertions ou en infirmer certaines. Le mécanisme globalement mis en oeuvre consiste alors pour chaque agent à successivement explorer dans l'environnement les éléments symboliques accessibles, puis ceux traduits par l'état des agents accessibles, et finalement d'en inférer un nouvel état. On ne précise pas ici la nature des opérateurs de changement d'état, mais pour valider ou invalider des assertions symboliques on fait logiquement appel à des moteurs... logiques. En résumé, si on compare cette approche à un système à base de connaissance classique, utilisé pour la résolution de problèmes, on observe que chaque agent fonctionne avec son propre moteur d'inférence, qui utilise à la fois ses connaissances propres (son état), des connaissances issues de l'environnement (les données du problème, par nature intangibles), et des connaissances disponibles auprès d'autres agents. Les filtres d'accès, spécifiques de notre approche, sont utilisés pour contrôler la partie de l'environnement qui est accessible, et donc sélectionner des connaissances considérées en fonction de l'état de l'agent, de même que pour choisir d'autres agents pris en compte. Si on complexifie, on peut utiliser les mécanismes d'adaptation des filtres décrits par ailleurs (cf. « Evolution Locale et Sociale : méthodologie de recherche de solution", p. 143), et on a alors une heuristique implicite d'exploration adaptative des bases de connaissances.

Sommes-nous alors en présence d'un système multi-agents cognitifs ? Probablement, dans la mesure où on dispose de connaissances, où on les manipule, où on en produit éventuellement d'autres par combinaison, et où par ailleurs on gère des accès différenciés entre les agents et vers l'environnement. De plus on utilise éventuellement des stratégies

collectives transcrites dans les mécanismes adaptatifs des filtres. Il n'y a en revanche pas de représentation ni *a fortiori* de raisonnement sur l'état des autres.

On a donc un glissement progressif vers un modèle de type cognitif, en conservant la structure et le processus de calcul, et en changeant seulement la nature des espaces d'évolution. Cette analogie reste cependant très théorique, car fondamentalement on a permis l'explicitation de connaissances sur le problème dans un langage dont la manipulation est l'objet même du processus. Or l'approche réactive utilise la structure du problème et de la solution recherchée, et les transcrit dans les espaces d'état pour contraindre ainsi l'émergence. La représentation du problème ne se fait donc pas de façon symbolique (par le langage), mais analogique (par une structure mise en correspondance).

Plus généralement, le domaine des systèmes multi-agents devrait recouvrir uniquement les systèmes présentant des propriétés complémentaires résultant spécifiquement des interactions entre les agents, et en particulier qui ne sont pas spécifiées a priori et activées de façon opportuniste. Notre hypothèse est qu'en matière de résolution de problèmes, les systèmes cognitifs sont souvent trop séquentiels et restreints (faible nombre d'agent et caractère préemptif) pour présenter de réelles propriétés émergentes. A cet égard il ne constituent bien souvent qu'une tentative de parallélisation de processus réalisables de façon classique. Les travaux spécifiques abordant la coordination, la négociation entre agents, la représentation mutuelle, et l'élaboration de modèles sociaux, ne sont pertinents que pour des contextes temps réel ou des environnements ouverts. En clair, l'apport spécifique des SMA pour la résolution de problèmes doit provenir de l'émergence et de son contrôle, et donc être issu des systèmes à dynamique ouverte.

Dans cette partie relative à nos propositions sur le débat réactif / cognitif et simulation / résolution, nous avons précisé que nous envisageons la résolution de problèmes essentiellement comme une transcription dans un espace adéquat au sein duquel des agents vont évoluer jusqu'à atteindre un attracteur représentatif d'une solution. Le problème est alors d'obtenir la convergence et de contrôler l'émergence. A cet effet nous introduisons des notions de filtrage éventuellement adaptatif. Et par ailleurs nous avons avancé que la complexification des modèles d'agents et le passage au symbolique étaient justifiés lorsqu'on souhaitait simuler des processus sociaux réels, et en particulier des processus humains, ce qui est un des objets de cette thèse. Quand tel est le cas, nous avons insisté sur l'importance d'une référence et d'une utilisation des travaux des domaines spécifiques, que

ce soit la psychologie et la sociologie pour les systèmes sociaux humains, ou l'écologie ou l'éthologie pour les écosystèmes (ou l'économie, ou la physique, ou la mécanique, pour les différents systèmes cibles).

1.2. Intégration réactif / cognitif

L'approche classique de l'intégration réactif / cognitif consiste à coupler quelques agents réactifs, chargés de traitements bas-niveau, avec des agents cognitifs, élaborant un raisonnement à partir des entrées fournies par les agents réactifs. L'organisation générale est alors « horizontale », les agents communiquant soit directement, soit via un tableau noir.

Dans notre proposition, nous utilisons non plus un agent réactif, mais un système multi-agents réactifs, en interaction avec des agents cognitifs. Ce type de SMA réactifs, appelé SMARRPS (cf. par. 4, p. 136), est construit *a priori* afin de résoudre des problèmes, et il fournit donc des solutions aux autres agents. Ses paramètres d'entrée sont les paramètres d'évolution du SMARRPS, ainsi que les données du problème. Celles-ci sont fournies par un autre agent, ou par l'environnement général. Par souci de cohérence structurale, on peut admettre que la couche d'entrée / sortie du SMARRPS prend la forme d'un agent, qui utilise le SMARRPS comme un « solveur », et produit une image du résultat, soit directe (analogique), soit quantitative, soit qualitative ou symbolique par classification. Cet agent « méta-SMARRPS » peut intégrer des couches classiques de type stratégique, relationnelle ou adaptative. On peut ainsi faire interagir plusieurs agents méta-SMARRPS (qui contrôlent donc chacun un noyau SMARRPS), et obtenir une architecture hiérarchique qui combine une approche "émergentiste" à bas niveau, et une approche "cognitiviste" à haut-niveau. L'intérêt est que, dans un agent de type SMARRPS, le mode de représentation de la connaissance, et le mode de raisonnement qui s'en suit, sont multivoques : un solveur SMARRPS ne fournit en général pas une solution unique, mais une famille de solutions ou d'états acceptables. On a ainsi un mécanisme interne propre à prendre en compte des contradictions et éventuellement à proposer directement différentes hypothèses envisageables.

En mode normal, un noyau SMARRPS accepte en entrée un environnement, et évolue jusqu'à se stabiliser sur une solution au problème afférent (éventuellement plusieurs). Mais

le système est paramétrable, et donc commandable à différents niveaux ; on peut ainsi modifier :

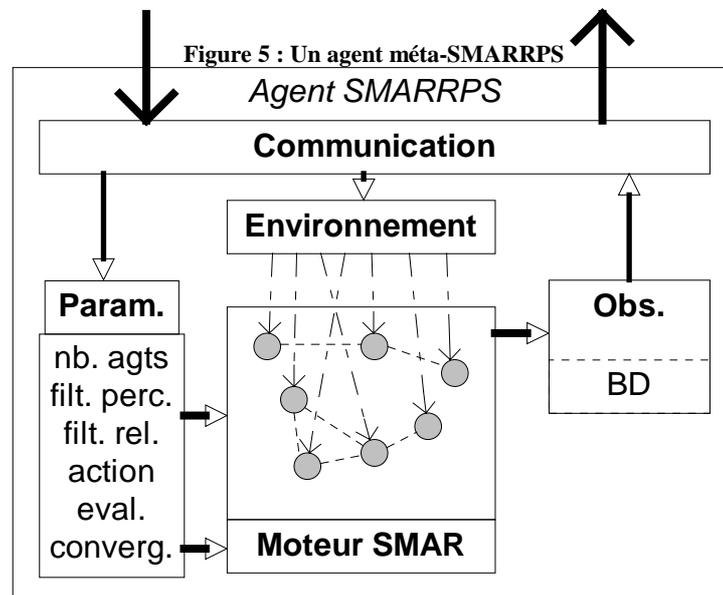
- le nombre d'agents afin d'affiner ou d'accélérer la recherche,
- les schémas d'interaction interne et externe des agents (filtres relationnels et perceptifs),
- la dynamique locale,
- les critères de convergence.

Mais ces modifications de la dynamique correspondent chacune à une stratégie ou à un contexte d'utilisation. Si on considère qu'un SMARRPS doit résoudre un problème sans encombrer l'utilisateur avec des paramètres internes au processus, les seules données résiduelles tiennent à la définition du problème, qui doit se réduire à une expression simple et intuitive des contraintes internes et externes, et un choix de sensibilité, qui indique le seuil de sélectivité de la recherche. Le noyau SMARRPS doit alors s'adapter pour répondre à ces contraintes.

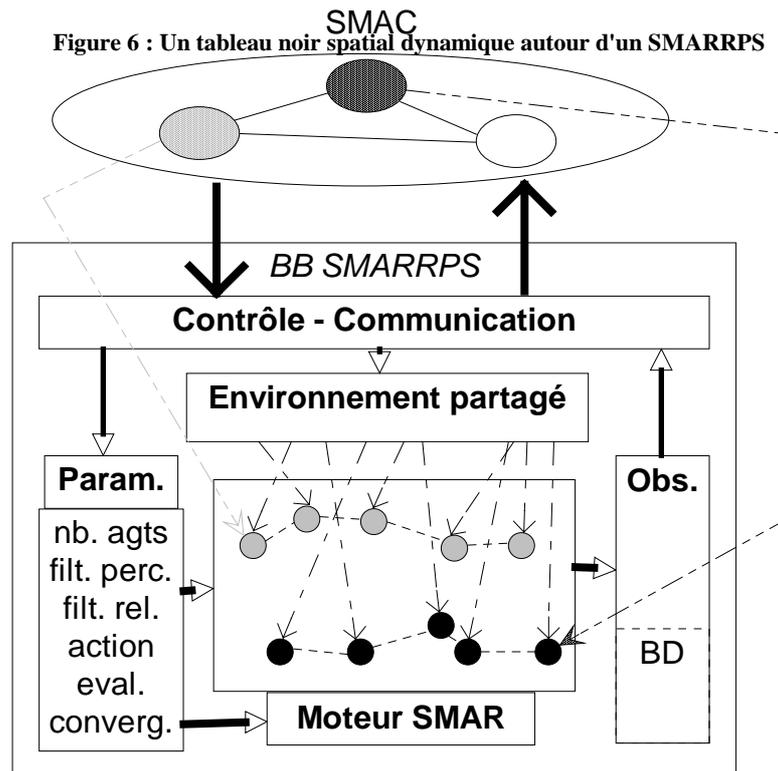
Par ailleurs, le rôle de l'observateur est fondamental pour produire une solution exploitable dans un processus SMARRPS. Il doit détecter les stabilités structurelles, et, au besoin, les interpréter symboliquement. Donc, dès lors que l'on "encapsule" un noyau SMARRPS dans un agent engagé dans un processus multi-agents de type cognitif, il doit pouvoir « observer » lui-même l'état du noyau SMARRPS. Un agent méta-SMARRPS a donc un module interne d'observation, qui traduit l'état du noyau en une forme exploitable pour la communication. Le module d'observation peut utiliser des informations catégorielles stockées dans une base de données. Dans notre travail, nous n'aborderons pas la catégorisation et la traduction sous forme de descripteurs symboliques. Le seul critère pris en compte ici dans l'observation, est la stabilité temporelle sur un pas de temps fixé *a priori* : si l'état du noyau SMARRPS est observé comme stable durant au moins le temps t , cet état est validé comme une solution. Et dans notre modèle, l'observation est directement retransmise aux autres agents cognitifs.

Dans la Figure 5, on donne le schéma général de circulation de l'information dans un agent méta-SMARRPS. La couche « communication » doit traduire les messages entrant en paramètres, état de l'environnement, et produire des messages sortants à partir des états du noyau SMARRPS. Le module d'observation n'est pas synchrone : il ne peut

émettre d'états que quand le processus est stabilisé. Un tel agent méta-SMARRPS a donc un temps de réaction qui peut parfois être important.



Une variante intéressante consiste à faire "coévoluer" dans le noyau SMARRPS différents sous-groupes d'agents réactifs, qui sont chacun contrôlés en fonction des entrées d'un agent cognitif. On obtient ainsi un espace de confrontation de représentations pour les AC. L'agent SMARRPS cède alors la place à un « tableau noir spatial dynamique » (DSBB) structuré par le SMARRPS, et dans lequel les agents cognitifs viennent placer des « opinions », qui se traduisent en état du SMARRPS, et renvoient des informations de cohérence ou de solutions partagées. Les sous-groupes SMARRPS ont chacun une dynamique classique en fonction de l'environnement et des autres agents, mais ils ont aussi des interactions avec les autres groupes, ou plus précisément avec les agents des autres groupes. La couche de communication joue alors un rôle de distribution des commandes sur les différents sous-groupes. L'environnement est commun et partagé par les différents groupes SMARRPS. La Figure 6 donne le schéma de circulation de l'information.



Afin de rendre le noyau SMARRPS fonctionnel avec des agents SMARRPS contrôlés par différents agents cognitifs, il faut intégrer les interactions entre agents SMARRPS de groupes différents. Il s'agit simplement d'une classe particulière d'interactions par rapport au modèle initial. Et elles peuvent être déterminées en fonction des contraintes objectives de la situation modélisée : par exemple, deux bâtiments ne peuvent occuper la même position en même temps, ou encore, les autoroutes ne sont en général pas souhaitées à proximité des habitations. Cependant ces interactions ne peuvent toutes être prévues dès la conception. En effet, on ne sait pas *a priori* quels agents cognitifs vont intervenir dans un contexte ouvert ; or le mode d'interaction au niveau SMARRPS entre les agents réactifs, est fonction des modalités relationnelles existant entre les agents cognitifs « propriétaires » des groupes SMARRPS, elles-mêmes éventuellement dépendantes des relations entre les acteurs représentés par ces agents cognitifs. Par exemple, un agent SMARRPS représentant une maison appartenant à un écologiste, n'aura pas le même comportement vis à vis du passage d'une ligne électrique à proximité, selon que l'acteur proposant ce tracé est lui-même un écologiste (de la même mouvance...) ou un responsable d'EDF. Les registres d'interaction spatiale ne sont pas infinis (ils sont identifiés en théorie de l'information spatiale), et on peut penser que le choix parmi un ensemble est envisageable sans trop restreindre les possibilités dynamiques.

La proposition de tableau noir spatial dynamique est conçue initialement comme un outil d'aide à la résolution collaborative de problèmes spatiaux. Elle permet de confronter les différentes propositions et d'apporter des réponses prenant en compte les contraintes posées par chacun. Le processus d'observation utilise alors la globalité de l'état du SMARRPS pour produire une information cognitive. Mais cette approche permet aussi de produire au niveau cognitif des éléments partiels de raisonnement spatial. En effet, au sein du noyau SMARRPS, lorsqu'un agent, contrôlé par un agent cognitif A, subit *très localement* une forte contrainte due à un autre agent SMARRPS, contrôlé par un agent cognitif B, il peut « informer » A, afin qu'une interaction de type cognitif ait lieu entre A et B, pour que soit A, soit B, modifie sa position, et par là-même, réduise la contrainte. Un effet canonique d'un tel processus sera, en définitive, de figer les agents SMARRPS « fautifs » sur des positions imposées par les agents cognitifs. Le mécanisme de passage d'information depuis un agent SMARRPS vers un agent cognitif « propriétaire » n'est pas trivial, car il n'existe pas, dans l'architecture SMARRPS, de passage intentionnel d'information (communication) d'un agent réactif vers son environnement de contrôle. Il faut donc intégrer aux paramètres d'état des agents SMARRPS un indicateur de « surtension », qui, détecté par le processus d'observation, sera relayé vers l'agent cognitif propriétaire. L'origine de la « surtension » locale pourra être identifiée en venant reprendre la résolution pour cet agent. Ce processus produit une interruption de la dynamique SMARRPS globale, et ne doit donc être qu'exceptionnel.

En conclusion de cette section relative à l'intégration entre approche réactive et cognitive, on voit donc qu'en intégrant, non pas des agents réactifs avec des agents cognitifs, mais des systèmes multi-agents réactifs cohérents avec des agents cognitifs, on dispose d'un mécanisme d'analyse et de raisonnement spatial analogique, utilisable pour les besoins de la résolution globale au niveau symbolique, et qui permet aussi de produire une image dynamique, adaptative, des conflits qui apparaissent.

2. Simulation / Résolution / Information

2.1. De la simulation : le choix d'agents cognitifs socialisés

Dans le domaine de la simulation de systèmes complexes, il est désormais établi que l'approche multi-agents est efficace et fonctionnelle. Ceci, illustré par des exemples en éthologie ou écologie, ne traduit pas une avancée propre aux recherches sur les SMA, mais

plutôt une heureuse disposition de leurs communautés, qui, dans leurs travaux sur la parallélisation et l'activation autonome d'entités, ont, les premières, disposé d'outils informatiques leur permettant de rendre opératoire la systémique. En effet, celle-ci, même si elle paraissait très séduisante dans ses principes, n'a jamais connu de succès probant en termes de résolution de problèmes ou même de prédiction, car elle ne pouvait dépasser le stade de l'analyse et de la modélisation, tant que les ressources informatiques ne permettaient pas d'activer les dynamiques, ni d'en observer les effets émergents. Les communautés de recherche sur les SMA, déjà naturellement sensibilisées aux approches systémiques, ont profité de l'expansion des interfaces graphiques et des principes de développement d'agents issues des approches objets, pour proposer des solutions pratiques, et donc recueillir les fruits d'analyses antérieures non abouties. Il faut observer, à cet égard, que la simulation de systèmes complexes dans son approche multi-agents ne présente pas de difficulté particulière dans sa mise en oeuvre. La seule question informatique un peu fine est celle de la simulation de processus parallèles synchrones ou asynchrones sur machine séquentielle ou "multi-threadée" (processus légers). Pour le reste, la production de résultats scientifiques à partir de simulations conserve toutes ses limitations et contraintes intrinsèques, mais qui ne sont en rien spécifiques à leurs composantes informatiques. La modélisation convoque les disciplines sources, et non le prestataire de "service de simulation". Les problèmes d'initialisation, d'observation, de contrôle, de validation, restent entiers, et ne sont pas résolus de manière "générique" par les travaux actuels sur les SMA.

Pour clore temporairement sur ces questions de simulation, on notera que nous n'avons pas fait référence ici à la "classe" de SMA considérés. En effet, dans les simulations, la distinction entre agents réactifs et agents cognitifs n'est plus pertinente, car elle tient essentiellement à la nature des dynamiques locales utilisées : soit on met à jour l'état d'un agent par application d'une fonction d'activation sur les variables d'entrée (interactions avec l'environnement et les autres agents), soit on fait appel à des mécanismes d'inférence symbolique intégrant à la fois d'éventuels percepts et messages, mais aussi une mémoire, et donc des croyances et stratégies relatives au monde. Cependant, formellement, ces deux approches ne différencient pas les problèmes posés par une simulation, car on retrouve uniformément les questions de la pertinence des modèles, de leur validation, de leur finalité, et enfin de leurs interdépendances. On peut tout au plus considérer qu'activer et exploiter à des fins scientifiques des grandes populations d'agents cognitifs, est plus

difficile et hasardeux que de viser les mêmes buts avec des agents réactifs, pour des raisons objectives de mise en oeuvre. La préférence "réactive" se justifie aussi par la relative omniprésence en simulation multi-agents de la problématique de l'émergence ; en effet, dès lors que l'apparition potentielle de structures globales stables est l'objet même de l'étude, il est généralement plus pertinent de minimiser la complexité locale tout en maintenant les formes cibles. Le choix "réactif", en tant qu'il soit plus simple, est donc logique.

Cependant, et nous en venons ici à un élément de notre thèse, le choix d'une approche dépend du processus à modéliser et simuler. Lorsqu'on considère des objets simples en interaction au sein d'un contexte, on aborde la modélisation sous la forme d'une description des variables d'état, puis de leur dynamique, et on écrit l'ensemble sous forme analytique. On est alors naturellement dans un cadre réactif. Si on préfère une approche fonctionnelle plutôt qu'individuelle, comme souvent en systémique, alors on peut éventuellement envisager des descripteurs qualitatifs ou symboliques, dont la dynamique repose sur des relateurs logiques. Mais le mécanisme d'activation reste réactif.

Lorsque par contre on s'intéresse à des objets beaucoup plus compliqués, dont en particulier des êtres humains ou des organisations sociales élaborées, le caractère essentiellement symbolique des processus en jeu suggère de lui-même une simulation par des agents cognitifs. Or, de par sa plus grande facilité, et du fait de la domination du domaine par les communautés anglo-saxonnes, c'est en réalité un modèle réactif qui est couramment utilisé, dans la mesure où il est suffisant pour implémenter la théorie dominante du comportement des acteurs, à savoir l'approche utilitariste ou rationalisée. Celle-ci, très liée à la théorie des jeux, apparaît comme cadre permettant l'analyse de processus dits "sociaux", mais dont on observe en général qu'ils font complètement abstraction de la représentation même de la situation par les acteurs. Ainsi, dans différents travaux classiques [Bonabeau & Theraulaz, 1994], si on fait apparaître des tendances émergentes en terme de coopération, ou de préemption de comportements locaux, on ne trouve aucune hypothèse sur la construction sociale de représentations, l'échange de valeurs, ou des mécanismes de socialisation "symbolique". S'il est admissible que l'on puisse se limiter aux quantifications des interactions de la théorie des jeux pour l'évaluation de choix sociaux optimaux, hors temporalité des processus, cela devient largement insuffisant lorsqu'il s'agit de simuler des interactions sociales humaines dans leur déroulement. La maturation des croyances repose sur des processus incrémentaux d'adaptation mutuelle à partir des interactions symboliques, elles-mêmes largement

contrôlées par les représentations sociales et la position relative des acteurs. Lorsque, ainsi que nous le faisons dans cette thèse, on s'intéresse à un processus dont l'objet est l'évolution des croyances, peut-être même des valeurs, comme ici dans les négociations qui nous intéressent, l'approche réactive semble inadaptée, à moins que l'on prenne des chemins incertains qui feraient évoluer des agents dans des univers de croyance posés *a priori*.

Nous prenons donc le parti de simuler des processus sociaux humains à partir de modèles qui n'en soient pas réducteurs à des automates en interaction. Et nous faisons donc le choix de modèles cognitifs, intégrant mémoire, représentations sociales multiples, et stratégies collectives. Il s'agit donc de privilégier la composante symbolique des interactions humaines, et de tenter de les simuler. De ce point de vue, notre approche est donc antinomique des simulations les plus courantes, qui optent, comme on l'a vu, pour une simplification des agents, afin d'élucider les phénomènes émergents. Cette perspective est présente dans notre proposition, mais est précisément reportée dans une problématique dont elle est classiquement absente, à savoir la résolution de problèmes, abordée ci-après.

En résumé, nous traitons de simulations intrinsèquement non réactives, et nous en considérons les problématiques spécifiques au travers de modèles fondés sur les théories sociologiques non utilitaristes ; alors qu'à l'inverse, nous abordons la résolution de problème en nous abstrayant complètement de toute représentation symbolique, donc hors du cadre cognitif classique en Résolution Distribuée de Problèmes.

2.2. De la Résolution de Problèmes : approche réactive et émergence de solutions

La "résolution de problèmes" recherche les moyens permettant d'atteindre des objectifs donnés, en fonction d'un ensemble de contraintes, règles, contextes. Classiquement, en Intelligence Artificielle, on va soit faire appel à des méthodes "aveugles" ou "heuristiques" permettant l'exploration d'espaces contraints (approche procédurale), soit utiliser des connaissances permettant de réduire les espaces de recherche, et d'explicitier les chemins suivis (approche déclarative).

Dans les approches heuristiques, le processus même de résolution fait abstraction de la nature de la solution recherchée. Ainsi, dans la plupart de ces méthodes, l'exploration de l'espace des solutions est conduite indépendamment de l'évaluation pour les solutions "courantes" : on sélectionne des solutions à partir de leur indexation, puis on les évalue.

Seule la structuration de l'espace des solutions peut être liée à des contraintes sémantiques. Le concepteur / utilisateur, par le biais du mécanisme d'évaluation, précise "*ce qu'il veut*". Dans ce cas, la difficulté réside dans la capacité du système à parvenir "rapidement" à restreindre l'espace de recherche, et par là-même à maîtriser l'explosion combinatoire. A l'extrême, pour des espaces de solutions continus, et pour des critères de choix quantifiables, on entre dans le cadre de l'optimisation.

Dans les approches déclaratives (systèmes à base de connaissance), la dynamique de résolution est contrôlée par un "moteur" logique, qui enchaîne les assertions à partir de données initiales, et fournit finalement des connaissances plausibles. Dans ce cas, le rôle du concepteur / utilisateur est de signifier "*ce qu'il sait*", que ce soit dans l'absolu pour constituer les bases de connaissances, ou selon le contexte, pour décrire une situation de départ. Malheureusement, la production et la formulation des connaissances relatives à un problème, et plus particulièrement l'articulation des inférences (les "chemins" du raisonnement), ne sont que difficilement réalisables dans les situations les plus complexes et les moins structurées. Par ailleurs, et c'est une des origines de l'Intelligence Artificielle Distribuée, les connaissances n'émanent pas toutes de la même source, et ne constituent pas globalement un ensemble cohérent. On est donc contraint de segmenter, puis d'organiser entre elles, des sources de connaissances.

Lorsqu'on considère le type de problème posé par l'aide à la décision en aménagement du territoire, on observe plusieurs facteurs limitant la pertinence des méthodes évoquées ci-dessus. Tout d'abord l'utilisateur (le décideur) ne sait jamais exactement ce qu'il veut ; et ce pour deux raisons : ses éléments d'évaluation sont souvent très locaux et contextuels (un des avatars du principe de rationalité limitée), et il n'y a pas de choix absolu, puisqu'il est exceptionnel que se dégage une meilleure solution pour tous les critères considérés. De plus, le savoir et l'expertise n'ont pas de valeur générale, hormis pour la description d'une situation. Dès lors qu'il y a évaluation, le système de valeur entre en jeu, et le savoir devient contingent. Il n'y a ainsi pas de détermination stricte dans les préférences d'un acteur. Enfin, la décision est un processus incrémental, dans lequel l'évaluation peut être affinée en cours de processus, adaptée même en fonction des solutions précédemment obtenues.

Comme on le voit , et pour le type de problème qui nous intéresse, on justifie une approche alternative par l'absence de connaissances absolues, authentifiables par une communauté

de savoir, ainsi que par la contingence et le caractère local des contraintes. On satisfait alors aux critères de choix d'une approche multi-agents réactifs.

Dans celle-ci, le concepteur / utilisateur définit l'espace des solutions, il précise *ce qu'il veut* sous forme de contraintes locales, et le contexte est alors décrit par les données de l'environnement. Il n'y a pas de corps de connaissances symboliques à produire, ni de fonction ou de mécanisme global d'évaluation. Si l'on reprend la définition de Laurière : "*Trouver un ensemble X de points dans un espace E qui vérifient un ensemble de contraintes $K(X)$* ", on peut dire que le principe abstrait de l'approche SMAR est de distinguer au sein de K deux types de contraintes : les contraintes internes qui définissent la position des points entre eux, et des contraintes externes qui précisent la relation des points (solutions) avec des données externes (l'environnement) ; puis de "poser", plus ou moins délibérément, un ensemble de points, et de les laisser évoluer en parallèle, avec un mécanisme local de minimisation. Lorsqu'il y a stabilisation (son occurrence n'est pas abordée ici), la "forme" obtenue peut être interprétée par l'utilisateur comme une solution temporaire, en ce qu'elle est au moins meilleure localement que l'initiale. En fonction des paramètres dynamiques, la forme globale est plus ou moins satisfaisante. Jusqu'ici, il n'y a pas de proposition originale dans cette approche.

Par contre, on est toujours conduits à s'interroger sur au moins deux aspects fondamentaux de la conception et la mise en oeuvre d'une telle approche. Ce que nous avons appelé respectivement le contrôle de l'émergence et le contrôle de la convergence.

Le premier aspect concerne la capacité du concepteur à maîtriser la forme produite par le processus parallèle, sans "centraliser", c'est-à-dire sans introduire de critère global, ou de processus "observant" nécessaire pour la résolution. Est-il donc possible, et comment, de spécifier des contraintes locales suffisantes pour traduire une attente globale (l'exemple du coût d'un projet d'aménagement est caractéristique à cet égard) ? Notre réponse est souvent positive, mais de nombreux cas restent non résolus. La question sous-jacente est celle de l'organisation du système multi-agents : quelle place pour chaque agent, quelles relations, quelle dynamique ? Nous reviendrons aux éléments de solution par la suite.

Le deuxième aspect est très classique en résolution de problème, et a trait à la capacité du système à converger effectivement vers une solution, avec deux biais possibles :

- il n'y a pas stabilisation, soit qu'il y ait oscillation, soit qu'il y ait divergence,
- il y a stabilisation, mais dans un minimum local, tel que pour de nombreux agents les contraintes ne soient pas satisfaites.

L'écueil de l'instabilité est levé au moyen du contrôle de l'amplitude dynamique, alors que la capture par des minima locaux est un problème encore largement ouvert. La méthode la plus classique pour "en sortir" est celle du recuit simulé : on laisse le système se stabiliser avec une certaine température (agitation), puis on rehausse la température pour le sortir des minima locaux. Malheureusement, cette méthode est relativement aléatoire en ce qu'elle ne contrôle pas l'opportunité du réchauffement pour chaque agent.

Que ce soit pour le problème de l'émergence ou de la convergence, nous apportons dans cette thèse des éléments de réponse cohérents, assortis de propositions pratiques pour le concepteur / utilisateur. Notre idée principale est d'introduire des filtres informationnels, qui contrôlent l'accès des agents d'une part aux données du problèmes, et d'autre part aux autres agents. Ils sont respectivement appelés "filtres perceptifs" et "filtres relationnels", ou encore "filtre externe" et "filtre interne". Ces filtres constituent une évolution des "champs" informationnels proposés initialement par Yves Demazeau [1991]. Il est possible, à partir de ces filtres, de définir les formes émergentes, de maîtriser la dynamique, et même, au besoin, de sortir des minima locaux. On montre comment le concepteur / utilisateur peut préciser "ce qu'il veut" en organisant les agents à partir des filtres. Ceux-ci sont fondamentaux dans la structuration du système ; en effet, on peut spécifier des fonctions particulières aux agents en leur attribuant des types différents de filtres. De plus, si on souhaite améliorer les performances du système, on peut coupler la forme même des filtres sur l'état des agents, et obtenir ainsi un comportement adaptatif en fonction de l'état de satisfaction des contraintes locales. Tout ceci suppose cependant l'existence d'une méthodologie pragmatique permettant de maîtriser tous les paramètres disponibles, à la fois pour la construction du système, et pour son utilisation. Nous abordons la construction d'une telle méthodologie en donnant un guide discutant successivement l'espace d'état des agents, leur fonctions d'activation, leur filtre perceptif, leur filtre relationnel, et enfin l'articulation de ces différentes fonctions entre elles. Dans une perspective de calcul, ce guide se fonde sur un principe de minimisation des coûts d'accès et de calcul, et raisonne donc par rapport aux économies possibles sans obérer la capacité du système à résoudre les problèmes.

Par ailleurs, l'introduction et la formalisation des filtres informationnels permettent de proposer une lecture analytique de la dynamique de ces systèmes multi-agents, qui, sans être aboutie, ouvre différentes perspectives quant à la recherche de preuves de convergence. On montre en particulier que ces filtres interviennent sous la forme d'une convolution sur l'état de l'agent, de telle sorte que structurellement ce modèle diverge du cadre classique des automates cellulaires.

Pour revenir sur la réflexion initiale relative au cadre classique de la résolution de problèmes, on peut observer que l'approche est plutôt de type procédural, car on propose un mécanisme de recherche ; mais le concepteur / utilisateur introduit toute la connaissance qu'il a du problème dans la structure qu'il donne au système devant le résoudre. On a donc une composante déclarative importante ; et, de plus, le système multi-agents réactifs est animé par un moteur qui active les agents en parallèle pour modifier l'état du système, de même que les moteurs d'inférences produisent un nouvel état de connaissance dans les systèmes experts. Cependant, le savoir qui est transcrit par le concepteur dans le système n'est pas symbolique ; il est purement structurel, et la nature des interrelations éventuelles entre propriétés mises en oeuvre, est mécanique, analogique, spatiale (exclusion mutuelle par exemple), mais surtout pas logique. A cet égard, et sans que cela soit explicite, on peut affirmer que cette approche de la résolution de problèmes, par son caractère analogique, contribue à replacer l'utilisateur "dans la boucle" ; en effet, celui-ci, aussi bien lors de la construction que lors de l'interprétation, doit successivement traduire puis produire le sens qu'il peut exploiter pour ses besoins. Le système en est totalement abstrait ; et il n'y a pas ici, comme dans d'autres travaux, "d'ancrage des symboles" ("symbol grounding") qui se produirait *ex nihilo*. On peut tout au plus admettre qu'il y a éventuellement production de nouvelles structures stables, et donc d'une forme de sens par catégorisation, lorsque les agents peuvent adapter leurs filtres, et que la forme de ces filtres traduit des propriétés locales détectées lors de la convergence. La place de l'utilisateur dans ces approches "émergentistes" de la résolution de problèmes nous amène ainsi à requalifier le domaine en "aide à la résolution de problème" ; ce qui, conformément à l'aphorisme ubiquiste : "un problème bien posé est à moitié résolu", nous conduit finalement à considérer que l'objet de la construction est la (re-)formulation d'un problème dans un cadre qui permettra son évolution vers une solution. Un tel principe paraît naturellement adapté aux situations d'aide à la décision, et plus encore lorsqu'il va s'agir de faire échanger différents acteurs autour de leurs représentations d'un problème.

2.3. Résolution de problèmes et simulations : différences et similitudes

Lorsqu'on présente un système multi-agents réactifs pour la résolution de problèmes, et particulièrement quand on laisse apparaître le processus de convergence, un observateur naïf s'extasie souvent devant "cette intéressante simulation", et ne détecte pas les capacités de calcul du système. En effet, si l'on compare l'apparence des travaux relatifs à la simulation comportementale, et celle de la résolution de problème, on a globalement les mêmes phénomènes : initialisation à partir de situations peu structurées, ou très localisées, puis développement, exploration, agrégation, et stabilisation éventuelle en formes structurées, liées à l'environnement. Et il n'y a réellement pas de différence dynamique. Le processus parallèle est le même que l'on fasse une simulation de fourmilière ou une segmentation d'image.

Les différences sont ailleurs, et relèvent de trois points principaux : la finalité et l'orientation de la conception, l'exploitation de la dynamique, et la traduction d'éventuels états de convergence. Une de nos contributions est d'explicitier les différences et l'orientation que l'on peut prendre dans chacune des phases.

En premier lieu, la finalité et les données de la simulation et de la résolution sont très différentes. Simuler, c'est produire une représentation informatique dynamique d'un phénomène, à partir de descripteurs essentiellement locaux, et afin d'observer les implications globales que ceux-ci peuvent avoir lors de l'activation parallèle des fonctionnalités, de les comparer à des formes connues dans le monde réel, et d'en inférer la validité des hypothèses initiales. Une simulation validée peut alors devenir un outil de prévision. Résoudre un problème, c'est le transcrire dans un système dynamique dont l'état doit pouvoir être interprété comme une solution en cours d'élaboration. Dans le cas de la simulation, soit on connaît les comportements locaux, et on veut observer leurs conséquences globales (objectif de prévision et de conception de systèmes complexes), soit on connaît des formes globales, et on souhaite valider des hypothèses sur les comportements locaux les ayant produites (exploration descendante), mais dans les deux situations on conçoit à partir d'une situation initiale donnée. On notera que l'élaboration des hypothèses locales productrices de formes globales n'est pas du ressort du concepteur informaticien, mais d'un modélisateur disciplinaire spécialiste du domaine simulé.

Pour la résolution de problème, on souhaite trouver la façon d'organiser spatialement (localisation) ou temporellement (ordonnancement) un système pour satisfaire des contraintes, à partir d'une situation initiale connue ou non (différence entre la recherche des transitions ou simplement des positions). On conçoit donc ici à partir de la situation finale. Plus précisément, on doit découvrir le bon système qui respectera dans ses différents états les contraintes du problème, et pourra, en évoluant, les réduire. La problématique conceptuelle est donc très différente puisqu'il faut imaginer *a priori* une structure de système apte à produire différentes formes. Et ceci en s'abstrayant de la sémantique et du contenu, puisque l'interprétation est du ressort de l'utilisateur (approche réactive). Il n'y a pas, pour ce faire, de méthode stricte ; et on peut noter que la confusion entre simulation et résolution peut être entretenue par l'usage répétée de "simulation de résolution de problèmes" : ignorant souvent toute méthode de spécification locale à partir de formes globales, on est amené à faire des essais, et donc à tester des choix de structures d'agents en les activant, et en observant quelles formes sont obtenues. On a donc alors transité par une simulation pour établir des règles de construction, utilisables *a posteriori* directement à partir des spécifications d'un problème. En réalité il s'agit là de la phase classique de "mise au point" ou de réglage du système de résolution, avant son utilisation effective sur des cas réels. Par ailleurs, lorsqu'on dispose de bonnes solutions obtenues par d'autres méthodes, on peut souhaiter ajuster le fonctionnement jusqu'à atteindre les mêmes résultats. En résumé, dans le cas d'une simulation, la démarche conceptuelle de l'informaticien est très faible, puisqu'il a juste à proposer la bonne architecture permettant la mise en oeuvre des descripteurs proposés par le modélisateur du domaine source ; alors que pour la résolution de problème, l'informaticien doit, après avoir recueilli les données et contraintes auprès du client, concevoir la structure et les interactions produisant les formes souhaitées. L'idéal conceptuel serait de disposer d'une catégorisation des problèmes, assorties d'une analyse préalable, et telle que l'informaticien n'aurait qu'à identifier la bonne classe, puis appliquer la structure recommandée.

En deuxième lieu, il faut s'interroger sur le statut de la dynamique (l'évolution des états au cours du processus). Est-elle l'objet ou l'outil du processus ?

En simulation, qu'elle soit ascendante ou descendante, on construit un système pour en observer l'évolution et conclure sur les hypothèses locales initiales ou sur les formes atteignables. La dynamique est donc un produit de la conception, que l'utilisateur va, au besoin, analyser et exploiter si le déroulement l'intéresse (dans le cas par exemple des

simulations de processus temps-réel où le temps n'est pas une variable explicite). A l'extrême, lorsque le but d'une simulation ascendante est de reproduire un processus temporel connu par observation du processus réel, le concepteur / utilisateur va ajuster le système afin de produire une dynamique donnée ; mais il n'y a pas de critère général *a priori* quant à sa forme ou ses caractéristiques.

A l'inverse, en résolution de problèmes, la dynamique du système est une "machine à produire des solutions", puisque on introduit des contraintes, des descripteurs, et on "laisse faire la machine" en espérant qu'on l'a bien conçue, et qu'elle nous donnera une ou des solutions. La dynamique est donc un outil qu'il va s'agir de construire au mieux. La qualité de la conception, et donc du résultat, réside dans différentes caractéristiques souhaitées : la **convergence** tout d'abord, sans qui « la machine à résoudre » ne s'arrête jamais ; puis la **pertinence**, qui assure que l'état produit est une solution au problème ; la **rapidité**, qui précise que la convergence ne doit pas seulement avoir lieu, mais que de plus elle doit se faire en un temps raisonnable pour les ressources disponibles ; l'**économie**, qui précise que les ressources utilisées doivent être minimales pour un produit donné ; la **contrôlabilité**, qui garantit que l'on peut d'une part évaluer l'état d'avancement du processus, et d'autre part éventuellement le réorienter ; la **simplicité** enfin, parfois corollaire de l'économie, qui permet que des utilisateurs non experts puissent produire des solutions, et éventuellement comprendre le processus source. Une caractéristique complémentaire peut s'ajouter aux précédentes, bien qu'elle ne soit pas intrinsèquement exigée : la **flexibilité**, c'est-à-dire la capacité de la machine à produire des solutions à d'autres problèmes avec des ajustements mineurs. En résumé, la conception d'un système pour la résolution de problèmes fait de la dynamique un outil très élaboré qu'il va s'agir d'optimiser. Une de nos propositions porte donc sur la façon de construire un système multi-agents pour la résolution de problèmes, dont la dynamique réponde aux caractéristiques précitées.

Enfin, en troisième lieu, la traduction que l'on donne des états de convergence est très dépendante de la finalité du processus mis en oeuvre. Dans une simulation, l'état du système, quel qu'il soit, est signifiant, car il peut être interprété comme une possible situation atteinte dans le temps ou l'espace ; en revanche, pour la résolution d'un problème, seuls les états stables sont intéressants, car ils caractérisent l'atteinte d'un attracteur, et donc d'un "satisfecum" au sens de Simon [1977]. Toute situation intermédiaire non stable, par un principe dynamique très simple, est nécessairement améliorable, pour peu que le "paysage dynamique" ne soit pas simplement tout plat (entropie nulle) et que les états

soient bornés (hypothèse admissible pour des problèmes réels : contrainte pragmatique). Les cas d'oscillation, si on oublie qu'ils sont souvent peu identifiables (surtout pour des excursions importantes), peuvent refléter formellement l'existence de solutions étendues, et non plus seulement ponctuelles ; ce qui se traduit par l'équivalence de ces différents états par rapport au problème. Cependant, les oscillations dans la résolution de problème manifestent plus généralement que le système est "trop chaud", et que les variations d'état devraient être davantage limitées pour amener une stabilisation sur un point fixe. Donc, en résolution de problèmes, on recherche la convergence vers des états ponctuels stables, alors qu'en simulation elle est indifférente, hormis si l'émergence de structures stables est un phénomène observé. A l'extrême, il n'est jamais nécessaire de présenter à l'utilisateur final les états intermédiaires d'une résolution de problème.

Ceci doit cependant être tempéré dans le cas où on utilise une simulation pour résoudre un problème de type spatio-temporel (ordonnancement). Dans un premier temps on valide un modèle descriptif de l'environnement par simulation, en n'introduisant pas les objets commandable. Puis on ajoute ces objets, et on teste des dynamiques locales, éventuellement interdépendantes, jusqu'à ce que les formes spatio-temporelles émergentes satisfassent différentes contraintes. Enfin on applique ces dynamiques au système réel, en espérant que la clôture du modèle n'a pas induit de divergences trop marquées avec la réalité. Dans ce cas, et bien que pratiquement on résolve un problème, les états intermédiaires semblent utiles car descriptifs des trajectoires à respecter. Mais il faut ici bien distinguer ce que l'on pourrait appeler des solutions "en extension" de solutions "en intention" : si on enregistre la totalité des trajectoires (en extension) pour les faire suivre *a posteriori* par les objets réels, comme une consigne stricte, on a effectivement résolu un problème, puis appliqué la solution ; si en revanche, on porte du modèle au réel les comportements réactifs mis en oeuvre (fonctions d'entrées et d'activation), alors on ne fait qu'utiliser les résultats d'une simulation que l'on espère valide. Dans le cas en extension, l'espace d'état lui-même inclut la dimension temporelle (ou celle du processus réel), et donc la solution décrite dans cet espace n'est valable qu'après convergence au sens de l'évolution de la solution (temps de calcul, et non temps du processus). De nouveau seuls les états stables sont significatifs.

Par ailleurs, la représentation de l'état se suffit à elle-même en résolution, alors qu'en simulation on doit généralement introduire des indicateurs permettant d'observer le processus et de la comparer à des données. En effet l'intérêt même des approches multi-

agents est de permettre la simulation de grands systèmes complexes (nombreuses entités) spécifiés localement ; or ils sont plus signifiants en regard des formes globales émergentes que des comportements locaux. Seuls des indicateurs globaux (variables "moyennantes") peuvent éventuellement nous renseigner sur la ressemblance éventuelle avec un système réel. Ceci est très classique pour les systèmes complexes où des propriétés émergent sous certaines conditions (cf. l'exemple du magnétisme), et n'ont de sens que globalement. L'état exact du système obtenu n'a alors pas d'importance, mais c'est plutôt sa structure qui est déterminante (connectivité, extension, fractalité). En résolution l'état exact constitue la solution. La répartition précise est signifiante.

2.4. Mise en œuvre du modèle VOYELLES

A partir du modèle VOYELLES introduit dans le chapitre 2, on peut détailler la démarche de conception en fonction des différents objectifs possibles, et de l'approche choisie.

Ainsi, par exemple, si on veut faire de la résolution de problème avec une approche réactive, la donnée initiale est constituée par le problème à résoudre, décrit par la combinaison de contraintes structurelles au problèmes (règles), et de données contextuelles spécifiant une forme particulière du problème (initialisation et objectif). On a tout d'abord un Environnement, donné par le contexte. Le principe de la résolution par ce type de méthode étant la construction d'une image analogique, décomposable en agents susceptibles d'évoluer en fonction des contraintes, on va choisir une Organisation apte à décrire correctement le schéma d'ensemble. Puis, cette Organisation va se traduire en formes d'Interaction qui la reconstruise, et en agents, qui l'instancient plus ou moins finement. L'utilisateur n'est pas représenté dans le système ; et son accès peut se limiter à la forme finale, sans distinction des agents de classe équivalente.

$$\text{SMA-R-RP} = \{(E+O) \rightarrow (I+A), U(O)\}$$

Si, toujours dans une approche réactive, on fait de la simulation de système complexe, alors, en général, on cherche à évaluer, et à tester pour prévoir, les formes globales obtenues par activation parallèle d'entités que l'on sait décrire localement. Dans ce cadre, il y a une première démarche qui consiste à choisir la clôture du modèle, c'est-à-dire, ici, à distinguer les Agents de l'Environnement. Puis, dans un deuxième temps, on va spécifier les attributs d'état et la dynamiques propre des agents ; ce qui permet, dans un troisième temps, de préciser les interactions internes et externes, et donc les dynamiques afférentes.

Le plus souvent l'Organisation intervient comme paramètre à tester, c'est à dire qu'il va s'agir d'une forme particulière contraignant les interactions, et que l'on va ajuster jusqu'à obtenir la forme globale souhaitée. On peut envisager l'hypothèse inverse, où l'organisation est donnée, et son instanciation en agents et interactions est le sujet de la simulation. Enfin, on observe « l'auto-organisation », et alors, on va mesurer la distance entre l'état global obtenu et une organisation particulière, prise comme hypothèse. Dans un tel cadre de simulation, le système multi-agents constitue un « laboratoire », et, à cet égard, l'utilisateur est susceptible d'observer et de contrôler n'importe quelle partie, depuis les agents, jusqu'à des images globales agrégées (statistiques).

$$\text{SMA-R-S-SC} = \{(E+A) + I \rightarrow O \mid (E+A) + (O \rightarrow I), U(EAIO)\}$$

Dans un cadre cognitif, et en simulation, le schéma conceptuel dépend du thème de la simulation. A l'extrême, comme dans de nombreux travaux portant sur la coordination, la communication, et la dépendance, les agents ont peu d'importance, et ce sont les interactions qui constituent le sujet. Par ailleurs, l'Environnement est inexistant, car il n'y a pas de référence à des données externes. L'Organisation a soit un statut de donnée structurante (normes, valeurs), soit est l'objet de la simulation. L'utilisateur observe les interactions.

$$\text{SMA-C-S-Com} = \{(I+A) \rightarrow O \mid O \rightarrow (I+A), U(I)\}$$

Une approche alternative consiste à considérer que l'organisation est une entité qui va activer des interactions pour produire un résultat particulier.

$$\text{SMA-C-S-Com} = \{O(A+I), U(AI)\}$$

Quand on simule des processus sociaux humains, comme des négociations, des discussions, ou la prise de décision collective, on teste des modèles d'acteurs transcrits dans des modèles d'agents, couplés avec des modes interactifs particuliers. L'environnement, s'il existe, est donné comme support ou base de discussion ou de négociation. L'Organisation est donnée *a priori* quand l'approche est structurelle (organigramme), elle est produite et observée quand l'approche est « actionniste » ou psychosociale. L'utilisateur suit alors agents et interactions.

$$\text{SMA-C-S-PSH} = \{(A+I)+E \rightarrow O \mid O+E \rightarrow (A+I), U(AI)\}$$

L'approche classique de la Résolution Distribuée de Problèmes, de type cognitive (p.e. multi-expertise, ou tableau noir), part d'un problème à résoudre, mais l'aborde d'abord en fonction des agents susceptibles d'y contribuer. L'organisation est un choix qui va déterminer la performance du système. Les interactions sont de moindre importance, car le processus est souvent « séquentiel par morceaux », les agents « se passant la main » pour traiter le problème. L'environnement reste un déterminant du problème, mais il n'a pas de place particulière dans la conception. L'utilisateur observe les agents.

$$\text{SMA-C-RP} = \{E+(A+i)+O, U(A)\}$$

Enfin, dans le cas des SMA dédiés à l'information dans les réseaux ouverts, l'environnement est donné, les interactions sont fixées par les règles de communication, les organisations sont aussi partiellement fixées, au moins pour la partie dépendant des agents « étrangers », et on détermine les agents. L'utilisateur observe et interagit avec les agents.

$$\text{SMA-C-I} = \{(E+I+O)\rightarrow(O+A), U(A)\}$$

3. Apport potentiel de la sociologie

Après avoir présenté dans le chapitre 3 quelques notions de sociologie, assorties de commentaires relatifs à leur applicabilité à l'ingénierie de systèmes collectifs artificiels, nous souhaitons aborder ici la question de la pertinence de cette référence sociologique, qu'elle soit implicite ou explicite. En effet, soit elle apparaît comme nécessaire ou incontournable, et le travail de lecture transversale entamé ici s'impose ; soit une alternative « désocialisée » existe, et l'effort méthodologique doit alors porter sur le « nettoyage » conceptuel.

Nous allons donc détailler le cadre de l'ingénierie des systèmes collectifs artificiels selon les trois sous-classes déjà introduites : la simulation de systèmes complexes, la résolution de problèmes, et le développement d'agents autonomes pour des systèmes d'information ouverts et distribués.

3.1. Simulation de systèmes complexes

La simulation de systèmes complexes à partir de systèmes collectifs artificiels repose sur un principe d'analogie structurelle consistant à transcrire dans des agents artificiels les objets du système source. En construisant ainsi un ensemble d'agents en interaction

reproduisant individuellement la dynamique locale des entités systémiques, on obtient une image artificielle du système source, qui peut soit valider des hypothèses locales par observation des processus émergents, soit servir de laboratoire virtuel pour tester des hypothèses comportementales ou des registres d'action. La condition de réalisation et d'utilisation d'une telle simulation est que le support matériel à l'implémentation des agents respecte le parallélisme intrinsèque (ou la séquence fine) des processus réels simulés.

Dans ce cadre, on peut admettre que les systèmes sociaux humains ne vont constituer un modèle que lorsque le système à simuler inclue une société humaine (proposition quasi-tautologique). Le recours à des modèles sociaux humains comme métaphore pour la lecture d'autres types de systèmes complexes ne devrait constituer qu'une médiation transitoire entre ces systèmes sources et leur simulation ; cependant, cette possibilité est souvent une réalité dans la mesure où les systèmes d'agents artificiels utilisés ont été fondés initialement sur des modèles explicites ou implicites de comportements humains. Si en revanche on cherche à simuler une société humaine, alors toutes les ressources de la sociologie (ou de la psychologie) peuvent être utiles pour déterminer les bons attributs et comportements à attacher aux agents artificiels. Dans une stricte perspective de modélisation / simulation, cela suppose que l'on dispose effectivement d'un modèle social transposable dans un système informatique. A cela deux perspectives : soit on ne reconnaît comme modèles *sui-generis* que des descriptions formalisées au moyen de langage axiomatisés autoréférents (« formels »), comme les mathématiques, et dont la transposition ne rencontre pas de difficultés techniques insurmontables. Dans ce cas, on s'expose à ne pouvoir rendre compte que de fractions limitées de la réalité sociale humaine, qui semble par nature difficilement réductible à des déterminismes stricts. Ainsi, par exemple, les théories économiques peuvent être supportées analytiquement, mais leur portée reste limitée (encore que les systèmes économiques puissent à l'inverse espérer l'adaptation des individus réels au modèle). L'alternative est d'accepter que des modèles sociaux soient issus de démarches descriptives, fondées sur le discours, et structurées autour de lexiques argumentés, et eux aussi largement autoréférents. Dès lors on sort du cadre poppérien, mais en retour on étend les modèles, en particulier vers les fluctuations du champ symbolique, ou la diversité des comportements humains. Or il ne semble pas que cette approche soit moins bonne en terme de vraisemblance et d'opérationnalité des modèles. En effet, la validité d'un modèle n'est pas intrinsèque ; elle résulte du choix fait par l'observateur /

modélisateur quant à la clôture du système considéré. Et en particulier l'universelle validité de ce modèle (comme constitution d'une réalité acceptée socialement, et donc opératoire) repose sur le consensus. Qu'il se fasse sur la clôture comme dans les modèles formels, ou sur l'idiolecte pour les modèles discursifs, on se trouve confronté à des enjeux subjectifs de même nature. On objectera cependant que la transposition informatique n'est, dans l'approche discursive, pas acquise. Cela tient au paradigme dominant actuel qui suppose une description globale et séquentielle des processus (« de haut en bas »). Si on reconnaît, comme les tendances actuelles de la simulation distribuée portent à le croire [Ferber, 1995b], que l'approche adéquate de la simulation des systèmes complexes est la construction « de bas en haut », par production de micro-modèles interdépendants au sein d'un système englobants, alors on ouvre la voie à l'implantation informatique des modèles discursifs, au moyen de systèmes symboliques structurés, traduisant directement les concepts et leur articulation. Et donc, il revient aux disciplines descriptives et explicatives, ici la sociologie, ou les sciences sociales en général, de renseigner sur les modèles consensuels (ou prospectifs) à considérer. La notion de règle symbolique, au sens des systèmes à base de connaissance, constitue alors le médium de leur implémentation, transposé dans des modèles distribués de type multi-agents. La conclusion ici est qu'il est possible de modéliser et simuler des sous-systèmes de sociétés humaines, formellement ou non. La validité de l'approche va alors dépendre des objectifs, comme on le voit ci-dessous.

Lorsque l'objectif de la simulation est la vérification d'hypothèses structurelles ou fonctionnelles relativement à certain objet connu *a priori* (en général un système ou un fait social observé globalement), il faut disposer de données permettant la comparaison et la validation. Les enquêtes et analyses sociologiques nous les fournissent. On construit alors un modèle d'individu, et on observe le résultat social émergent. S'il correspond aux données, le modèle local est validé ; sinon, le modèle local doit être ajusté.

Si le modèle social a été validé, il peut alors servir un autre objectif : la prédiction et le test d'hypothèse. On accède alors à ce type de laboratoire virtuel dont rêvent de pouvoir disposer les sociologues pour une pratique expérimentale impossible autrement. On peut s'interroger en retour sur les potentialités induites de contrôle du système réel, c'est à dire la société (ici le sous-système modélisé).

La sociologie peut aussi à l'inverse être utile en tant que référence méthodologique pour l'observation de la société artificielle : en effet les outils statistiques et les procédures d'enquête établies systématiquement en sociologie pourraient être utiles pour évaluer l'état des systèmes sociaux artificiels autrement que par la seule observation « gelstatique ». L'absence de méthodologie claire en matière de simulation provient essentiellement de deux causes : la multiplicité des paramètres pas toujours indépendants, et la difficulté à en mesurer les effets. Or précisément, la sociologie a, comme on l'a montré plus haut pour l'analyse de l'action sociale, cherché à discerner dans la complexité des sociétés quels en sont les déterminants structurels et fonctionnels. Par référence à la sociologie on peut donc envisager de « nettoyer » un certain nombre de modèles sociaux redondants. D'autre part les outils et les méthodes d'analyse factorielle manipulées en sociologie pourraient faciliter l'identification des dépendances dans les systèmes sociaux artificiels et donc permettre leur ajustement.

3.2. Résolution de problèmes

Dans le cas de la résolution de problèmes, l'idée est de construire un système collectif artificiel qui va pouvoir résoudre collectivement le problème posé. Dans ce cadre toutes les options sont ouvertes tant que l'on trouve effectivement une solution. En particulier de nombreux travaux ont montré qu'il n'était pas du tout nécessaire d'utiliser des agents très compliqués pour parvenir à cette fin (« computation » émergente ; [Forrest, 1991]). On peut alors renverser la question et s'interroger sur les problèmes qui ne peuvent être résolus que par un collectif d'une complexité équivalente à une société humaine. Ce « méta-problème » reste ouvert (peut-il être résolu par un collectif simple ?). A cet égard, on peut observer que la référence sociale humaine est complexe, car une bonne part du problème que résout implicitement le groupe est simplement de se maintenir. Si on se réfère à l'analyse stratégique [Crozier, Friedberg, 1977], le groupe humain est conflictuel, et donc il consomme des ressources pour se réguler. Dans le cadre artificiel, on peut imaginer d'optimiser le fonctionnement en réduisant les conflits. Mais il faut auparavant analyser le rôle fonctionnel des conflits : ils sont source de dynamique ; ils permettent l'innovation ; ils assurent le changement. Un collectif artificiel sans conflits peut apparaître trop statique et non adaptatif. En résumé, en résolution de problème la fin (la résolution) prime sur les moyens, et on peut être tentés, comme en résolution distribuée de problèmes, par des analogies sociales, mais le coût risque d'en être élevé si on néglige ou méconnaît le coût structurel, et donc corrélativement en calcul, d'auto-préservation de la société.

On notera enfin que la perspective de la résolution de problèmes doit sans doute être abordée par l'intermédiaire de la sociologie des organisations (systèmes structurés autour de buts donnés), non traitée ici [Bernoux, 1985].

3.3. Agents autonomes en environnement ouvert

Le développement des grands réseaux télématiques (type Internet) a conduit différents laboratoires à concevoir des agents « autonomes » évoluant sur ces réseaux et effectuant un certain nombre de tâches. Ces agents vivent dans un environnement constitué de serveurs d'informations, et ils communiquent et interagissent avec d'autres agents, et éventuellement des utilisateurs humains (dans le cas des agents assistants ou prospecteurs). On a donc le schéma de la figure suivante où trois types d'interactions existent : entre agents artificiels (communication), entre utilisateurs (lien social entre acteurs sociaux), et entre un agent et un acteur (IHS = Interface Homme-Système). Chacun de ces systèmes d'interaction peut relever d'une modélisation sociale. Mais l'ingénieur n'intervient directement que dans la construction des agents eux-mêmes. Il ne « contrôle » évidemment pas les interactions sociales entre acteurs.

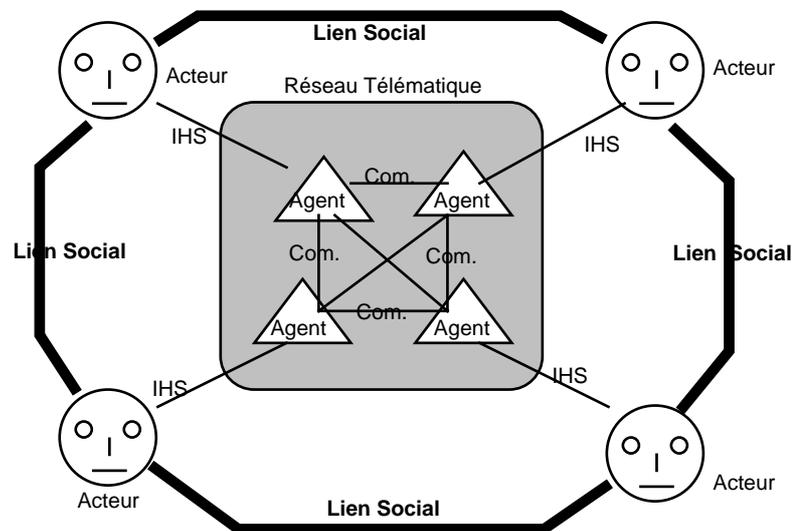


Figure 7 : Les différentes interactions autour des agents autonomes sur les réseaux

Selon un modèle classique, un tel agent autonome doit avoir des compétences propres relatives au traitement des informations, des capacités relationnelles et coopératives vers ses semblables (accointances), et une capacité éventuelle d'interaction avec son environnement exogène, ici les acteurs. Sa conception peut donc faire appel à quatre sous-modèles, éventuellement sociaux :

1. le collectif des agents artificiels, ses règles, son organisation ;
2. l'IHS, en tant qu'interaction ouverte entre un agent et un acteur quelconque d'une société ;
3. le modèle de société humaine que les agents doivent utiliser pour planifier leur action (à noter que ce modèle est en fait « un modèle dans un modèle », puisqu'il est inscrit dans le modèle d'agent comme un modèle de référence) ;
4. le modèle d'interaction globale entre la société humaine et le collectif d'agents, en tant que possibilité de modifier indirectement le lien social par la mise en place d'un lien artificiel médiatisé par la relation « Acteur 1 - IHS 1 - Agent 1 - Communication - Agent 2 - IHS 2 - Acteur 2 ».

La problématique est globalement différente de celles de la résolution de problèmes car le milieu d'évolution de l'agent est largement ouvert et incertain. Il n'est pas contrôlé par le concepteur initial de l'agent. Les agents et contextes que l'on peut rencontrer ne sont pas connus *a priori*. Seul un ensemble de normes techniques (langages, protocoles de communication) sont fixées.

La nécessité ou l'utilité d'une référence sociale humaine diffère selon les sous-modèles considérés. Dans le cas du collectif artificiel (cas 1.), le recours systématique à un modèle de système social humain ne semble pas justifié, dans la mesure où il s'agit d'organiser un système de communication et de coopération entièrement artificiel, et donc non astreint aux contingences humaines ; dès lors une conception *ab nihilo* fondée sur une méthodologie d'analyse stricte est sans doute préférable.

Il reste que dans ce cas la référence sociale peut être utile si on considère l'enjeu de la constitution et la maintenance de relations entre agents très hétérogènes au sein d'un système qui doit rester malgré tout cohérent et fonctionnel. Ceci est particulièrement vrai pour les agents "libres", c'est à dire ne dépendant pas d'un utilisateur. Ils assurent des services généraux de collecte d'information, ou d'organisation des communications. Et ils peuvent alors former des sociétés artificielles à la condition qu'ils puissent communiquer entre eux et se reconnaître [Lashkari, 1994]. La question que leur conception peut poser à la sociologie est d'une part de savoir quels sont les conditions structurelles d'un fonctionnement social (quel modèle d'agent utiliser ?), et d'autre part comment garantir leur fonctionnement au gré des fluctuations multiples que peuvent subir les réseaux, avec toutes les possibilités de "déviance artificielle" que l'on peut imaginer (faut-il des agents

policiers ?). Les concepts de normes, rôles, valeurs, culture, sanction, peuvent avoir un sens ; mais on est fondé à s'interroger sur leur validité stricte pour un système clôt artificiel.

Le cas des agents assistants est différent car il s'agit de concevoir l'agent pour qu'il assure des fonctions particulières relativement à un utilisateur déterminé. Ils doivent le satisfaire, c'est à dire se conformer à ses valeurs et sa culture. Les sous-modèles concernés sont le 2 et le 3. Dans le cas de l'IHS, les contraintes de l'ergonomie cognitive font que l'on doit envisager une articulation entre la culture artificielle de l'agent (les modèles conceptuels qu'il utilise) et la culture réelle de l'acteur. La culture artificielle de l'agent peut être soit posée *a priori* par le concepteur, qui peut être différent de l'utilisateur futur, ce qui peut engendrer des discordances ; soit elle peut se construire par apprentissage au contact de l'utilisateur. Si, par ailleurs, l'agent doit organiser ou participer indirectement à des interactions entre acteurs, alors, afin de respecter les schémas classiques de communication "directe", il doit intégrer au niveau du sous-modèle 3 une représentation du système social réel. En particulier, dans une perspective de production, l'agent devra intégrer l'organisation et le positions respectives des agents avec lesquels il communique.

Le sous-modèle 4, suggéré par John Stewart, a déjà été considéré par ailleurs [Ferrand, 1996], et nous ne le détaillerons pas ici. On retiendra seulement qu'il supporte deux enjeux : d'une part les effets potentiels de l'instrumentation du lien social [Rheingold, 1993] et la restructuration induite sur les sociétés ou les organisations, et d'autre part l'inscription ("contextualisation") des systèmes dans un cadre social rendant l'information contingente.

Pour conclure sur cette question de la validité du modèle social humain pour les systèmes collectifs artificiels, nous nous référons à la conclusion ("The Natural and the Artificial") de [Chatila, 1994] qui énonce clairement que la nature résout des problèmes en adaptant des solutions existantes à de nouvelles situations, c'est à dire par *réaction*, alors que l'ingénieur humain peut *prévoir et planifier*. La référence aux sociétés humaines relève de la même remarque : il n'est sans doute pas indispensable de prendre la sociologie pour référence dans la conception des systèmes collectifs artificiels, si ceux-ci sont destinés à évoluer dans un milieu très différent du cadre d'évolution de l'espèce humaine. Cependant, s'ils doivent interagir avec des humains, et assurer des fonctions relatives aux sociétés

humaines (gestion d'agendas, aide à la négociation, médiation, etc.), cette référence s'impose.

4. SMARRPS

Du fait de son application au domaine de la décision en aménagement du territoire, cette thèse considère essentiellement des systèmes d'informations spatialisés, et en particulier un ensemble de problèmes de localisation, de chemin, d'organisation spatiale (comme on l'a rappelé dans les définitions générales (chapitre 1), l'aménagement du territoire vise globalement à ordonner dans l'espace des implantations et des activités humaines en fonction d'un ensemble de contraintes et d'objectifs sociaux, économiques et environnementaux). Or ce type de problème est classique en Intelligence Artificielle, que ce soit pour des applications en reconnaissance de formes, en robotique, ou en planification. Il s'agit de ce que nous appelons des "problèmes spatialisés", car le fondement des questions posées est toujours "où" : où se trouve ? où passer ? où mettre ? Pour ces problèmes, il existe une "carte" (au sens topologique) de référence, dotée en général d'une métrique ; et qui permet donc de localiser et de mesurer à la fois les données, les contraintes et les solutions éventuelles. Cette topologie introduit naturellement la notion de voisinage spatial, qui fait la spécificité des problèmes nous intéressant (pas d'autoroute "près" des habitats denses, pas d'implantations industrielles "dans" les sites protégés). En robotique et en vision, cet ancrage spatial est omniprésent, et les méthodes d'IA qui ont été développées contribuent donc à résoudre ces "problèmes spatialisés". Il serait trop long de reprendre ici un inventaire complet, mais on notera simplement que formellement ces méthodes se ramènent toujours à de l'optimisation, parfois dégradée.

Parmi les approches multi-agents, ce sont les travaux sur les agents réactifs qui majoritairement ont abordé ces questions. En effet, de leur côté, les travaux "symbolistes" sur les agents cognitifs s'attachent d'abord au raisonnement classique, à base logique, et sur des espaces de croyances non structurés (hormis certaines structures réticulées, comme dans la hiérarchie d'un monde de blocs). Il y a suffisamment de questions ouvertes pour qu'il ne soit pas encore nécessaire de leur adjoindre des problématiques spatiales.

En revanche, ce champ a bien été investi par les communautés "réactives", qui, historiquement, ont fondé leurs travaux sur des exemples en écologie, éthologie, ou parfois physique du solide, et donc sur des cadres spatialisés. Cependant la mouvance principale

est restée axée sur la simulation, ou parfois la “simulation de résolution de problèmes”, mais rarement sur de vrais problèmes ; la classe de problèmes la plus largement abordée est celle des “jeux” : depuis l'illustre “Pengi”, jusqu'au classique “N-reines”, ou au taquin “éco-résolu”. Il y a peu de méthodologies générales qui aient été proposées à l'ingénieur, ni de “solutions” équivalentes aux grandes méthodes variationnelles, stochastiques, ou évolutionnistes.

4.1. Principe de fonctionnement

Le modèle SMARRPS [Ferrand, Labbi *et al.*, 1994 ; Ferrand, Baeijs *et al.*, 1997] a été construit dans la continuité du modèle PACO (pour « Coordination Patterns ») initialement développé par Yves Demazeau [1991, 1993]. Il en généralise le modèle dans un formalisme fonctionnel proche des réseaux d'automates, et une optique de RP. Voici en quelques mots le principe général :

Pour résoudre un problème spatialisé avec un système multi-agents réactifs, on construit un ensemble d'entités informatiques, appelées agents, dotées de capacités d'interaction entre elles et avec les données externes du problème (informations de référence). Ces agents évoluent en fonction de leur état actuel, de ce qu'ils reçoivent du problème et de ce que leur « communique » les autres agents. Chaque agent est construit de façon à résoudre localement une partie du problème spatial. Leurs interactions sociales contraignent la forme globale de la solution. La solution est finalement perçue par le concepteur comme un état stable global du système.

Les interactions sont modélisées sous la forme de forces contraignant les agents à se déplacer dans leur espace d'état (dont en particulier l'espace direct), en fonction de leur environnement et de leur voisinage. Chaque type d'interaction est associé à la capacité de l'agent de *percevoir* un type d'agent ou d'objet donné de l'environnement. L'originalité de l'approche, introduite dans [Demazeau, 1991 & 1993], et précisée dans [Ferrand *et al.*, 1997], réside dans la définition par le concepteur, et dans le contrôle par l'agent de **filtres de communication et de perception, qui, par action sur l'espace de référence, vont générer des champs déterminant la portée des interactions**. Le champ de perception détermine le sous-ensemble de l'environnement que l'agent peut percevoir. Cette limitation de la perception de l'environnement par l'agent le conduit à s'intéresser d'abord à son voisinage proche pour atteindre une solution partielle. D'autre part, le champ de

communication détermine le sous-ensemble des autres agents avec qui l'agent peut communiquer. Cette limitation de la communication entre agents le conduit à satisfaire des contraintes locales entre solutions partielles ; la satisfaction globale des contraintes est assurée, sans être optimale, par propagation entre les agents.

Les contraintes morphologiques sont alors traduites dans le filtre relationnel, alors que les contraintes topologiques apparaissent dans le filtre perceptif. L'initialisation détermine les solutions que le système peut atteindre, par un principe dynamique déterministe mais non contrôlable.

En résumé, le cycle de résolution inclut 3 phases automatisées : ajustement des champs, calcul des interactions et action. Le parallélisme des processus est géré explicitement.

4.2. La bibliothèque SMARRPS

Suite aux travaux antérieurs de l'équipe MAGMA [Demazeau, 1993] sur des "problèmes réels" en robotique et vision, nous (avec Christof BAEIJS) avons proposé de reprendre le cadre qui avait été posé, d'en expliciter les composantes multi-agents, et de construire sur cette base une bibliothèque générique pour la résolution de problèmes spatialisés. Cette bibliothèque SMARRPS, inclut un ensemble de classes qui permettent, par héritage, de construire différents systèmes multi-agents réactifs pour résoudre des problèmes spatialisés. SMARRPS a été conçu pour faciliter la modélisation d'un problème, sa décomposition, et l'activation des processus de résolution. Il n'inclut pas d'environnement de développement ou de résolution. Il donne un guide pour aborder quelques types de problèmes spatialisés.

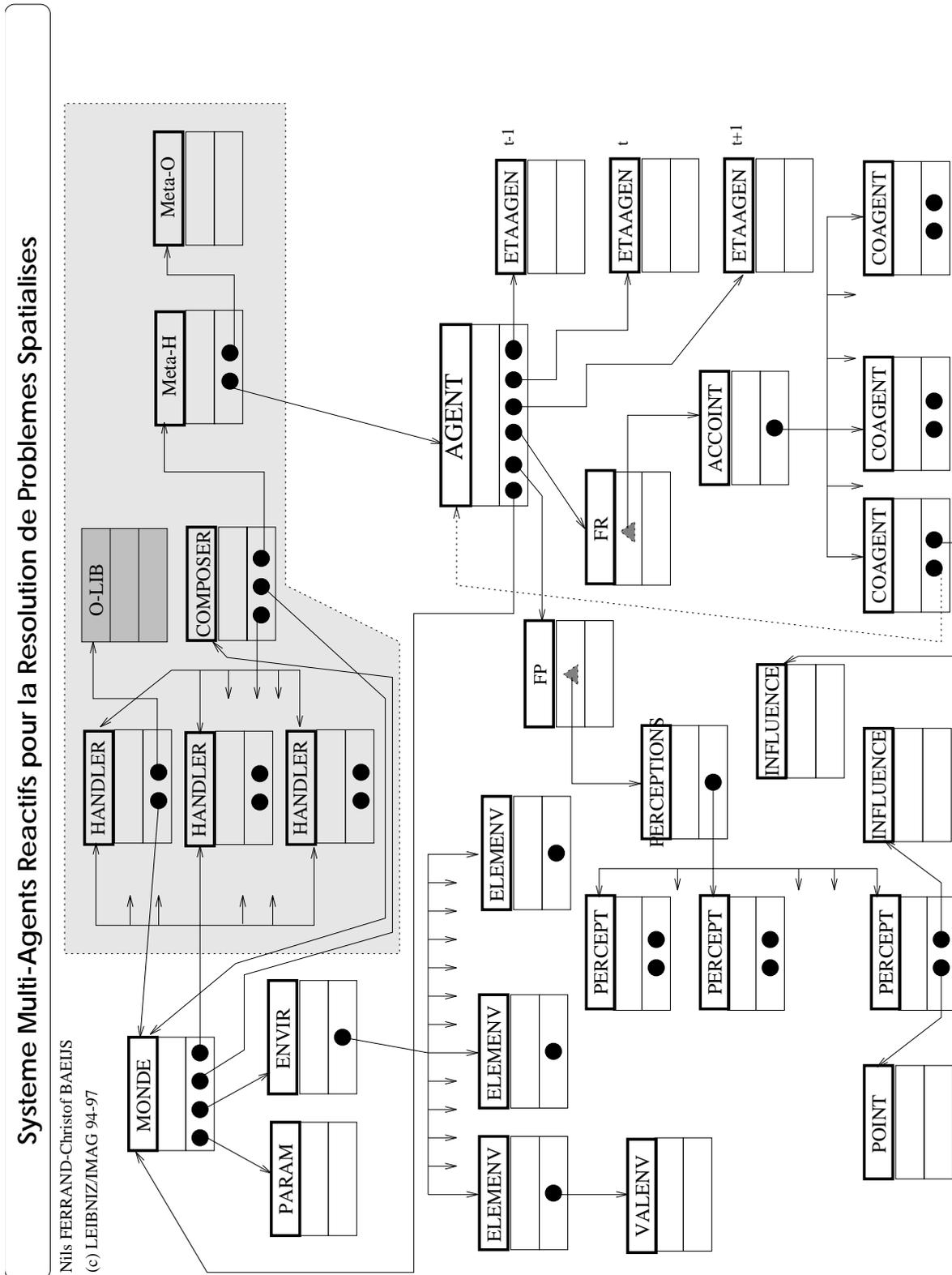


Figure 8 : les composants de la bibliothèque SMARRPS

4.3. Caractéristiques

SMARRPS, au delà de la bibliothèque, correspond aussi à un modèle spécifique, en terme de recherche de convergence, et de contrôle de l'émergence. En effet, SMARRPS utilise les notions de "filtres perceptifs" et "filtres relationnels", ainsi que la possibilité pour les agents de les contrôler en fonction du contexte, afin d'échapper, par exemple, à des minima locaux. Du point de vue multi-agents, on a donc un système dans lequel les agents n'ont pas accès à des informations sur le collectif, mais seulement sur un voisinage proche (au sens d'une distance pas nécessairement spatiale). Le modèle SMARRPS s'appuie sur un modèle d'agent très frustré, qui n'aborde pas les notions de message, de plan, d'intention. Il n'y a pas de modèle externe pour les agents. Leur dynamique est directement celle d'un automate avec des entrées correspondant à l'état des autres agents et de l'environnement. Par ailleurs, l'organisation des filtres et leur dynamique décrit les formes attendues et définit en fait les différents types d'agents présents, ainsi que leurs caractéristiques d'interaction. Enfin, l'environnement a la particularité d'être intangible, en tant que "donnée" du problème.

4.4. Modèles formel

La simplicité du modèle d'agent utilisé dans SMARRPS permet d'en donner un modèle formel dans un cadre analytique classique. Le formalisme retenu est ici celui de l'automatique (représentation d'état). Dans ce cadre, et à condition que l'état des agents soit donné par leur position, qu'ils soient homogènes, et que les effets internes et externes soient séparables, on peut écrire la dynamique globale d'un système de type SMARRPS sous la forme :

$$X(t + \Delta t) = \Delta t \times [FR_{(t)} \cdot X(t) + (FP_{(t)} * E)(X(t))] \quad [1]$$

où X est le vecteur d'état du SMARRPS, t le temps d'évolution, Δt une variation du temps, FR une matrice décrivant la structure de dépendance ou d'interaction entre les agents (matrice de régularisation), le « . » dénote la multiplication matricielle, E est l'opérateur qui donne l'état de l'environnement en un point de l'espace, FP l'opérateur de filtrage externe, et « * » dénote la convolution spatiale¹⁵. La présence de cette convolution dans l'expression de la dynamique constitue une caractéristique d'un modèle de type SMARRPS, par rapport à d'autres modèles d'automate cellulaire. L'autre caractéristique est la dépendance des filtres FP et FR à l'état du SMARRPS. Cette expression de la dynamique ne fait pas apparaître la possibilité d'évolution des filtres.

4.5. Spécification de la forme de la solution par contrainte sur l'organisation

En Résolution de Problèmes, on recherche une solution vérifiant un ensemble de propriétés, qui, dans le cas spatialisé, s'expriment pas des descripteurs morphologiques (de forme) et contextuels (de localisation). L'évolution de la forme collective "libre" dans l'environnement doit donc être contrainte afin de respecter ces prérequis.

Le SMARRPS évoluant sans contrainte externe tendrait directement vers la Forme optimale en terme de contraintes internes. La métaphore correspondante serait celle d'un ensemble de billes reliées par des ressorts, et libres de glisser le long d'un barreau fixe. Positionnées initialement dans n'importe quelle position, elles tendraient invariablement vers une répartition homogène le long de la barre.

Inversement, en l'absence de contrainte organisationnelle, les agents s'agrègeraient tous dans les attracteurs du bassin d'initialisation. La solution obtenue ne vérifierait alors que les propriétés contextuelles (topologiques). La Forme serait perdue. La métaphore serait ici celle de billes indépendantes posées au hasard sur un paysage vallonné.

Pour remédier à ce biais, nous "pré-organisons" les agents, c'est-à-dire que nous les contraignons à se maintenir dans le cadre morphologique de la solution. Ces contraintes imposées initialement sont maintenues durant l'évolution. Ainsi par exemple pour une trajectoire de dimension 1, chaque agent l'échantillonnant possède deux voisins spatiaux, et

¹⁵ Pour tout point x de l'espace, et pour tout opérateurs f et g de l'espace,

$$(f * g)(x) = \sum_{\delta \in [-,+]} f(\delta) \times g(x + \delta)$$

pas plus. De même, la recherche de formes géométriques spécifiées dans une image (cercles, polygones) conduit à imposer au collectif les décrivant de préserver cette morphologie. A cet effet, on peut utiliser différents types d'agents : par exemple, pour une recherche de cercles, on introduit un agent « centre » qui doit se maintenir à équidistance de tous les autres. De même la recherche d'un trapèze va distinguer des sous-familles parallèles, soit deux segments alignés, avec chacun deux agents « témoins » qui vérifient mutuellement leur parallélisme.

4.5.1 Contrainte de l'organisation « par construction »

Pour déterminer les organisations accessibles, on dispose dans le modèle SMARRPS de trois possibilités : on peut **contraindre l'état** même de l'agent, en choisissant un espace d'état adéquat, qui peut être différencié selon les agents, précisant ainsi le "rôle" de l'agent. Toujours pour l'exemple précédent, les agents peuvent être ainsi contraints à ne se déplacer que verticalement ; leur espace d'état est de dimension 1. De même pour des polygones, on distinguera les agents "arêtes" des agents "sommets", puisque l'angle à préserver avec les agents voisins n'est pas le même. Cette contrainte sur l'état s'accompagne inévitablement d'une contrainte implicite sur la fonction d'évaluation de l'agent, c'est-à-dire sur sa capacité d'action.

La seconde méthode est moins directe, mais plus conforme à la distinction entre processus relationnel et processus perceptif. Elle consiste à **contrôler le filtre relationnel** des agents pour préciser le type de propriétés locales observées dans la solution. Ainsi, la régularisation d'une trajectoire (continue, dérivable, etc.) peut se déterminer à partir de l'extension des interrelations entre éléments de trajectoires, donc entre agents : sans voisins, donc avec un filtre relationnel réduit à l'agent lui-même, on ne peut assurer la continuité (absence d'organisation explicite) ; avec un voisin à droite et un à gauche (filtre relationnel de rayon 1), on assure la continuité, mais pas la régularité (on ne peut détecter une singularité réduite à un agent) ; avec deux voisins on peut commencer à "lisser" la trajectoire... De même il est intéressant de considérer des structures hiérarchiques (telles que le système relationnel forme un arbre) pour lesquelles la forme d'un "niveau" hiérarchique répond au problème pour une échelle donnée. On conçoit que l'étude des types d'organisation adaptées à des formes spécifiées soit une question très importante.

La troisième solution porte sur le **filtre perceptif** qui détermine l'accès à l'environnement. Pour contraindre l'organisation interne, il s'agit d'un pis-aller, car on ne maîtrise pas à l'avance les environnements rencontrés. On peut tout au plus admettre l'existence d'une « hiérarchie » liée à la dimension ou la "granularité" des champs de perception.

4.5.2 Evolution Locale et Sociale : méthodologie de recherche de solution

Dans le modèle choisi, la souplesse fonctionnelle est très importante. En particulier, la nature des filtres perceptifs et relationnels des agents peut être couplée sur l'état, par l'intermédiaire d'opérateurs qui adaptent les filtres. Ainsi, un agent évoluant dans un environnement "plat", c'est-à-dire avec peu d'informations, pourra étendre son champ de perception (ou changer d'échelle) afin d'accéder à l'information pertinente (un agent "myope" au fond d'une grande vallée plate ne verra pas le col par lequel il doit passer). De même, la position sociale, et donc le filtre relationnel d'un agent, peut être modifiée en fonction de sa position environnementale : un agent qui trouve un site très attractif peut devenir un élément "régularisateur" pour le collectif. Si sa satisfaction environnementale est grande, il va moins tenir compte des "injonctions" de ses collatéraux.

Un processus d'évolution relationnelle couramment utilisé consiste aussi à étendre pas à pas le rayon relationnel d'un agent (le rayon de son champ de communication) dans les cas où malgré une énergie externe faible, l'énergie interne est forte (appel au collectif). Cette stratégie est donc retenue quand un agent occupe un minimum local, qui induit une contrainte forte avec les autres agents. Dès que l'effet des « voisins » d'énergie plus faible dépasse celui des voisins incorrects, l'agent n'est plus stabilisé sur le minimum local, et il peut « basculer ». Ceci est à rapprocher des situations où le consensus est fort dans un collectif, mais où la satisfaction environnementale globale est faible. On est alors conduit à étendre le collectif de manière à trouver un agent "décisif" qui va faire pencher la balance pour échapper au "piège".

En résumé, si un agent converge dans un état tel que un seul de ses critères soit satisfait, il doit alors changer ses filtres pour améliorer cette situation : si un agent est "marginal" (singulier par rapport au collectif), il va augmenter son champ de communication pour renforcer la contrainte sociale ; si inversement il est incohérent avec les données du problème (bien que conforme socialement), il doit agrandir sa perception ou relâcher la

contrainte sociale. Le recours à ces stratégies suppose que le concepteur ait prévu systématiquement la vérification des critères pour tous les agents.

5. Observations empiriques

Les exemples d'applications (analyse d'image [Van Aeken & Demazeau, 1990], planification [Demazeau, 1993], généralisation cartographique [Baeijs et al., 1996], SMAALA [chapitre 6]) réalisées jusqu'ici ont favorisé une relative homogénéité fonctionnelle des agents. Les processus d'évolution sociale observés ont donc été limités à une réorganisation spatiale des agents, sans émergence de structures sociales différenciées. Nous n'avons pas, par ailleurs, procédé à une classification sociale en fonction de l'état des filtres après stabilisation.

	Perception	Communication	Opérateur Action
<p>Figure 9 : Adaptation des champs de SMAKRPS en fonction de la situation</p> <p>A augmenter quand...</p>	<p>l'énergie externe est forte, mais l'environnement isotrope</p>	<p>"Appel à l'aide" : recherche d'informations auprès des autres pour se débloquer</p>	<p>l'agent est trop stable reste fixe alors que voisins l'attirent ailleurs</p>
<p>A diminuer quand...</p>	<p>l'agent oublie sa position locale au bénéfice d'un "ailleurs" hypothétique</p>	<p>l'agent est dans une situation de satisfaction externe importante</p>	<p>l'agent est trop mobile il ne se stabilise jamais</p>

Ainsi l'évolution sociale que nous connaissons est limitée à des structurations topologiques. Les processus en jeu sont liés à la segmentation du collectif (agrégation, séparation, spécialisation), ou à l'apparition de "marginiaux", c'est-à-dire d'agents à minimum externe mais à maximum interne.

On a résumé les différentes situations dans la **Figure 9**, où on confirme que l'ajustement des champs est toujours une affaire de "juste milieu". En particulier, la mobilité de l'agent est à la fois favorable à l'exploration des solutions, mais aussi opposée à sa stabilisation. Les processus adaptatifs sont donc très intéressants dans ce cadre.

Chapitre 5

MODELES FORMELS DE SYSTEMES MULTI-AGENTS

1. Caractéristiques des SMARRPS

Avant d'en proposer des modèles formels, nous rappelons ici les éléments caractéristiques d'un modèle de type SMARRPS. Un tel modèle s'applique à la résolution de problèmes. Il recouvre :

1. un temps discret (ou continu pour des modèles plus formels) qui correspond aux itérations du processus ;
2. la donnée d'un environnement, qui va constituer l'entrée du processus de résolution, c'est-à-dire les informations sur lesquelles le système va travailler, et qui est indépendant de l'état du processus ;
3. la référence de l'environnement à partir d'une « carte », un espace topologique ou métrique ;
4. des agents, dont l'état est au moins relatif à la carte, et qui ont différentes composantes dynamiques :
 - 4.1. une dynamique propre donnant leur évolution indépendamment de toute interaction,
 - 4.2. une dynamique externe, décrivant la dépendance de leur état à l'environnement, et telle que la nature même de la dépendance soit fonction de leur état,
 - 4.3. une dynamique interne, décrivant leurs interactions avec les autres agents, et qui peut, ou non, dépendre elle-même de l'état
 - 4.4. un schéma d'activation qui donne l'évolution de l'agent en fonction des différentes dynamiques

Afin que le système puisse assurer des fonctions de résolution de problème, il faut que d'une part il converge vers un attracteur indépendant de la situation initiale des agents, que d'autre part cet attracteur varie en fonction de l'environnement, et qu'enfin les configurations de cet attracteur vérifient les contraintes internes imposées par le problème. On a donc une dynamique différente par exemple d'un réseau de Hopfield, dans lequel on initialise avec « l'image » à traiter. Ici le choix de l'initialisation est un moyen d'explorer l'espace des solutions, afin de repérer les différents attracteurs. Dans le cas idéal, il existe une solution unique au problème ; et alors, si le problème est bien modélisé, le système a un seul attracteur. Mais en général, pour les classes de problèmes qui nous intéressent, le

problème admet différentes solutions, plus ou moins bonnes selon les différents critères, et parfois équivalentes.

2. Modèle booléen

On peut définir un modèle SMARRPS booléen, qui constitue une sous-classe des réseaux d'automates booléens [Weisbuch, 89 ; Robert, 95]. A ce titre on peut envisager d'appliquer différents résultats connus pour ces systèmes. Le caractère très « absorbant » des opérations booléennes va limiter les propriétés observables, mais en revanche il facilite l'analyse. Il va nous permettre assez rapidement d'illustrer les propriétés spécifiques, et d'aborder quelques questions fondamentales, relatives à une métrique d'état utilisable pour les SMA, à la nature des processus recherchés, et à la limitation d'un modèle qualifié de multi-agents.

Dans un cadre booléen strict, l'état d'un agent est simplement défini par un bit, noté x_i pour l'agent d'indice i (on donne I agents). L'espace qui peut donc être référencé par un agent est très restreint, puisque limité à deux positions. La « carte » est alors simplement $\{0,1\}$... Le caractère « spatial » des problèmes considérés est donc très abstrait. L'environnement est codé par deux bits, qui peuvent, formellement, être associés à deux agents n'ayant aucune entrée, et restant donc stable au cours du processus, sauf sur intervention de l'opérateur. Ces deux bits / agents « environnement » sont appelés e_0 et e_1 .

2.1. Dynamique externe

La dynamique externe d'un agent consiste à « lire » l'état de l'environnement à la position qu'il occupe (noté $e(x_i) = (\bar{x}_i e_0 + x_i e_1)$ ¹⁶), puis de le copier ou de l'inverser. On attache à chaque agent un paramètre p_i qui détermine si y il y a copie ($p_i = 1$) ou inversion ($p_i = 0$). La dynamique externe s'écrit donc :

$$\Delta_e(x_i) = (p_i == e(x_i)) \quad [1]$$

où « == » est l'égalité logique ($(a == b) = (ab + \bar{a}\bar{b})$).

¹⁶ Par la suite le « = » note la réécriture ou affectation

2.2. Dynamique interne avec interactions fixes

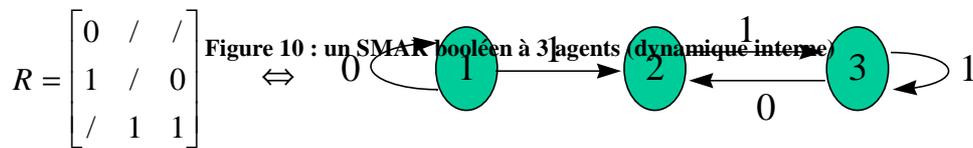
Dans le cas le plus simple, la dynamique interne (celle des interactions avec les autres agents) est fixe et « linéaire » ; chaque agent fait alors la somme booléenne des états des autres avec les paramètres de connexions r_{ij}^+ et r_{ij}^- :

$$\Delta_i(x_i) = \sum_{j \in I} r_{ij}^+ x_j + r_{ij}^- \bar{x}_j \quad [2]$$

Avec la combinaison additive des états, le cas $r_{ij}^+ r_{ij}^- = 1$ est inintéressant car la dynamique interne est alors toujours vraie (absorption). Et le cas $\bar{r}_{ij}^+ \bar{r}_{ij}^- = 1$ signifie que les agents ne sont pas connectés. En supposant que le schéma de connectivité est fixe, et en posant que I_i est le sous ensemble de I dont tous les agents sont connectés à i , on peut alors simplifier la dynamique interne en :

$$\Delta_i(x_i) = \sum_{j \in I_i} r_{ij} x_j + \bar{r}_{ij} \bar{x}_j = \sum_{j \in I_i} (r_{ij} \equiv x_j) \quad [3]$$

où $r_{ij} = 1$ code la copie, et $r_{ij} = 0$ l'inversion. On notera que les connexions ne sont pas forcément symétriques. Par la suite, on notera la matrice d'interaction R avec 0 ou 1 pour copie et recopie, et un « barré » pour l'absence de connexion. Voici par exemple un cas à 3 agents :

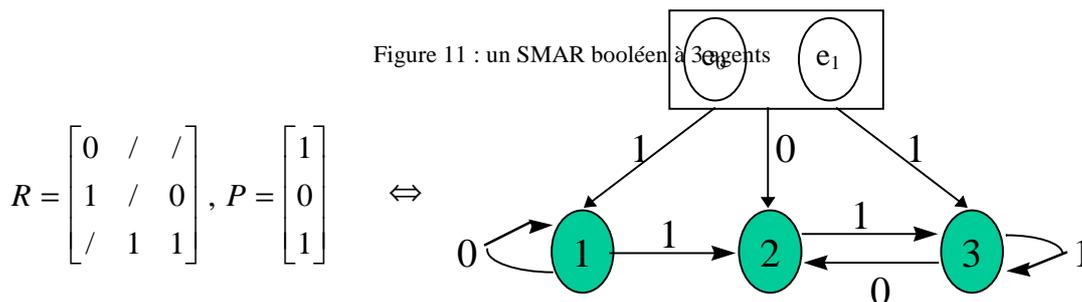


2.3. Dynamique globale avec combinaison additive, convolution externe et à structure interne fixée

Si on poursuit dans un modèle « linéaire », séparant les dynamiques internes et externes, on obtient :

$$\Delta(x_i) = (p_i == e(x_i)) + \sum_{j \in I_i} (r_{ij} == x_j) \quad [4]$$

Ce modèle est « faible » du point de vue multi-agents, car les interactions internes sont fixées *a priori*. De plus il n'y a aucune adaptation. En revanche, il inclut le filtrage de l'environnement, même sous une forme simplifiée. En reprenant le schéma de la Figure 10, on obtient le schéma global interne / externe :



Dans ce schéma, nous avons rassemblé les deux agents environnement en une seule entité, par analogie aux modèles ultérieurs, plus complexes, où l'environnement est une fonctionnelle.

2.4. Caractère absorbant de cette dynamique

Du fait du choix d'un modèle additif (booléen), il est clair que dès qu'une des entrées d'un agent est « vraie », l'agent devient « vrai ».

Donc, on peut remarquer que si l'effet propre r_{ii} d'un agent est une copie (1), l'état « vrai » est localement stable, indépendamment de toute interaction. Et par propagation, tout autre agent qui le recopie va aussi se stabiliser sur « vrai ». Cette dynamique est strictement indépendante de l'environnement. On a alors une méthode très simple pour déterminer les agents ayant un attracteur indépendant de l'environnement :

- dans la matrice d'interaction, on barre une ligne et colonne ayant un 1 dans la diagonale
- chaque fois qu'un 1 est barré dans une colonne, on barre la ligne correspondante
- chaque fois qu'une ligne est barrée, on barre la colonne de même indice, et on recommence

- tous les agents dont la ligne est barrée sont « commandés » par le premier barré dans la diagonale

Afin de préserver une dynamique externe, on constate que la matrice d'interaction doit être très creuse : soit par absence de connexion, soit par le choix de l'inversion plutôt que la recopie. En particulier, si on observe le graphe orienté de « recopie », tout composante connexe est « solidaire » (Weisbuch [89] la qualifie de « forçante), et va passer en bloc à « vrai ».

Ce type d'observation « simple » est en fait une forme faible d'un résultat général que nous présentons ci-dessous.

2.5. Convergence globale

Si on se réfère à la théorie des systèmes dynamiques discrets [Robert, 1995], on dispose d'un théorème très important, dit de « contraction booléenne », résultant de l'extension du classique théorème de Perron-Frobenius¹⁷ au cas discret. Son énoncé s'appuie sur une métrique particulière, la *distance vectorielle booléenne*, qui est un vecteur tel que :

$$\forall (x, y) \in X_i^2, d(x, y) = \begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_N \end{pmatrix} \text{ avec } d_i = (x_i \neq y_i) \text{ et } \neq \text{ différence booléenne}$$

[5]

L'ordre utilisé est l'ordre terme à terme à l'intérieur du vecteur.

Cette distance entre deux états du système doit nous renseigner sur sa convergence. En particulier, on va rechercher des cas où la transformation F (la table de transitions) liée à la

¹⁷ Ce théorème (Perron-Frobenius) stipule que, pour une matrice booléenne B (n,n) (avec les opérations booléennes) :

- il existe toujours une plus grande valeur propre $\rho(B)$, dite rayon spectral, associée à un vecteur propre non nul
- pour toute partie M non vide de $\{1, \dots, n\}$, on a :

$$\max_M \min_{i \in M} \sum_{j \in M} b_{ij} = \rho(B) \leq \max_{i=1, \dots, n} \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

- Si B est irréductible, alors $\rho(B) = 1$ avec (au moins) le vecteur propre e , et on a : $\rho(B) = \max_{i=1, \dots, n} \sum_{j=1}^n b_{ij} = 1$

dynamique du système est *contractante* au sens de d . On va voir que cette propriété est en fait intégralement dépendante du *graphe d'incidence*, c'est-à-dire le simple schéma de dépendance entre les agents. La matrice booléenne correspondante est notée $B(F)$. Voici donc le théorème qui nous renseigne sur cette propriété :

Théorème 1 [Robert, 95] : Pour que F soit contractante relativement à d , il faut et il suffit que l'une des quatre conditions équivalentes suivantes soit réalisée :

- $\rho(B(F)) = 0$
- $\exists p \leq n, [B(F)]^p = 0$ (*nilpotence booléenne*)
- *il existe une matrice de permutation P (n,n) telle que : $P^t B(F) P$ soit triangulaire inférieure stricte*
- *le graphe de connexion de F (celui du réseau associé) est sans circuit.*

Par conséquent, ces conditions étant équivalentes, c'est la connectivité du graphe de F qui va nous intéresser. Or, si les agents environnement sont par définition « déconnectés », les autres agents sont en général interdépendants, en particulier dans les situations classiques où les agents accèdent à l'information de tous les agents qui sont dans le même état qu'eux (principe de localité). Voici alors la conclusion pratique, mais plutôt malheureuse :

Dans le cadre booléen choisi, et pour la distance d , il n'y a convergence globale vers un point fixe que si le graphe de connexion des agents est sans circuit.

Ce résultat appelle différents commentaires.

2.5.1 Choix de la métrique

Dans le théorème précédent, la distance vectorielle booléenne d est en fait équivalente à la distance de Hamming d_H , couramment utilisée pour les réseaux d'automate [Weisbuch, 89]. Cette distance quantifie la différence entre deux états par le nombre d'agents différents, sans catégoriser les agents qui sont considérés comme équivalents. Elle ne mesure que la « somme des états locaux », et non l'équivalence globale. Dans le cadre classique des réseaux d'automate, où on considère une structure d'interaction figée, et où

chaque automate a une position identifiée (on code les états binaires par leur équivalent décimal), elle est adaptée. En revanche, pour un système multi-agents, où potentiellement il y a organisation des agents en classes fonctionnelles, mais où aussi on ne considère que les formes stables émergentes, elle n'est peut-être pas pertinente. En effet, il se peut que deux états soient distants selon d , mais de « forme » identique. Le résultat de convergence reste-t-il significatif, et sinon, quelle pourrait être une métrique plus adaptée ?

Cette question est difficile, car le choix d'une métrique traduit directement les intentions de l'observateur. La distance utilisée doit être nulle pour deux états équivalents *pour l'observateur*. Pour un système multi-agents, cela peut se traduire de nombreuses façons, selon que l'on différencie ou non les agents, que l'on prend en compte les configurations équivalentes, ou que l'on mesure la situation par rapport à l'environnement. Dans le cas de la résolution de problèmes, il faut tenir compte à la fois de la convergence et de la satisfaction des contraintes, ces notions étant par ailleurs liées. De plus, du point de vue opérationnel, la convergence est obtenue quand, pour l'observateur, la situation est stable. Or cette stabilité est détectée au moyen d'un « microscope » quelconque, qui représente l'état global du SMA : ainsi, dans les cas spatialisés les plus classiques (en mode « entier », à 2 dimensions spatiales), on représente les agents sur la carte, sans les distinguer les uns des autres par un identifiant. Cette représentation, par le choix d'un « ensemble de sortie », constitue une contrainte sur la métrique que l'on peut utiliser. Voici, par exemple, un même système (sans dynamique externe) dont l'observation est faite de différentes façons :

Mode de Représentation ou critère de problème	Valeur de l'observation	Etats équivalents en codage décimal (et distance d_H à 3)
Graphe d'état et schéma de transition		3 (0)
Codage décimal (bit faible à droite)	3	3 (0)
Ratio de successions 0-1 ou 1-0 dans le graphe de recopie ($r=1$)	1/3	1 (1), 3 (0), 5 (2), 6 (2)
Successeur (avec addition booléenne, mode parallèle)	5	1 (1), 3 (0)
Etat de l'agent 1 (à gauche)	0	0 (2), 1 (1), 2 (1), 3 (0)
Nombre d'agents à 1	2	3 (0), 5 (2), 6 (2)

On vérifie donc que pour la plupart des modes d'observations, il existe des états équivalents à l'état considéré, mais de distance d_H non nulle. Prenons le cas trivial où on n'observe en fait que l'état de l'agent 1, les états (codés en décimal) 0, 1, 2 et 3 sont équivalents, et si le système suit un cycle parcourant ces états, ou une sous-partie, alors il est stable au regard de l'observateur, et selon les critères du problème retenu, alors qu'il est très instable selon d_H .

De plus, l'équivalence de deux états observés doit s'entendre aussi comme l'identité de « phase » dans le système dynamique. En effet, si deux états paraissent identiques de façon instantanée (deux « photos » sont recouvrables), mais qu'ultérieurement ils divergent, alors la solution finale n'est pas la même. On est donc contraint *de facto* soit à identifier agent à agent, et alors d'accepter la distance d , soit à autoriser simplement des permutations d'indices (on change le « nom ») pour des agents dont tous les paramètres sont égaux dans R et P , soit, de façon beaucoup plus compliquée, de prendre en compte les formes et leur position, ainsi que leur stabilité dans le temps. Cette dernière solution paraît plus pertinente pour la résolution de problèmes.

En supposant, comme c'est le cas dans le modèle simple posé ci-dessus, que les schéma d'interaction sont fixes dans le temps (R et P n'évoluent pas), on définit la relation d'équivalence suivante entre deux états X_1 et X_2 , pour la relation d'observation $O(X)$, qui à un état X fait correspondre son observation :

$$X_1 \leftrightarrow X_2 \Leftrightarrow \begin{cases} X_1 \text{ et } X_2 \text{ stables pour } O \\ O(X_1) = O(X_2) \end{cases} \quad [6]$$

Un état est dit « stable pour O » si son observation reste stable au cours du temps. Un cas trivial de stabilité pour l'observation est la stabilité de l'état pour tous les agents. Dans cette relation d'équivalence, les contraintes internes et externes ne sont pas transcrites, car elles sont présentes dans la dynamique. En quantifiant la négation de l'équivalence, on obtient la métrique :

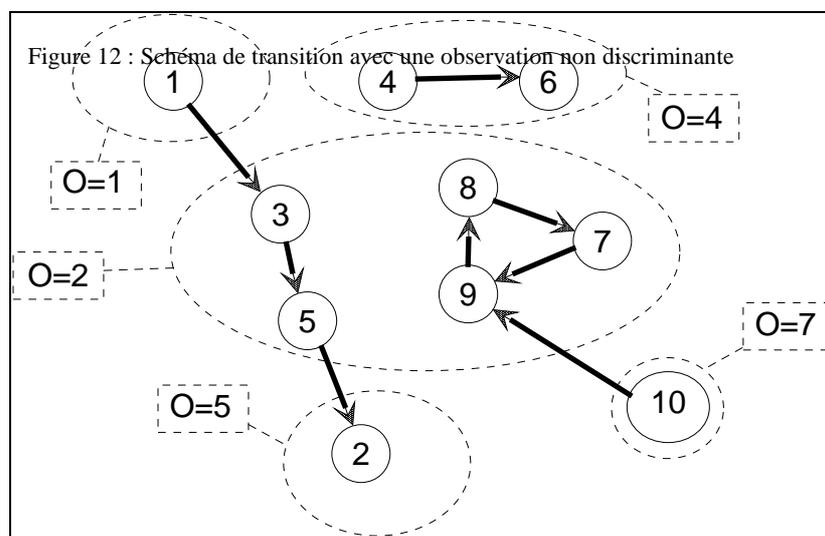
$$d_A(X_1, X_2) = \max_{t \in [0, +\infty[} d_o(O(X_1(t)), O(X_2(t))) \quad [7]$$

où d_o est une distance correspondant à l'espace d'observation (si O est l'identité, on aura alors $d_o=d$). Cette métrique a l'inconvénient d'étendre l'espace d'état à l'infini dans le temps, ce qui, d'une part, est aberrant du point de vue de l'observation, et d'autre part ne nous permet pas de l'utiliser (directement) pour une étude de convergence. Cependant, nous traitons de systèmes finis, et qui convergent donc nécessairement soit vers des points fixes, soit vers des cycles en un temps fini. L'horizon temporel est donc limité. Quelle est alors la valeur de cette métrique ? Elle dépend en fait directement de la stabilité de l'observation pour le processus. On dit que *l'observation O est stable à l'ordre n pour la dynamique du système si tout sous-graphe d'au moins n noeuds, constant pour l'observation, est attractif. O est dit « discriminant » si O est stable à l'ordre 2* (tout sous-graphe non réduit à un élément est stable selon O). Si O est discriminant, alors :

$$d_A(X_1, X_2) = d_o(O(X_1), O(X_2)) \quad [8]$$

On a représenté sur la Figure 12, le type de situation que l'on évite avec une observation discriminante. On a un graphe d'itération (en gras), et les valeurs d'observations (en pointillé). On voit que, par exemple, pour l'observation 4, on a en fait deux états

équivalents 4 et 6, mais que ce sous-graphe est attractif puisque 6 est un point fixe. Ce sous-graphe est donc stable au sens de O. En revanche, les états 3, 5, 7, 8, 9 ont la même valeur d'observation (2), mais ils appartiennent à deux sous-graphes non connexes, et dont un n'est pas attractif (3-5). En conséquence, si on observe la valeur 2, on ne peut savoir si elle est stable ou non si elle se répète dans le temps. Dans ce cas le transitoire apparemment « stable » est court (2 états), mais dans des situations plus complexes, on peut avoir des transitoires « apparemment stables » très long, et alors si on a un horizon temporel de détection de stabilité trop court, on a détecté une solution, alors que la solution est « plus loin » dans la dynamique, et souvent différente.



Dans un tel cas, où l'observation n'est pas discriminante, il faut soit changer d'observation pour qu'elle le devienne, soit utiliser une métrique indépendante de l'observation. Mais alors on risque de revenir à la situation d'une métrique qui mesure comme différents des états égaux au sens du problème. La question induite ici par celle du choix d'une métrique, est en fait l'adaptation de l'observation au problème : le processus d'observation doit permettre de « voir » quand une solution est atteinte, par la stabilisation apparente, mais seulement une solution, et non des stabilisations transitoires qui conduiraient à des divergences ultérieures. Il n'y a, à notre connaissance, pas de solution générale à ce problème, hormis un principe que l'on peut retenir : l'observation doit faire apparaître les variations « divergentes » des états des agents, c'est-à-dire celles qui correspondent à une dynamique convexe (en simplifiant : les dérivées secondes positives).

Dans notre évaluation de la métrique, il y a un facteur important que nous n'avons pas pris en compte, qui est que, dans les modèles booléens classiques (cf. Robert, 1995), les

« automates » sont très nettement différenciés, et l'état de chacun est significatif. Dans un système multi-agents, comme nous l'avons déjà rappelé, il existe des classes d'agents équivalents, et plus généralement tous les agents sont structurellement identiques. Durant leur évolution, leur état, et même parfois leur paramètres dynamiques, changent, mais leur architecture reste conforme à un modèle commun. Une forme de métrique qui traduise bien cette contrainte, est telle qu'elle ne prenne en compte que les effectifs "intra-classe" et les relations "inter-classes".

Dans les cas spatialisés, on suppose que l'observation donne au moins la position des agents, mais ne les différencie pas. Deux états ont la même observation s'ils sont égaux à des permutations de position près, c'est-à-dire que pour tout agent de l'état X_1 , il existe un agent de l'état X_2 tel que leurs positions soient identiques. Si l'observation fait apparaître d'autres attributs, il faut aussi que les agents permutable aient les mêmes attributs. Plus précisément, dans un cadre de reconnaissance de formes (et en sortant du cadre booléen), ce n'est pas la position absolue des agents qui importe, mais les « formes » qu'ils décrivent ; l'équivalence des états correspond alors à la détection de la même forme au même endroit. Si on détecte des droites, peu importe la position des points (agents) caractéristiques, pour peu qu'ils décrivent la même droite. Nous reviendrons sur cet exemple dans le cas du modèle SMARRPS entier.

En conclusion sur cette question de la validité de la distance vectorielle booléenne pour les systèmes multi-agents, nous dirons que, dans le cas d'agents booléens, et en supposant que les agents soient équivalents (pas de sous-classes, tous les paramètres p_i et r_{ij} égaux entre les agents aux permutations près), la différence du nombre d'agents « vrais » est suffisamment significative ; s'il existe des classes d'agents, la distance portera sur la différence des effectifs "intra-classes" ; et si, enfin, tous les agents ont un rôle particulier (des paramètres spécifiques), et il n'y a pas de symétries, alors la distance vectorielle booléenne est la seule significative.

2.5.2 La convergence globale est-elle notre objectif ?

Rappelons que la convergence globale signifie que le système converge vers un unique point fixe attracteur, quel que soit son état initial. Ceci, en termes de résolution de problème, signifie l'existence d'une unique solution au problème posé, indépendamment de l'initialisation du processus. Il s'agit donc d'optimisation au sens strict, avec de plus

unicité de l'optimum. Or, en pratique, d'une part il existe parfois des solutions équivalents, du fait de symétries de l'espace de recherche ; et d'autre part, la résolution de problème appliquée à l'aide à la décision ne relève bien souvent pas de l'optimisation, mais plutôt de la « satisfaction » (« Satisficing » pour [Simon, 1977], « satisfecum » pour Le Moigne [1990]), conséquence empirique du principe de « rationalité limitée » des décideurs (Simon, [1977]). A cet égard, la question de la convergence globale doit être reconsidérée en fonction de la taille des perturbations que l'on peut admettre au cours du processus de recherche. Cette notion de perturbation d'une solution renvoie à la continuité de l'espace (au sens de l'espace d'état) des solutions, liée ici à leur caractère spatial (au sens de l'espace de référence du problème spatialisé). Durant la recherche, le système va progressivement évoluer, et son état va « se déplacer ». Si le déplacement possible en un pas est « petit » par rapport à la taille de l'espace, alors l'exploration va être très sensible (attirée) par des minima locaux. En revanche, si le système accepte des pas « grands », il peut « sauter » d'un attracteur local vers un attracteur éventuellement plus « profond ». En revanche, il se stabilise alors moins vite. Dans un cadre booléen, cela se mesure effectivement par la variation au sens de la distance vectorielle booléenne.

Si on oublie les questions de strictes symétries de solutions, et si on admet que l'on puisse être intéressé par un ensemble des solutions satisfaisant même partiellement les contraintes¹⁸, alors la convergence globale n'est pas une nécessité. En revanche, il est préférable d'avoir des points fixes, plutôt que des cycles attractifs, et *a fortiori* lorsque les cycles sont longs et donc peu détectables. Cependant, on notera que le critère de convergence globale donné par le théorème de contraction booléenne, peut être restreint aux sous-graphes : si on cherche la convergence globale d'une sous-classe d'agents, il faut toujours que leur graphe soit sans réseau. Par conséquent, on ne peut espérer avoir des convergences globales « restreintes » à des parties du système multi-agents si elles sont cycliques. Rappelons qu'il s'agit là d'un résultat issue de la théorie des systèmes dynamiques discrets, tels qu'introduits ci-dessus. Venons en donc à la question suivante.

2.5.3 Le cadre booléen est-il significatif pour la dynamique des systèmes multi-agents ?

Dans la présentation initiale du modèle booléen appliqué à la résolution de problèmes spatialisés, nous avons posé que la carte de référence, et donc l'environnement, ne pouvait

¹⁸ Si on recherche l'optimisation « stricte », on préférera une méthode classique (analytique), à condition qu'elles soient applicables.

avoir que deux positions ; ce qui est grossièrement simplificateur, et ne permet pas l'exploration des problèmes classiques susceptibles d'intéresser l'ingénieur. Si on considère un environnement codé sur plus que deux bits, il faut alors s'affranchir du principe selon lequel un agent code dans son état sa position dans l'environnement. Il faut alors introduire des classes ou organisations d'agents, tels que l'on attache à une sous-partie de l'environnement ces agents ou classes. La première possibilité consiste simplement à combiner des agents pour coder « ensemble » une position : on obtient un modèle binaire qui pour n agents peut coder un environnement à 2^n positions. On traduit alors dans la fonction de transition la classique addition binaire pour ces n agents, et seul l'agent « de poids faible » a des entrées à partir de l'environnement et des autres groupes d'agents. La seconde possibilité consiste à segmenter l'environnement en blocs d'au plus deux bits et de leur attacher des agents, qui sont eux-mêmes organisés afin d'échantillonner l'ensemble de la carte. On se retrouve alors dans le cadre d'un modèle de type « automates cellulaires ». Le glissement par rapport aux approches classiques des systèmes multi-agents pour la résolution de problèmes est que le nombre d'agents est alors de l'ordre de la taille de l'ensemble de données. Or, classiquement, les agents « explorent » l'environnement, et ne le « recouvrent » pas ; ce choix résultant de contraintes de performance. Cependant, une telle approche reste formellement intéressante ; à ceci près que la dépendance des connexions externes à l'état disparaît. Nous ne considérons pas, ici, ce type de modèle, trop proche des réseaux de neurones de type « réseaux à variables externes » [Labbi, 1995].

Il reste donc l'approche initiale consistant à organiser les agents pour qu'ils codent collectivement une position dans une carte étendue. Mais alors, au prix d'une représentation par exemple décimale, on obtient un modèle non plus booléen, mais entier, tel que nous le décrivons ci-après (par. 3, p. 161). Le cadre booléen est donc intéressant pour illustrer quelques propriétés et exploiter des résultats formels, mais on a peu de certitudes sur leur pertinence. En particulier, dans les simulations que nous avons pu faire, le comportement global apparaît beaucoup moins stable que dans les cadres entiers que nous connaissons. On peut donc suspecter que les opérations booléennes sont trop discontinues, au sens de l'observation d'états collectifs, pour préserver les variations régulières exploitées dans un cadre SMARRPS classique.

2.5.4 En quoi des structures de SMA « sans circuits » nous posent problème ?

On a vu que la contrainte imposée par le théorème de contraction booléenne était que le schéma de dépendance des agents ne devait pas avoir de circuits. S'agit-il d'une contrainte rédhibitoire ? Construire un système multi-agents sans circuits de dépendance revient à construire des arbres monodirectionnels. Or, d'une part, en général, les agents ont au moins un couplage sur eux-mêmes, pour assurer une certaine stabilité locale ; et, d'autre part, les approches multi-agents sont justement choisies pour des problèmes non résolubles par les méthodes de décomposition classiques en arbres de recherche. En particulier, un des avantages des méthodes multi-agents est de permettre la transcription directe de la complexité d'un problème dans la structure de résolution. Or, les problèmes complexes sont des problèmes avec couplages et interdépendances, qui en empêchent la réduction. Réduire les classes de problèmes accessibles aux systèmes sans dépendances circulaires, revient à éliminer tout l'intérêt de l'approche agent. Cette contrainte structurelle n'est donc pas tolérable.

2.6. Modèle additif avec convolution interne

Dans un modèle « plus multi-agents », les interactions internes dépendent de l'état des agents. De façon imagée, on peut dire qu'un agent ne prend en compte que les agents qui lui sont « proches ». Ici, dans un modèle booléen, une distance simple est donnée par l'égalité. On obtient alors le nouveau modèle :

$$\Delta(x_i) = (p_i \equiv e(x_i)) + \sum_{j \in I_i} (x_i \equiv x_j)(r_{ij} \equiv x_j) \quad [9]$$

Ce modèle décrit une dynamique dans laquelle l'agent lit l'environnement à sa « position », et le copie ou l'inverse en fonction du paramètre p_i . Et il fait une somme logique avec l'état, copié ou inversé en fonction de r_{ij} , de tous les agents (connectés avec lui au sein de I_i) dans le même état que lui. Le choix d'une addition logique comme composition des entrées internes et externes traduit ici la séparation des différents effets ; et, dans ce cadre, le caractère absorbant de l'état « vrai ». A l'inverse, si on prend une forme produit (« et » logique) :

$$\Delta(x_i) = (p_i == e(x_i)) \times \prod_{j \in I_i} (x_i == x_j)(r_{ij} == x_j) \quad [10]$$

l'état « faux » devient absorbant.

2.7. Couplage interne / externe

Pour éviter ces phénomènes d'absorption, on propose finalement deux modèles qui couplent les entrées internes et externes. Tout d'abord, par analogie avec certains modèles SMA classiques, dans lesquels les agents « consultent » leurs pairs pour décider de leur action, on propose le modèle suivant, dans lequel un agent intègre les positions des autres afin de déterminer son action par rapport à l'environnement (copie ou inversion) :

$$\Delta(x_i) = \left(p_i == \sum_{j \in I_i} (x_i == x_j)(r_{ij} == x_j) \right) == e(x_i) \quad [11]$$

Ce modèle n'est plus « linéaire » au sens précédent, et le phénomène d'absorption décrit plus haut disparaît. Dans ce modèle, et en supposant que p_i vaut 1, l'agent copie l'environnement en sa position si au moins un des agents avec qui il est connecté et qui occupe la même position que lui, est « vrai ».

A l'inverse, le modèle suivant considère l'état de l'environnement comme une indication de comportement par rapport aux autres agents :

$$\Delta(x_i) = \sum_{j \in I_i} (x_i == x_j)((r_{ij} == (p_i == e(x_i))) == x_j) \quad [12]$$

Cependant, dans ces deux modèles couplés, on a conservé la sommation logique pour les effets internes. On pourrait tout aussi bien envisager un principe de « majorité » construit à partir d'une fonction de seuillage, comme dans les réseaux de neurones classiques.

2.8. Adaptation des paramètres d'entrée

Une propriété largement utilisée dans les systèmes multi-agents, et en particulier dans les modèles SMARRPS que nous considérons, consiste à donner une capacité de contrôle de

ses schémas d'interaction à l'agent. Ici, dans le cadre booléen posé précédemment, les paramètres accessibles sont p_i et r_{ij} . Pour retrouver les mécanismes adaptatifs, on peut donc introduire une dynamique sur ces paramètres. Cependant, dans le cadre booléen, une telle adaptation, si elle est possible, est difficile à réellement exploiter. Nous y reviendrons donc plutôt dans le cadre entier.

2.9. Conclusion sur le modèle booléen

On trouvera en annexe le résultat de l'activation de ce modèle booléen dans un cas simple à 5 agents, et pour différentes configurations.

Le modèle booléen permet d'aborder très simplement les différentes caractéristiques des SMARRPS. Cependant il est peu représentatif des applications réelles. D'autre part les problèmes réelles correspondent en fait à des modèles continus discrétisés, qui ne présentent pas strictement les caractéristiques de systèmes dynamiques discrets. D'après François Robert [communication personnelle, 1997], le modèle discret ainsi décrit ne correspond à aucun résultat connu.

3. Modèle entier

A la suite du modèle booléen, nous allons considérer un modèle « entier » relativement simple, mais avec toutes les propriétés spécifiques des SMARRPS.

3.1. Composantes du modèle

3.1.1 L'espace

L'espace C est ici monodimensionnel, discret, infini, et les positions sont repérées par un entier relatif. Afin de faciliter l'analyse de la dynamique, on peut utiliser l'extension continue de l'espace, puis "rediscrétiser" par seuillage. Le prolongement continu concerne l'espace, et non le temps qui reste discret.

3.1.2 L'environnement

L'état de l'environnement en un point de l'espace est décrit par entier. Si on suppose que l'environnement est limité dans l'espace (il est nul partout hors de son domaine de définition), on peut le représenter par un vecteur à valeurs entières. Par analogie, on peut

aussi considérer que l'environnement est un signal discret monodimensionnel. L'environnement est fixe au cours du temps. L'environnement au point p est noté $E(p)$.

Dans son extension continue, l'environnement est une fonction de l'espace C dans un ensemble de valeurs V (cadre hilbértien).

3.1.3 Les agents

On considère N agents, dont l'état est défini par leurs positions dans l'espace, ainsi qu'un paramètre entier. Ils sont initialisés à une certaine position. La position de l'agent d'indice i est noté p_i . Son paramètre est noté v_i . L'état global d'un agent est donc : $x_i = \{p_i, v_i\}$. Si on s'intéresse à des agents « mécaniques », on posera que v_i représente leur vitesse ; mais v_i peut représenter tout autre attribut variable dans le temps (par exemple un identifiant de classe d'agent). Dans un premier temps, nous ne considérons que la position p_i .

3.1.4 La dynamique

3.2. Dynamique externe

On considère tout d'abord un agent seul plongé dans l'environnement. Sa dynamique spatiale s'écrit alors :

$$p_i(t+1) = p_i(t) + fp_i^0 E(p_i(t)) \quad [13]$$

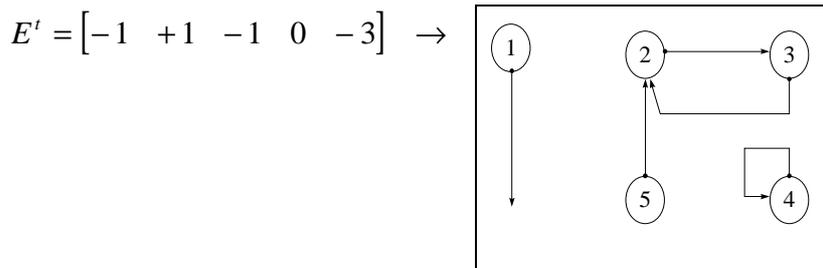
où fp_i^0 est un facteur entier pris dans $\{-1, 0, +1\}$. Pour $fp_i^0 = 1$, un agent (sans interaction interne) va à chaque pas de temps se déplacer de la valeur de l'environnement au point où il se trouve. L'environnement donne donc une transition d'état pour l'agent. Si par exemple l'environnement est uniforme, l'agent va avoir un déplacement uniforme de « vitesse » égale à la valeur de l'environnement ; et sa position va « diverger ».

Dans le cas général, la dynamique de l'agent peut se traduire par le parcours d'un graphe orienté (généralement non connexe) dont la structure est donnée par l'environnement. Pour

expliciter ce graphe, nous considérons que l'environnement est nul hors d'un intervalle¹⁹, et on le représente par le vecteur :

$$E^t = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_{L-1} \quad e_L] \quad [14]$$

Dans cette notation, on a effectué un changement de repère de manière à ramener la position de début de l'environnement à 1 ; la longueur de l'environnement est L. De chaque noeud du graphe, il ne sort qu'un arc. Il existe des « sources » (noeuds sans arc incident), mais les seuls « puits » (pas d'arc sortant) sont des noeuds dont les positions sont extérieures au domaine de E. Le graphe a exactement L arcs, et au moins L noeuds. A chaque noeud j du graphe correspond un arc dirigé vers le noeud $(j+e_j)$. Ainsi dans l'exemple suivant (L=5), on a la correspondance environnement / graphe :



On voit que pour tout état initial différent de 4 qui est un état stable, et de 1 qui sort du domaine, l'agent va converger vers le cycle (2-3).

Dans l'équivalent continu, l'environnement constitue un champ de vecteur qui donne la variation de l'état de l'agent en fonction de sa position. Le « parcours d'état » n'est pas continu (dans l'exemple précédent, on a le parcours 5-2-3-2-etc). Pour simplifier, par la suite on va choisir des environnements « réguliers », c'est-à-dire tels que la variation d'état due à l'environnement est au plus égale à 1. Le vecteur environnement est alors rempli uniquement de -1, 0 et 1. Voici un exemple d'environnement régulier :

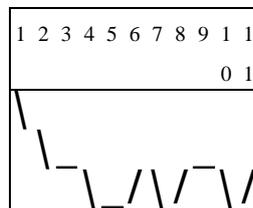
¹⁹ On peut aussi considérer un environnement cyclique (tore).

$$E^t = [+1 \ +1 \ 0 \ +1 \ 0 \ -1 \ +1 \ -1 \ 0 \ +1 \ -1] \quad [15]$$

On peut remplacer les $+1$ et -1 par des flèches indiquant la « direction » de déplacement dans l'environnement, et les 0 par des points notant un point fixe :

$$E^t = [\rightarrow \ \rightarrow \ \bullet \ \rightarrow \ \bullet \ \leftarrow \ \rightarrow \ \leftarrow \ \bullet \ \rightarrow \ \leftarrow] \quad [16]$$

dont une représentation équivalente, plus significative, est :



On observe ainsi un « paysage dynamique », qui nous amène à définir différentes notions de stabilité d'un point :

Un point p est fixe si $E(p)=0$. Un point fixe p de l'espace est stabilisé « à gauche » (resp. « à droite ») si $E(p-1)=(+1)$ (resp. $E(p+1)=(-1)$). Il est instable « à gauche » (resp. « à droite ») si $E(p-1)=(-1)$ (resp. $E(p+1)=(+1)$). Un point fixe de l'espace est stable s'il est stabilisé à gauche et à droite. Un cycle est une succession $(+1,-1)$. Un « répulseur » est un point fixe instable à gauche et à droite.

On notera qu'un point fixe ayant « à sa gauche » un autre point fixe n'est ni stabilisé ni instable à gauche, il est dit « fixe à gauche » (resp. à droite).

Dans l'exemple précédent, la position 3 est stable à gauche ; la position 5 est stable ; la position 9 est un répulseur ; et on a les cycles (7,8) et (10,11). On perçoit, dans cet exemple, que la position 5 est plus stable que la position 3, car si on perturbe « vers la droite » la position 3, on atteint la position 5, qui est, elle, stable relativement à une perturbation d'ordre 1. A ce sens, « l'énergie » de la position 3 est supérieure à celle de la position 5.

On n'a pas évoqué ici la situation où en deux positions successives la valeur de l'environnement est nulle.

3.3. Dynamique interne

La dynamique interne, c'est-à-dire celle de l'ensemble des agents sans interactions avec l'environnement, est de la forme :

$$p_i(t+1) = F \left(\sum_{j=1}^N fr_i^j \cdot p_j(t) \right) \quad [17]$$

où le paramètre fr_i^j est un *réel* qui décrit « l'effet » de l'agent j sur l'agent i, et F une fonction de \mathbf{R} dans \mathbf{Z} , qui en général permet simplement d'assurer que l'itération est une transformation (opération interne au sens des magma). F est alors une projection de \mathbf{R} dans \mathbf{Z} .

Si on note P le vecteur des positions des agents, et FR la matrice des coefficients fr (*matrice relationnelle*), on peut réécrire l'expression sous la forme :

$$P(t+1) = F(FR \cdot P(t)) \quad [18]$$

En supposant dans un premier temps que FR est à coefficients entiers, et que F n'est qu'une projection, on a l'expression analytique de l'état du système (dynamique interne) pour tout temps (discret) :

$$P(t) = FR^t \cdot P(0) \quad [19]$$

L'expression est donc polynomiale et entière (la transformation est homogène). On souhaiterait linéariser, mais dans la plupart des cas, les valeurs propres d'une matrice à coefficients entiers ne sont pas entières. Il n'y a donc pas d'expression générale plus simple dans \mathbf{Z} . On remarquera ici que la matrice FR n'est pas nécessairement symétrique.

Dans la projection sur un espace continu, les positions des agents peuvent être continus, et les coefficients fr_i^j sont alors des réels. Dans ce cas, la dynamique peut être linéarisée (pour des cas non dégénérés). Le comportement asymptotique du système est défini par sa plus grande valeur propre, encore appelée « rayon spectral ».

a. Exemple de dynamique discrète

On considère 3 agents, dont la matrice relationnelle est :

$$FR = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad [20]$$

Les valeurs propres sont ici $\{0, -1, -2\}$ et les vecteurs propres correspondant $(0 \ 1 \ 1)$, $(1 \ 0 \ -2)$ et $(0 \ 1 \ -1)$. On a alors l'expression de l'état :

$$P(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (-1)^t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (-2)^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.5 \\ -1 & 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} P(0) \quad [21]$$

qui se réécrit :

$$P(t) = \begin{bmatrix} (-1)^t p_1(0) \\ (-2)^{t-1} (2p_1(0) - p_2(0) + p_3(0)) \\ (-1)^{t-1} (2(1-2^{t-1})p_1(0) + 2^{t-1}(p_2(0) - p_3(0))) \end{bmatrix} \quad [22]$$

L'état de l'agent 1 reste borné ; mais on constate facilement que l'état des agents 2 et 3 divergent, hormis dans le cas où $2p_1(0) - p_2(0) + p_3(0) = 0$.

De façon générale, ce type de système diverge dès qu'une valeur propre est supérieure à 1

3.4. Dynamique globale

On obtient alors la dynamique globale du système par combinaison des dynamiques internes et externes :

$$P(t+1) = F(k.FR \cdot P(t) + (1-k).FP.E(P(t))) \quad [23]$$

Avec par convention $E(P(t))$ qui est le vecteur constitué par les termes $E(p_i(t))$, et FP la matrice diagonale des termes fp_i^0 . Dans le cas le plus simple, FP est réduite à la matrice unité (tous les agents « suivent » l'environnement). F est toujours la projection sur \mathbf{Z} , et k un réel compris entre 0 et 1 donnant la pondération entre effet externe et interne.

3.5. Extension de l'accès à l'environnement : convolution externe

Dans le dynamique externe précédente, l'agent ne lit l'environnement que là où il se trouve. On peut étendre ce modèle et prendre en compte un voisinage. Il suffit pour cela de considérer des matrices FP quelconque, et non plus seulement diagonales, avec des coefficients réels. En général, la matrice FP sera symétrique. Par ailleurs, le nombre maximum de colonnes remplies à gauche ou à droite de la diagonale donne le *rayon de perception* r_p . La matrice FP constitue un filtre qui donne pour chaque agent l'information venant de l'environnement. L'expression de la dynamique externe devient alors :

$$p_i(t+1) = p_i(t) + (fp_i * E)(p_i(t)) \quad [24]$$

où * note la convolution spatiale.

L'intérêt de prendre en compte une information étendue, est de permettre de sortir du « bruit » local. Ce type de processus de lissage est classique en traitement de signal.

3.6. Mécanismes adaptatifs

De même que dans le modèle booléen, les mécanismes adaptatifs peuvent concerner soit la dynamique interne, soit la dynamique externe. Dans le premier cas l'agent va adapter les paramètres fr_{ij} , et dans le deuxième les paramètres fp_{ik} . Mais une façon très simple d'agir sur la dynamique est de distinguer les facteurs k pour les différents agents, et de leur permettre de les modifier en fonction de leur état.

3.6.1 Recherche de points fixes

Considérons le problème *a priori* le plus simple à décrire : *localiser tous les points fixes stables*.

Ce problème a la propriété de ne pas avoir de contrainte interne, puisque les formes recherchées sont des points indépendants. On peut donc considérer que la matrice FR est nulle. Si on prend la forme la plus simple de la dynamique externe (pas de convolution étendue et copie de l'environnement), chaque agent va donc simplement suivre l'environnement et converger vers les points fixes ou les cycles (ou stationner sur les points fixes instables). Le mode d'itération est indifférent. L'initialisation est, en général, une distribution homogène des agents disponibles sur l'espace. Les cycles étant nécessairement de longueur 2, la stabilité est détectée, et on peut donc arrêter le système, quand l'état futur calculé est égal à l'état passé mémorisé (il faut donc 3 unités de stockage d'état pour chaque agent pour pouvoir détecter automatiquement la stabilité du processus).

En l'état, ce système ne répond pas au problème, puisqu'il fournit tous les points fixes, ainsi que des cycles. La première amélioration vise à empêcher la détection des cycles. Elle consiste à ce que chaque agent évalue sa position future, et si l'environnement en cette position donne un déplacement opposé au déplacement courant, alors l'agent est dans un cycle. Dans ce cas, il s'efface.

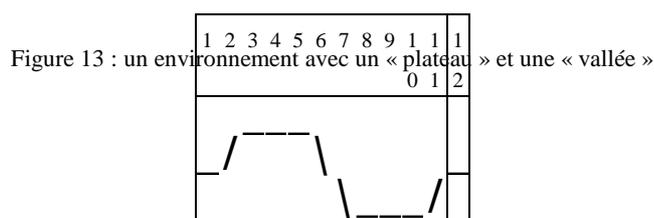
La deuxième amélioration va éliminer les points fixes stabilisés seulement d'un côté. Pour ce faire, on prend un rayon perceptif non plus de 0 (l'agent ne prend en compte l'environnement que là où il se trouve), mais de 1 (l'agent considère une position à gauche et une à droite). Les paramètres fp_i^{+1} et fp_i^{-1} sont choisis positifs et *a priori* égaux. Il faut que le seuil de la fonction de projection F (en général $\frac{1}{2}$) soit dépassé pour que l'agent sorte du point fixe. On prend donc comme valeur pour les paramètres fp_i^{+1} et fp_i^{-1} la valeur du seuil de F. Afin de conserver une évolution continue, il faut cependant alors que le seuil de F soit inférieur à 1, ce qui est le cas normalement.

Dans ce mécanisme, un agent, fixe d'un côté et stabilisé de l'autre, se déplace vers son côté fixe, puisque le seuil de bascule est atteint. Un agent fixe, fixe d'un côté, et instable de l'autre, bascule vers le côté instable. En revanche, un agent fixe, fixe des deux côtés, ne se déplace pas.

Pour éliminer les points fixes instables, on peut choisir des paramètres fp_i^{+1} et fp_i^{-1} un peu différents, de manière à rompre la symétrie. Cependant, le sens du « déséquilibre » rend la dynamique anisotrope, et peut donc induire des biais dans l'exploration. Si on dispose des ressources (en calcul) nécessaires, la meilleure stratégie consiste alors à conserver un

schéma d'interaction symétrique, et à diviser l'agent en deux nouveaux agents qui sont initialisés à gauche et à droite du point fixe instable. Mais ce processus n'est acceptable qu'en l'absence d'interactions internes, car, autrement, il faut déterminer comment modifier la structure interne pour ces nouveaux agents. Une autre possibilité consiste à alterner aléatoirement le sens du déséquilibre, ou à explorer systématiquement les deux solutions. Rien de tout cela n'est très satisfaisant en termes d'isotropie de la recherche ou de coût.

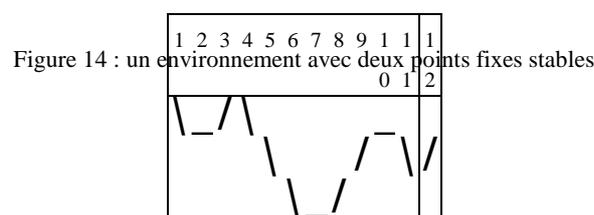
Le raisonnement consiste alors plutôt à décider d'une amplitude de perturbation que l'on peut accepter. Ceci correspond exactement au principe de la diminution de température dans les méthodes de recuit simulé. Si on considère l'état stable, avec des perturbations d'amplitude inférieure au seuil de F , alors un point fixe instable au sens défini ci-dessus, va néanmoins « résister aux perturbations ». Et cette situation est identique pour les points fixes, fixes à gauche et à droite. La symétrie fige la dynamique. Si on envisage des perturbations « d'amplitude 1 », c'est-à-dire des oscillations supérieures au seuil de F , mais inférieures à deux fois ce seuil, alors l'état instable ne résiste pas aux perturbations, et il y a basculement. Mais la symétrie est toujours présente, et oblige à des manipulations pour garantir un parcours isotrope. Cependant, si on élargit le « paysage » local, et hormis dans des situations pathologiques de symétrie artificiellement imposée, il arrive une distance au delà de laquelle la symétrie est rompue. Par rapport à la décision, qui consiste à savoir de quel côté chercher les points fixes stables, il y a une information discriminante qui apparaît, et permet de faire pencher le choix d'un côté. Et ceci est vrai aussi bien pour les points fixes instables que pour les points fixes, fixes des deux côtés. On trouve dans la Figure 13 un exemple caractéristique d'une telle situation, avec une « vallée », et un « plateau ». Le plateau (3-4-5) est stable « à l'ordre 0 ». Le point 4 est aussi stable « à l'ordre 1 », mais il est « instable à l'ordre 2 », et la symétrie est brisée « à l'ordre 3 ». Dans cet environnement, un agent initialement localisé au point 4 ne pourra trouver les points fixes stables (la « vallée ») que s'il accédait à l'information dans un rayon de 4 positions.



On propose donc de résoudre le problème en induisant un mécanisme adaptatif, qui consiste, pour tout agent fixe, à étendre son rayon de perception jusqu'à ce que l'effet de l'environnement soit non nul. On peut fixer une limite haute au rayon de perception, mais alors les solutions obtenues ne sont stables que pour des perturbations d'amplitude inférieure au rayon de perception. Dès qu'un agent a échappé, il diminue son rayon de perception afin de minimiser le coût de recherche.

A partir de ce mécanisme initial, on est certain d'obtenir des points fixes, stables pour une taille de perturbation. En revanche on n'est pas certain de les obtenir tous. Cette question n'est pas résoluble sans recourir à une exploration systématique. Et en l'absence de modèle de l'environnement *a priori*, il n'est pas possible de choisir les positions initiales des agents pour optimiser la recherche. On interdit dans ce cas les positions déjà parcourues. En revanche, en supposant une certaine régularité de l'environnement, et en fonction de la répartition des points stables déjà détectés, on peut envisager de choisir une nouvelle initialisation selon un modèle bayésien. Par ailleurs, dans le processus décrit ci-dessus, deux agents peuvent converger vers le même point fixe stable.

Considérons maintenant la recherche des points fixes stables les plus attractifs, quand l'attractivité d'un point est quantifiée par la probabilité d'atteindre ce point pour une initialisation quelconque d'un agent, et selon le processus décrit précédemment. Pour un point fixe stable, cette probabilité est égale à la taille du bassin d'attraction du point fixe (selon le processus précédent), ramenée à la taille de l'environnement. Quand un agent a convergé vers un point fixe donné, il existe peut-être, dans un voisinage de taille fixée *a priori*, un autre point fixe plus attractif, comme dans la Figure 14, où le point fixe 2 (attractivité $\frac{1}{4}$) est « voisin » du point fixe 7 (attractivité $> \frac{1}{2}$). Si donc un agent, stabilisé sur le point 2, étend son rayon de perception jusqu'à la valeur 2 (2 points de l'environnement pris en compte à droite et à gauche), et en se rappelant que l'environnement est considéré comme nul « à l'extérieur » du domaine considéré, alors l'effet de l'environnement devient positif (pour $fp^{+2} > 0$), et l'agent subit une « attraction » vers le bassin du point 7.



Si on poursuit l'extension du rayon de perception, l'attraction du bassin du point 7 peut être suffisante pour échapper au bassin du point 2. On a donc un processus qui, en étendant les interactions externes (avec l'environnement), permet d'explorer le paysage dynamique, dans une certaine limite, et éventuellement d'échapper à des attracteurs locaux. Précisons cette propriété.

On définit le *gradient environnemental* de deux positions par la somme des valeurs de l'environnement prises entre ces deux positions :

$$\forall (p_1, p_2) \in \mathcal{C}^2, \left\{ \begin{array}{l} p_2 > p_1 \Rightarrow \Delta_E(p_1, p_2) = \sum_{p \in [p_1, p_2-1]} E(p) \\ p_2 < p_1 \Rightarrow \Delta_E(p_1, p_2) = - \sum_{p \in [p_2, p_1-1]} E(p) \\ p_2 = p_1 \Rightarrow \Delta_E(p_1, p_2) = 0 \end{array} \right. \quad [25]$$

Soit p_{f1} et p_{f2} les positions de deux points fixes stables, tels que $l=(p_{f2}-p_{f1})>0$ et $\forall p \in [p_{f1}-l, p_{f2}], \Delta_E(p_{f1}, p) < \Delta_E(p_{f1}, p_{f2})$ avec $\Delta_E(p_{f1}, p_{f2}) \geq 0$. Alors, le rayon de perception minimum tel que l'agent localisé en p_{f1} « accède » au bassin de p_{f2} est $l - \Delta_E(p_{f1}, p_{f2})$ (c'est une condition suffisante, mais non nécessaire). Dans le cas d'une recherche du point fixe stable plus attractif, il faut que la valeur du rayon de perception ne soit pas réinitialisée à chaque pas, car alors, l'agent, après avoir un peu progressé vers le « meilleur » point fixe durant un pas, redescendrait dans le bassin initial. On notera que ce critère est indépendant de la hauteur des « cols » entre les deux points fixes stables. Cela est dû à la régularité de l'environnement.

On peut envisager une approche complètement différente, consistant non plus à modifier le rayon de perception, mais à travailler à rayon nul, avec création « d'explorateurs » quand la situation est « indécidable », c'est-à-dire en modifiant le nombre d'agents. On retrouve la proposition faite pour les points fixes instables, et consistant à créer deux agents partant chacun d'un côté de l'instabilité. Si on omet dans un premier temps les contraintes de cohérence interne déjà évoquées, on peut proposer le principe suivant : chaque agent qui est sur un point fixe (et donc immobile, puisque le rayon de perception est nul), crée deux clones explorateurs, un à gauche et un droite, qui suivent l'environnement toujours dans le même sens en s'écartant de l'agent « source ». Ces deux agents sont reliés. Ils avancent tant

que l'environnement est symétrique, c'est-à-dire pour des valeurs d'environnement inverses à gauche et à droite. Dès qu'une asymétrie est détectée, on ne conserve que l'explorateur dont le sens de déplacement est le plus cohérent avec le sens imposé par l'environnement. Ce processus peut aussi être utilisé à partir d'un cycle.

Ces différents mécanismes de recherche ne présentent un intérêt par rapport à une exploration systématique, que dans le cas où on peut rendre le processus parallèle. Par ailleurs, ils se justifient lorsqu'il existe une structure (une forme) à préserver, comme dans le cas de la recherche de formes.

3.7. Conclusion pour le modèle entier

Ce modèle « entier » donne un aperçu empirique des problèmes de contrôle. Mais nous n'avons pas poussé très loin l'analyse formelle. En particulier on peut penser qu'au vu du modèle, quelques résultats formels pourraient être abordés en utilisant un formalisme de chaînes de markov. En particulier ce modèle est relativement proche d'une carte de Kohonen pour laquelle on dispose de résultats (Cottrell, Fort, Pagès) montrant qu'il y a auto-organisation et convergence en dimension 1. On a aussi différents résultats sur les fonctions de voisinages (filtres internes) qui mériteraient d'être considérés.

4. Modèle SMARRPS

Le modèle SMARRPS, introduit dans le chapitre précédent, propose d'attacher aux agents réactifs des *filtres* de communication et perception, qui, par action sur l'espace de référence, vont générer les champs de communication et de perception. Cela nous amène à introduire *un mécanisme de double convolution sur l'état* qui dans l'approche analytique de la convergence nous sera utile. Le modèle reste du type réseau de systèmes dynamiques en interaction.

Ce modèle est simplifié à l'extrême tout en conservant les propriétés fondamentales introduites ci-dessus. L'approche n'est pas seulement réactive ; elle reste aussi très mécanique et s'abstient de toute référence à des buts, à la logique, ou à des intentions d'agents.

4.1. Motivation et choix d'un formalisme

Bien que l'approche ait été validée expérimentalement, et en particulier pour des classes de problèmes réputés « difficiles », il est souhaitable, à des fins de robustesse, d'obtenir des résultats formellement fondés sur la convergence de la méthode vers une solution répondant aux contraintes. Dans un travail précédent [Ferrand, Labbi, et al., 1994], nous avons abordé cette question par la voie de la théorie des systèmes dynamiques, et par analogie à des résultats sur les réseaux de neurones. L'approche consiste à construire l'espace de phase, et à en étudier les propriétés asymptotiques. Mais l'auto-adaptation des filtres par les agents accentue la non-linéarité du système, et interdit l'usage des théorèmes classiques sur les convergences asymptotiques (théorème de Hirsch pour les réseaux à variables externes). De plus les théorèmes de systèmes dynamiques ne sont pas « constructifs » : ils décrivent l'évolution de systèmes, et non leur construction.

Nous avons retenu ici une approche fondée sur les modèles classiques en automatique, et dans le cadre de la commande des systèmes²⁰. La raison principale est que notre perspective est « ingénieuriste » : nous souhaitons **construire** des systèmes qui résolvent des problèmes. L'automatique répond à cette attente en indiquant quelles commandes il faut appliquer pour obtenir un comportement (contrôle), et elle permet de déterminer la forme des systèmes afin qu'ils produisent un résultat donné (identification). Par ailleurs, ce formalisme aborde (de façon complexe, il est vrai) les systèmes distribués (recours à des équations aux dérivées partielles), ainsi que les systèmes adaptatifs (paramètres variables en fonction de l'état).

4.2. Traduction de SMARRPS en langage « Automatique »

Lors de la conception d'un SMARRPS, l'objectif est de produire un système tel qu'il fournisse une solution (une forme vérifiant des contraintes internes et externes) pour tout environnement acceptable dans le cadre du modèle initial. Cette problématique est exactement celle du « contrôle automatique », dans lequel on élabore un système dont les sorties doivent respecter une consigne. Pour ce faire, on utilise un bouclage (une régulation) qui ajuste la dynamique en fonction de l'état de sortie et des consignes. Détaillons les questions relatives à la transcription dans une approche automatique :

²⁰ Le formalisme sous-jacent est aussi celui des systèmes dynamiques, mais la perspective est prescriptive et non descriptive.

Quel est le système modélisé ? Cette question, apparemment naïve, n'est pas du tout triviale ; car si on fait le détail des éléments et processus, il est difficile de choisir le statut des différents paramètres. Ainsi l'environnement fait-il partie du système (de la « boîte »), s'agit-il d'une consigne, d'une perturbation ? De même, quels sont les contrôles ? Quels sont les observables (sorties) ?

Comment distingue-t-on la phase de conception, pendant laquelle on va chercher à optimiser la structure du SMAR en fonction du but recherché, de la phase d'utilisation où le système doit répondre de façon autonome pour des environnements variés, et ce, à partir d'initialisations non fixées ?

L'automatique nous renseigne sur l'*accessibilité* d'états, et donc la certitude d'atteindre les solutions à partir de toute initialisation ; l'*observabilité*, c'est-à-dire la garantie que le système réponde différemment pour des attentes différentes ; la *commandabilité*, qui renseigne sur notre capacité à contrôler la dynamique ; enfin la stabilité qui nous informe sur la convergence du SMAR. Le principe même de la régulation nous assure de la proximité à la consigne.

Peut-on disposer des bonnes représentations algébriques pour modéliser les processus intéressant l'I.A. ? En effet, l'automatique est adaptée aux modèles analytiques avec des variables vectorielles classiques, mais pas à des formalismes qualitatifs ou symboliques. Quelles sont les structures nécessaires ?

4.3. Modèle dynamique

Le modèle décrit ici est susceptible de résoudre une classe particulière de problèmes spatialisés [Ferrand, Baeijs, Demazeau, 1997], définis par la donnée d'un environnement, de contraintes topologiques pour la solution, et de contraintes morphologiques.

Selon ce modèle de Problème Spatialisé, les données externes du problème sont transcrites dans l'*environnement* E , qui est une application entre un espace de référence spatiale C (en machine un système de coordonnées ou d'indexation, borné ou torique) et un ensemble quelconque d'attributs V . On note $E(p)$ la valeur de l'environnement à la position p de C . La dépendance temporelle peut être incluse dans C . Dans la suite, on notera le temps pour la dynamique du système multi-agents. Le temps ici dénoté est celui de la

convergence du système en termes de dynamique des agents ; il s'agit en pratique d'itérations discrètes dans la machine.

On appelle *Univers*, noté U , la combinaison de l'environnement et de l'ensemble A des agents. On suppose que N agents sont présents dans l'univers. Chaque agent a_i ($i \in [1..N]$) de l'ensemble A est défini par cinq attributs :

- son *état* x_i ,
- son *filtre perceptif* fp_i ,
- son *filtre relationnel* fr_i ,
- sa *fonction comportementale* f_i ,
- son *opérateur d'action* fa_i .

Et éventuellement, si on utilise un mécanisme d'adaptation :

- ses *opérateurs d'adaptation* MP_i (cf. *perception*) et MR_i (cf. *communication*)

Les contraintes internes M et externes T du problème doivent être traduites dans les différents paramètres des agents.

4.3.1 Etat des agents

L'état x_i appartient à l'ensemble X_i , qui est soit un espace vectoriel, soit le produit cartésien d'ensembles d'attributs. Ici, l'état de l'agent inclura toujours sa position p_i , mais d'autres attributs peuvent décrire l'agent : taille, énergie, couleur, etc. Dans un formalisme lagrangien classique, on utilise aussi dans la représentation d'état les dérivées temporelles des variables spatiales, afin d'avoir une description consistante.

On note e_i l'élément d'état distinct de la position. On a donc :

$$x_i = (p_i, \dot{p}_i, e_i)$$

De par la métrique de C on peut toujours définir une distance entre deux agents en fonction de leurs positions, mais on peut aussi compléter cette distance par une distance d'état descriptive des différences d'attributs entre agents (par exemple une distance binaire discriminante d'une propriété).

Les Agents a_i et a_j sont dits *homogènes* si :

$$\{\forall (i,j), X_i = X_j\}.$$

Pour des agents hétérogènes, la distance d'état est souvent réduite à la distance spatiale, et éventuellement à un indicateur de type d'agent.

L'état global du système est alors donné par le vecteur :

$$x = \{x_i, i \in [1, \dots, N]\} \in X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N$$

Soit T l'ensemble des transitions d'état de X (resp. T_i pour X_i).

4.3.2 Filtre perceptif

Une *influence externe* est une application de V dans T_i , qui à une valeur d'un point de l'environnement associe son effet sur l'état de l'agent a_i . L'ensemble des influences externes est noté I_{ext} .

Le *filtre perceptif* fp_i d'un agent est une application de \mathbf{R} dans I_{ext} qui donne l'influence externe en fonction de la distance à l'agent. Convolué à la position de l'agent, il constitue son *Champ de Perception* cp_i , une application de C dans I_{ext} qui donne l'influence externe de chaque point de la carte sur l'agent :

$$cp_i(p) = fp_i(p - p_i)$$

L'effet produit par la position p de l'environnement sur l'agent a_i est alors :

$$cp_i(p) [E(p)] \in T_i$$

Et l'effet global de l'environnement sur l'agent a_i est alors :

$$\Delta_i^{ext}(E) = \sum_{p \in C} fp_i(p - p_i)(E(p))$$

Malgré son apparence, cette dernière expression n'est pas une convolution spatiale de fp et E, car cp "opère" en fait sur E. Cependant, dans les cas courants où les influences externes sont des fonctions scalaires, on a alors effectivement une telle convolution.

4.3.3 Filtre relationnel

Le mécanisme interne à la société d'agents (relationnel) est plus complexe car l'évaluation de l'influence dépend de l'état, et non plus seulement de la position.

Une *influence interne* est une application de X dans T_i , qui à un état d'agent associe son effet sur l'état de l'agent i . L'ensemble des influences internes est noté I_{int} .

On note d_X la distance d'état définie sur X et à valeurs dans $H \subset \mathfrak{R}$.

Le *filtre relationnel* fr_i d'un agent est une application de H dans I_{int} qui donne l'influence interne en fonction de la distance d_X à l'agent i . Appliqué à la position de l'agent, il constitue son *Champ de Communication* cc_i , une application de A dans I_{int} qui donne l'influence interne de chaque agent a sur l'agent i :

$$cc_i(a) = fr_i(d_X(x(a), x_i))$$

Finalement l'effet produit par l'agent k sur l'agent i est :

$$cc_i(a_k) [x_k] \in T_i$$

Et l'effet global de la société sur l'agent i est alors :

$$\Delta_i^{int}(A) = \sum_{a \in A} fr_i(d_X(x(a), x_i))(x(a))$$

Si la distance d'état d_X est réduite à la distance spatiale (cas d'agents "plongés" dans l'environnement), on peut considérer que le filtre relationnel est un filtre spatial, et on a alors :

$$\Delta_i^{int}(A) = \sum_{a \in A} fr_i(|p_i - p(a)|)(x(a))$$

4.3.4 Fonction comportementale

A partir des effets internes et externe, la fonction comportementale évalue l'action d_i subie par l'agent sous la forme d'une transition d'état :

$$\forall i \in [1, \dots, N], d_i = f_i \left(\Delta_i^{ext}(E), \Delta_i^{int}(A) \right) \in T_i$$

4.3.5 Opérateur d'action

Enfin, l'opérateur d'action calcule le nouvel état de l'agent en fonction de son état initial, de l'action subie, et de l'écart temporel (variable de modélisation en temps discret) :

$$\forall i \in [1, \dots, N], x_i(t + \Delta t) = fa_i[x_i(t), d_i(x_i(t)), \Delta t]$$

4.3.6 Adaptation des filtres

En complément de sa dynamique propre, l'agent a éventuellement la capacité d'adapter les filtres perceptifs et relationnels en fonction de son état. Il peut donc exister deux opérateurs notés respectivement MR_i et MP_i pour chacun des filtres et tels que :

$$\begin{cases} fr_i[t + \Delta t] = MR_i(fr_i[t], U(t)) \\ fp_i[t + \Delta t] = MP_i(fp_i[t], U(t)) \end{cases}$$

4.4. Schéma et processus fonctionnel

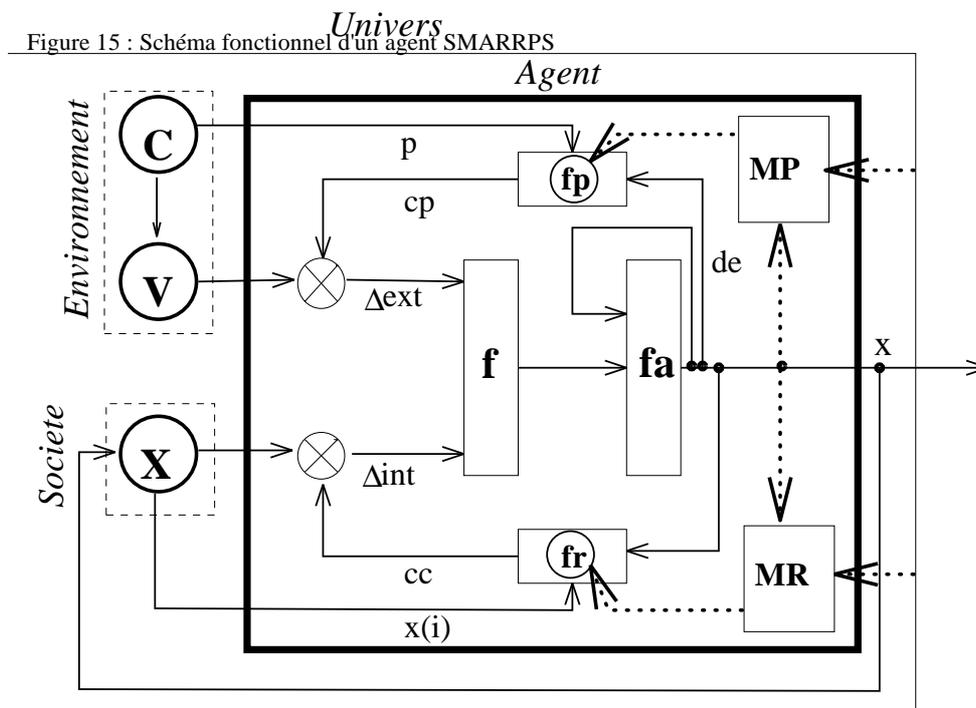
Le schéma fonctionnel global est illustré dans la Figure 15, avec un seul agent représenté. Ce schéma est donc itéré comme le nombre d'agents.

Malgré le formalisme fonctionnel utilisé, les procédures de sélection et traitement qui sont utilisées dans les divers filtres peuvent être qualitatives, et donc exprimées simplement par des règles. Seul le filtre perceptif doit conserver ses propriétés topologiques. Cela permet, au besoin, d'aborder la résolution de problèmes spatialisés exprimés de façon symbolique.

Le modèle ci-dessous constitue une extension d'un modèle classique d'automate cellulaire avec trois différences principales :

- dépendance des mécanismes d'accès à l'environnement en fonction de l'état
- dépendance des schémas d'interaction entre entités en fonction de l'état
- adaptation des schémas d'acquisition en fonction de l'état local

4.5. Traduction énergétique et contraintes de calcul



L'automatique classique ne fait pas référence à la notion d'énergie, cependant nous nous y intéressons par comparaison avec les méthodes stochastiques d'optimisation.

Tout d'abord, on peut penser que l'énergie globale du système est la somme des énergies des agents. Cependant cela est insuffisant pour prendre en compte les contraintes internes (morphologiques) : il existe une énergie propre du système liée à son désordre par rapport à la forme attendue. On a donc trois termes énergétiques : une énergie externe (potentielle) liée à l'interaction avec l'environnement, une énergie interne liée à la forme (potentielle), et une énergie interne liée au mouvement des agents (cinétique). L'énergie cinétique est directement fonction de la « vitesse » des agents.

$$Energie(U) = Energie(\{A, E\}) = \sum_{a \in A} \frac{1}{2} [\dot{p}(a)]^2 + Energie(forme(A)) + Energie(A / E)$$

Par ailleurs, si on admet que les prédicats de contraintes M et T sont valués entre 0 (non vérifié) et 1 (parfait), alors on peut exprimer directement les énergies potentielles, et obtenir :

$$Energie(U) = \sum_{a \in A} \frac{1}{2} [\dot{p}(a)]^2 + \left(\frac{1}{M(A)} - 1\right) + \left(\frac{1}{T(E, A)} - 1\right)$$

En supposant que l'on puisse appliquer les prédicats à l'ensemble A. L'objectif est de minimiser cette énergie ; à cet égard on peut distinguer les termes à différentes échelles. Le critère topologique n'est que local ; on peut donc distinguer l'énergie de chaque agent. En revanche, le critère morphologique M est multi-échelles, et la plus petite échelle signifiante est celle de la paire (interaction 1-1). L'énergie d'une paire est en général fonction de la distance des agents (critère discret de continuité). Aux échelles supérieures, le calcul de l'énergie oblige à prendre en compte un nombre croissant d'agents, jusqu'à considérer tous les agents pour des critères comme « courbe auto-évitante ».

Le critère énergétique précédent ne décrit que la situation de l'agent par rapport au problème posé. Dans le cadre de la RP, on est obligé de tenir compte des contraintes computationnelles. En particulier, plus les champs perceptifs et relationnels des agents sont étendus, et plus la complexité du calcul de la dynamique locale augmente : pour une carte de dimension D et de volume V, le nombre d'interactions d'un agent est en moyenne de $rp^D + \frac{rc^D}{V}N$. Si on souhaite minimiser le temps de calcul, il faut donc imposer aux agents de réduire leurs champs autant que possible. En insistant sur son caractère opportuniste et non intrinsèque au modèle, on peut donc ajouter à l'énergie des agents un "coût d'extension" des champs inversement proportionnel à leur rayon.

Finalement, on notera que le principe qui préside à la mise en place des adaptations dynamiques MR et MP consiste à minimiser l'énergie en ajustant les commandes, c'est-à-dire rp et rc.

4.6. Conclusion sur le modèle SMARRPS

Le modèle SMARRPS est le fondement d'une grande partie de cette thèse. Comme on l'a vu dans cette section, il est possible d'en donner une description formelle.

Malheureusement nous n'avons pas été au delà de l'analyse globale. En particulier nous n'avons pas abordé les possibilités de porter des résultats de contrôle ou de traitement de signal. Cela supposerait de pouvoir tenir compte des deux niveaux de convolution : externe et interne, et éventuellement de considérer aussi les mécanismes d'adaptation. L'approche théorique pure serait certainement très difficile. Nous pensons qu'il serait souhaitable de reprendre le modèle pour analyser formellement ce que l'adaptation des filtres permet d'assurer en terme de convergence, et en particulier de sortie des minima locaux.

D'autre part, malgré la valorisation opérationnelles des systèmes fondés sur SMARRPS, il n'y a pas eu de comparaison systématique avec d'autres approches. Ce travail reste aussi à faire.

Il reste que nous avons montré ici que l'on pouvait décrire formellement la dynamique d'un Système Multi-Agents Réactifs complexe, incluant une adaptation des interactions, et une dépendance contextuelle des interdépendances.

Partie 3

Applications

Aide à l'Analyse de Projet Spatial

Aide à la Négociation de Projet

Chapitre 6

Aide à l'Analyse de Projet Spatial

Prendre en compte le contexte socio - politique

1. Introduction

La première application des recherches réalisées a porté sur l'aide à la décision mono-acteur, et plus précisément l'aide à l'expertise lors d'études d'infrastructures linéaires. Parmi les phases décrites dans le chapitre 1, nous avons choisi d'instrumenter la phase de localisation des fuseaux de moindre impact. Du fait de la proximité de ce type de problème avec des problèmes similaires déjà traités par des approches multi-agents réactifs, nous avons proposé une utilisation spécifique des SMARRPS comme support des systèmes. Ce choix a été aussi justifié par la facilité avec laquelle cette approche permettait de passer de la description par les experts, à un modèle de situation, puis à sa résolution. D'autre part, ce choix a permis d'illustrer certaines propriétés spécifiques intéressant notre cas. Nous avons donc développé le système SMAALA, pour Système Multi-Agents d'Aide à la Localisation d'Aménagements.

2. Contexte

Dans le cadre des études d'infrastructures linéaires considérés, nous avons initié une recherche sur les possibilités que pourrait offrir divers outils informatiques pour instrumenter « efficacement » l'expertise spatiale en aménagement. Par « efficacité » nous entendons plutôt la facilitation des échanges entre expertise et décision et du positionnement respectif des acteurs, que l'augmentation quantitative ou qualitative du contenu proprement technique de l'expertise. Ce postulat repose sur le constat que le contexte relationnel de la décision prime généralement sur son contenu technique, et que donc il paraît illusoire de vouloir développer un système d'information géographique pour l'aide à la décision, à vocation purement technique, et abstrait du processus socio-politique qu'il cherche à instrumenter. Le transfert de l'expertise technique sur la machine et les sources d'informations exogènes ne peut conduire au mieux qu'à un déplacement des conflits vers d'autres champs : ceux de la validité des sources de données, des méthodes

informatiques, et plus tard des prescriptions constructives ; l'intrusion de l'ordinateur peut alors être traduite par les acteurs contestataires comme une disparition de l'interlocuteur personnifié, et par là-même une opacification de la décision. Une telle issue ne favoriserait pas les objectifs affichés de transparence et participation citoyenne.

3. Principes de conception

En préambule, nous voulons poser un principe fondamental de notre ingénierie de l'aide à l'expertise et la décision : *les systèmes doivent être développés en réponse à un besoin constaté, et non comme outils techniques imposés par la modernité* (le besoin crée l'offre et non le contraire). L'expert étant déjà compétent pour la thématique et la méthodologie, l'expression des besoins n'est pas directe. Mais en partageant une analyse de l'expertise, on relève les points d'achoppements de la méthode où résident des difficultés généralement masquées, où des améliorations attendues mais non engagées. Les problèmes soulevés lors de cette analyse justifient largement d'une réponse technique spécifique, souvent élaborée.

Par ailleurs, il est fondamental pour ces problèmes de décision de produire des systèmes dont le modèle interne de fonctionnement soit *compréhensible* par les acteurs, car le besoin d'explication et de validation est grand. Le schéma fonctionnel doit donc être proche des schémas mentaux utilisés.

Enfin, et en cohérence avec les principes précédents, le système développé doit être facilement *adaptable* aux différents cas d'application mais aussi éventuellement à de nouveaux types de requêtes des utilisateurs.

4. Problème considéré

Nous considérons ici la phase de détermination des fuseaux de moindre impact.

4.1. Motivation de l'instrumentation

L'expert sait effectuer ce travail, mais :

- l'opération est coûteuse en temps, et ne peut être répétée (une synthèse va nécessiter plusieurs jours de travail) ;
- le processus est opaque et peu contrôlé : l'expert qui fait la détermination procède à un choix qui n'est pas explicité ;
- il n'est pas interactif avec le décideur, alors que c'est une phase de décision ;

- il ne permet aucune flexibilité selon le type d'acteur : les fuseaux sont indifférenciés.

L'instrument à développer doit donc pouvoir aider à la fois l'expert et le décideur.

Cette phase a été choisie car elle confond très largement les rôles respectifs de l'expert et du décideur, et, de plus, elle est déterminante pour la suite de la décision. Enfin, elle permet d'illustrer clairement ce qui distingue expertise et décision.

4.2. Description du problème

Lors de la phase de détermination des fuseaux de moindre impact, les collectes de données par les experts sont normalement achevées. On dispose donc alors d'un ensemble de cartes de sensibilités pour l'aire d'étude, qui donnent pour chaque critère retenu, et pour chaque point de l'espace, un niveau de sensibilité selon un nombre de classes limité. Par ailleurs, on connaît les « points d'ancrage » du projet, c'est à dire les points de passage obligatoires. On dispose aussi des données structurelles, qui définissent les « formes » acceptables, en particulier en terme de courbure. En revanche, le mécanisme qui détermine la « combinaison » des différents critères n'est pas spécifié. On cherche l'ensemble des fuseaux attachés aux points d'ancrage, respectant les contraintes structurelles, et minimisant les impacts.

Les fuseaux étant des formes linéaires, étendues dans l'espace, la comparaison finale ne peut se faire que sur les fuseaux dans leur ensemble, à moins qu'ils ne divergent que sur une sous-partie de l'espace. En revanche, « localement » (en un point d'un fuseau) il se peut que le déplacement du fuseau puisse réduire son impact. Cependant, un tel déplacement conduit à une déformation, qui, suivie par le reste du fuseau, peut amener à une augmentation d'impact ailleurs. Ce problème est classique en optimisation.

La pratique des experts de CERREP S.A. veut qu'ils ne procèdent jamais à une agrégation "intercritères" globale visant à donner une « note » unique à un fuseau. La « solution » est constituée par un *ensemble de fuseaux* documentés. En revanche, pour obtenir ces fuseaux ils procèdent *de facto* à une agrégation "intercritères", mais seulement localement pour chaque point de l'espace. La fonction d'agrégation n'est pas explicite, mais elle est de type « maximum des valeurs pondérées », c'est-à-dire que les valeurs de sensibilité sont

affectées d'une « importance » relative, et que l'on retient le plus faible impact. Mais la pondération n'est pas uniforme dans l'espace.

L'objectif du système à développer est d'explicitier les « importances relatives » sous forme de pondérations locales des critères, qui vont être utilisées non pour fournir une fonction d'évaluation globale, mais seulement une fonction de préférence dans un voisinage. Les contraintes structurelles sont prises en compte pour propager les modifications locales.

Le principe retenu est d'**aider l'expert**, et non directement le décideur, à préparer la décision.

4.3. Approches possibles

Le problème posé relève de la phase de *conception*, au sens de Simon [1977]. Il ne s'agit pas de choisir, mais de préparer le choix en déterminant l'espace des possibles raisonnables, et en documentant chaque solution. De plus, il entre dans le cadre du « modèle multicritères », conformément aux caractéristiques identifiées par Munier [1995] :

- le système est interactif, et permet à l'utilisateur de faire évoluer ses préférences,
- le système n'optimise pas, il produit une solution acceptable,
- il permet d'explorer et de comprendre les positions d'autrui, selon les différents critères,
- il peut faciliter les *processus* collectifs d'appréhension des problèmes.

En revanche, l'objet de la « conception » est particulier, car il s'agit d'une structure linéaire, qui couvre l'espace, avec des contraintes morphologiques²¹. Or les méthodes multicritères classiques sont généralement présentées comme permettant le choix parmi des ensembles de possibles, caractérisés par un point dans un espace d'attributs. Ici, l'attribut descriptif d'une ligne donnée est constitué de l'ensemble de ses impacts, point après point, ainsi que de sa longueur. Il s'agit donc plutôt d'une fonction descriptive que d'un ensemble. On peut cependant toujours établir une relation binaire pour chaque critère donnant un ordre partiel entre deux fonctions ainsi définies. Cela suppose de quantifier les niveaux de sensibilité pris en compte, et d'intégrer sur la longueur du tracé (voir Figure 4,

²¹ Joerin [1995] a proposé récemment de combiner une méthode multicritères classique (ELECTRE TRI) avec un SIG pour déterminer des zones de moindre impact sur un territoire entier. Cette approche tire parti de la puissance de calcul de l'ordinateur pour comparer systématiquement tous les points de l'espace. Malheureusement, ceci semble inapplicable dans le cas des infrastructures linéaires, pour lesquelles il faut tenir compte des contraintes structurelles.

p. 48). Mais ce type de relation n'est utilisable raisonnablement que dans une phase de choix²².

S'agissant donc de *conception*, et non de *choix*, et l'objectif étant un ensemble de fonctions possibles, nous n'avons pas envisagé d'utiliser de méthodes multicritères classiques.

Le problème posé a été abordé davantage comme une optimisation ; même si, sauf cas particuliers, il n'existe pas une unique meilleure solution pour toutes les préférences possibles. Dans ce cadre, il est difficile d'envisager une approche analytique (définition d'une fonction de valeur), car le travail de traduction entre les attentes des experts et le modèle analytique serait très important, et le système serait peu compréhensible.

Il reste les méthodes réputées non convergentes, comme, par exemple, le recuit simulé, les algorithmes génétiques, ou l'utilisation de certaines classes de réseaux de neurones (réseaux récurrents), et enfin les SMARRPS. Conformément à un des objectifs de la thèse, nous nous sommes concentrés sur cette dernière méthode. Mais, d'autres options auraient pu être retenues de façon équivalente, au moins du point de vue des performances de recherche de solution.

5. Le système SMAALA - L

Le système SMAALA-L (Système Multi-Agents d'Aide à la Localisation d'Aménagements - Linéaires) a été développé en réponse au problème posé ci-dessus.

Les données sont les cartes de sensibilité et les contraintes topologiques et morphologiques de l'aménagement. Le paramètre déterminant est le système de pondération des critères. SMAALA recherche donc les fuseaux de moindre impact vérifiant les contraintes. L'impact est évalué point par point à partir des cartes de sensibilité et des pondérations. Par ailleurs, on doit considérer des cartes de pondérations descriptives des responsabilités territoriales des acteurs (un maire décide pour sa commune), qui constituent des cartes de systèmes de décision. SMAALA permet d'analyser la sensibilité d'une solution à la variation du paramètre, c'est à dire d'observer comment évolue la représentation spatiale des solutions en fonction d'un changement de point de vue de l'acteur. Enfin, par

²² Dans un espace discret, en faisant l'hypothèse de fuseaux « surjectifs » (pas de retours en arrière), le nombre de solutions (fuseaux) possibles est de l'ordre de $2 \times d^{larg/2}$ où d est la distance d'échantillonnage pour la contrainte de courbure (au minimum 2) et $larg$ la largeur de l'espace en pixels. Pour les problèmes traités, l'échantillonnage conduit à $larg=1000$, et donc à un nombre de fuseaux de l'ordre de 10^{150} .

exploration systématique des systèmes de pondération voisins, un fuseau dit « de moindre risque » est produit.

5.1. Analyse du choix technique

L'approche SMARRPS présente différents avantages :

- possibilité de résoudre des problèmes complexes spécifiés de façon hétérogène dans l'espace (à la fois pour les contraintes de forme et de localisation), et « laborieusement » résolubles par les méthodes quantitatives classiques ;
- simplicité et caractère direct et naturel des modèles descriptifs locaux utilisés, d'où facilitation de la construction partagée avec un utilisateur non informaticien ;
- performance des SMA par utilisation de processus parallèles ;
- souplesse et ouverture dans les modifications en cours d'analyse (ajout et retrait d'agents avec "reconvergence" automatique) ;
- isomorphie entre modèle fonctionnel décrit par l'expert et modèle conceptuel ;
- existence de boîtes à outil générique de résolution.

A l'inverse, on peut citer les difficultés propres à la spécification et au développement des SMA :

- sensibilité au choix de l'initialisation de la recherche de la solution qui conditionne l'exploration des espaces de solutions ;
- recours à la simulation du parallélisme sur machine séquentielle ;
- finesse de l'ajustement des paramètres de convergence pour parcourir l'espace tout en maintenant la stabilité ;
- important coût mémoire et CPU : l'algorithme est « glouton ».

5.2. Description de SMAALA-L

5.2.1 Fonctions

SMAALA ne remplace pas l'expert ; il l'assiste dans son interaction avec le décideur. Les cartes de sensibilité sont donc toujours produites « manuellement ». Elles sont numérisées et adaptées pour entrer dans SMAALA. L'utilisateur fixe aussi les contraintes morphologiques sur la structure du projet, et il donne le point de départ et d'arrivée de l'infrastructure, et un ensemble de pondération des critères. La fonction essentielle de SMAALA est alors de donner l'ensemble des fuseaux possibles à l'intérieur du territoire (cf. Figure 17 et Figure 26). Il peut aussi donner les fuseaux un par un. Il permet de tester des alternatives par rapport aux points de départ et d'arrivée. Enfin, il permet de tester la variation des fuseaux trouvés en fonction du système de pondération. Les fuseaux trouvés sont fournis avec une statistique sur leur impact par critère (diagramme d'impacts) et leur longueur (qui induit en particulier leur coût).

Mais l'intérêt principal du système semble résider dans les manipulations que l'on peut effectuer avec les jeux de pondération représentatif d'un acteur. Par exemple, on peut demander à SMAALA de trouver un ensemble de fuseaux possibles, puis modifier les pondérations. Ceci correspond à une situation de négociation où un acteur change de position. On peut alors observer les modifications spatiales induites, c'est à dire le changement dans la représentation du territoire par l'acteur. En poursuivant cette approche, on peut analyser la robustesse d'une solution à un changement de pondération ; c'est à dire qu'on peut ainsi évaluer l'acceptabilité multi-acteurs d'une solution. Dans une perspective de négociation, cette solution est la plus apte à constituer un compromis, puisqu'elle est la plus partagée dans les diverses représentations possibles de l'espace. Ceci correspond à ce que nous avons appelé « le fuseau de moindre risque ».

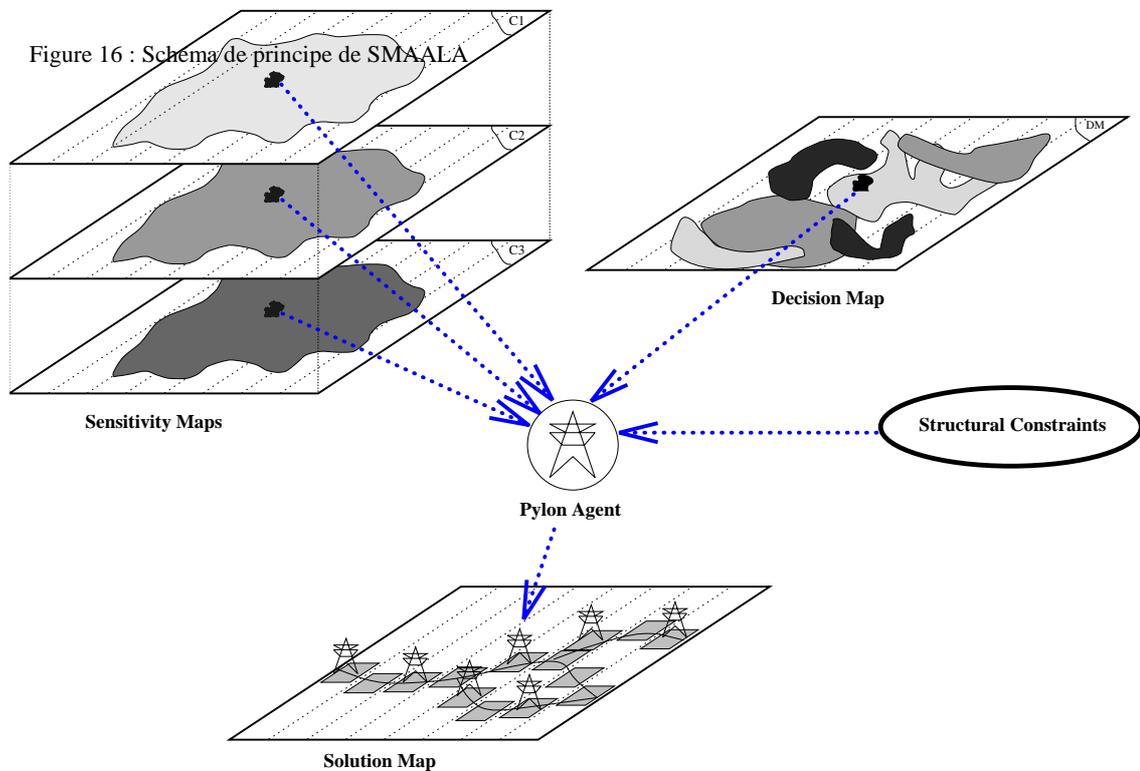
Dans l'approche retenue, qui cherche à aider l'expert à explorer les possibles options, il n'est pas question de fournir l'outil directement à un décideur. C'est l'expert qui, en fonction de sa représentation des points de vues des acteurs, introduit une pondération ou une carte de pondération, et teste cette hypothèse. Il n'y a pas de méthode prévue pour l'explicitation du système de préférence d'un acteur.

5.2.2 Principe de la recherche des fuseaux

Pour illustrer notre modèle nous introduisons la métaphore explicative suivante, fondée sur la recherche de fuseaux de moindre impact d'une ligne électrique dans un territoire. On dote les pylônes de la capacité de se déplacer, d'observer leur environnement et de raisonner. Par ailleurs, ils sont contraints par la ligne qui les relie. Ils cherchent chacun à minimiser leur impact. Ils vont donc « observer » autour d'eux et analyser vers où ils doivent aller pour réduire leur impact individuel. Mais, en même temps, tous les autres font de même, et ils se contraignent mutuellement via la ligne. L'ensemble de tous les pylônes forme un système dynamique qui va converger vers un certain attracteur correspondant à un fuseau de moindre impact. Si on résume le processus suivi par chaque pylône, il va successivement :

- *Evaluer son environnement*, c'est à dire déterminer son attracteur local, indépendamment des contraintes structurelles. Il calcule ainsi sa « position souhaitée ». Pour cela, il intègre les sensibilités sur son champ de perception, en pondérant par les valeurs de critères données en paramètres.
- *Evaluer la contrainte structurelle* qu'il subit, c'est à dire déterminer l'effet global que produit sur lui le reste de la ligne (tendance à le retenir ou à le tirer). De même que précédemment il s'agit d'une convolution avec un filtre dit « relationnel », descriptif de l'atténuation de l'effet des pylônes éloignés

- *Calculer son déplacement*, ce qui revient à composer l'effet de l'environnement avec l'effet des autres pylônes (contrainte environnementale et contrainte



structurelle) au moyen simple d'une sommation pondérée par une constante de stabilité relationnelle.

- *Evaluer sa stabilité* : en dessous d'un seuil de mouvement, le pylône se considère comme stable et ne se déplace pas. En particulier s'il oscille avec une amplitude faible, il se considère comme stable.

Si tous les pylônes sont stables, on considère que l'attracteur a été trouvé. Avec un tel système, il est suffisant de construire et initialiser le système pour obtenir une solution. Et les analyses de sensibilité sont directes par changement de pondération.

Le système de pondération, c'est à dire le modèle de décision de l'acteur considéré, intervient donc dans l'évaluation de l'environnement. Dans le cas où le système de décision n'est pas uniforme dans l'espace, le pylône prend en compte les pondérations du point où il se trouve.

5.2.3 Implantation

a. Première version : SMAALA-L v.0 (PC DOS)

Les cartes de sensibilité sont codées dans « l'environnement » des agents. Elles sont « géoréférencées » en priorité, c'est à dire que l'on a un « fibré » de dimension le nombre de critères : on accède par sa position à un élément de l'environnement qui contient toutes les informations pour ce point, donc toutes les valeurs de sensibilité. Ce modèle s'oppose à un empilement de cartes thématiques. Il permet de minimiser les accès lorsqu'un agent lit son voisinage. En revanche il est incompatible avec les modèles classiques de données « raster » dans les SIG.

ElementEnvir = {attributs}

Environnement = Carte (*index* spatial) x {ElementEnvir}

La trajectoire du fuseau est décomposée en un ensemble d'agents qui constituent le « groupe ». La structure étant linéaire, les agents sont simplement repérés structurellement par leur numéro dans la chaîne. Les points de départ et d'arrivée de la ligne sont supposés donnés aux bords verticaux (« est » et « ouest ») du territoire. Avec cette hypothèse, on convient que la ligne ne « revient pas en arrière ». Dès lors, on contraint chaque agent (« pylône ») à se maintenir dans une trame verticale (Nord - Sud) perpendiculaire à la direction générale de la ligne. Leur position spatiale est donc simplement donnée par leur latitude.

Agent = {numéro , latitude , fonctions}

Les agents évaluent d'abord tous leur état par rapport à l'environnement, puis tous leur position « sociale », et enfin ils changent tous d'état.

L'évaluation externe (par rapport à l'environnement) consiste à déterminer un déplacement (petit) tel que pour la nouvelle position l'impact soit réduit, en tenant compte de tous les critères et pour un voisinage fixé. En pratique, on peut soit déterminer un déplacement préféré pour chaque critère, puis les combiner ; soit combiner les critères, puis choisir le déplacement. Les agents devant « décider » seuls (il n'est pas envisageable que l'utilisateur aide les agents pour chaque déplacement) le processus doit donner un ordre strict sur les déplacements possibles. A cette échelle, on retient donc une simple intégration pondérée, qui combine les critères pour chaque point du voisinage, puis détermine le déplacement moyen (gradient). Le champ de perception de l'agent est une fraction de la trame verticale

qu'il occupe. La convolution avec le filtre de perception est réalisée sur ce voisinage. Le filtre de perception est directement spécifié par les valeurs d'atténuation. La valeur de la position souhaitée est déterminée par calcul direct du gradient d'impact.

Filtre de perception = {valeurs d'atténuation}

« **Répulsivité** » d'un point = somme pondérée des sensibilités en ce point

Déplacement externe = somme vectorielle, pondérée par le filtre de perception, des différences de répulsivité entre la position actuelle et les positions cible.

L'évaluation interne vise à déterminer l'effet des autres agents sur son propre déplacement. Il faut déterminer quels agents influencent, puis quelle est leur influence. Dans le cas ici présent, la structure linéaire impose le voisinage. Le champ de communication est donc un ensemble d'agents de cardinal fixé (« rayon » de communication) à droite et à gauche. L'effet structurel est calculé par sommation pondérée des déplacements souhaitées des voisins.

Filtre de communication : valeurs d'atténuation en fonction de l'éloignement des agents sur la ligne

Déplacement interne : somme pondérée des déplacements des voisins

Le déplacement effectif est la somme du déplacement du à l'environnement et du déplacement du aux autres agents, pondérée par un coefficient relationnel.

Déplacement effectif : déplacement externe + coeff. X déplacement interne

Pour des problèmes de stabilité, seulement une fraction du déplacement calculé est effectué à chaque pas.

La stabilité est évaluée par comparaison de la position effective et de la position actuelle, avant déplacement. Un seuil de stabilité est fixé (taille minimum de l'attracteur).

L'implantation de cette version de SMAALA étant monoprocesseur, le synchronisme doit être géré séquentiellement. Par conséquent le processus est :

Pour tous agents : Evalue Environnement
Pour tous agents : Evalue la Contrainte Structurelle
Pour tous agents : Evalue Position effective
Pour tous agents : Evalue Stabilité
Si tous agents stables : Fin.
Sinon : Pour tous agents instables : Bouge
Recommence.

b. Commentaires

1. Le fait que les agents ne se déplacent que sur l'axe « nord-sud » empêche de trouver des solutions « en S », ce qui est pourtant un cas possible dans des zones particulièrement contraintes (suivi de vallée). Par ailleurs, un agent qui est au « bord ouest » et à l'intérieur d'une zone contrainte doit logiquement se déplacer vers l'ouest pour en sortir. Par conséquent, la modification principale consiste à autoriser les déplacements dans toutes les directions. Mais ceci a beaucoup de conséquences :
 - Le coût d'évaluation du déplacement externe est alors de l'ordre du carré du rayon de perception. La rapidité de calcul en dépend.
 - Le maintien des contraintes structurelles doit être rendu explicite, alors que précédemment l'écart vertical entre deux positions successives suffisait à contrôler la courbure.
 - Il ne suffit plus de considérer les agents voisins sur la ligne. Il faut prendre en compte les agents voisins dans l'espace. Le problème, classique pour les SMA spatiaux, consiste alors à déterminer tous les agents en interaction. Le coût est en N^2 du nombre d'agents, avec une distance euclidienne à chaque calcul. Pour des « gros » SMAR, ce coût peut devenir très important. On peut y remédier en choisissant une indexation améliorée de la carte spatiale, en particulier une clé hiérarchique (« Quad-tree ») de Peano qui assure que deux agents d'indice voisins sont voisins dans l'espace.
 - Toujours du point de vue structurel, l'échantillonnage de la trajectoire n'est alors plus assuré. En effet, des agents peuvent se « concentrer » au bord des zones de contraintes, et laisser des parties de l'espace non couvertes. Il faut donc ajouter des contraintes de couverture, qui obligent les agents à s'écarter.
2. La succession des évaluations « externe » puis « interne » puis « effective », peut être remise en question. En effet, on peut préférer un calcul concurrent des différents effets, puis une évaluation générale. On peut aussi inverser le processus et déterminer d'abord l'effet structurel, puis le moduler en fonction de la contrainte environnementale.
3. Il n'y a pas d'ajustement des filtres. Les performances étant bonnes, et le système convergent, le besoin ne s'est pas fait sentir. Cependant, avec un déplacement dans

toutes les directions, on doit contrôler les interactions pour minimiser les calculs (voir chapitre 4 par. 4.5., p. 142)

4. Le mode de calcul de l'effet externe local est très discutable. Nous avons retenu la solution la plus simple, mais aussi la plus réductrice : la somme vectorielle des gradients de sensibilités pondérées. Tout d'abord, on peut préférer une fonction *Max* à une somme ; car alors on sélectionne la meilleure position, et non la meilleure « zone ». Mais le choix de la somme permet de s'affranchir des « trous » de sensibilité (petite zone « blanche » au milieu d'une contrainte forte) en « gommant » le bruit. On peut aussi préférer un *Max* pour les sensibilités, car peu importe pour un point qu'en moyenne sa sensibilité soit faible, si pour un des critères elle est très forte. En pratique, afin de gérer ce problème, on a quantifié les sensibilités de façon non linéaire : *faible* = 0, *moyenne* = 1, *forte* = 3, *très forte* = 6. A l'extrême, si on veut interdire les zones de sensibilité forte on leur donne un attribut quantitatif très important.

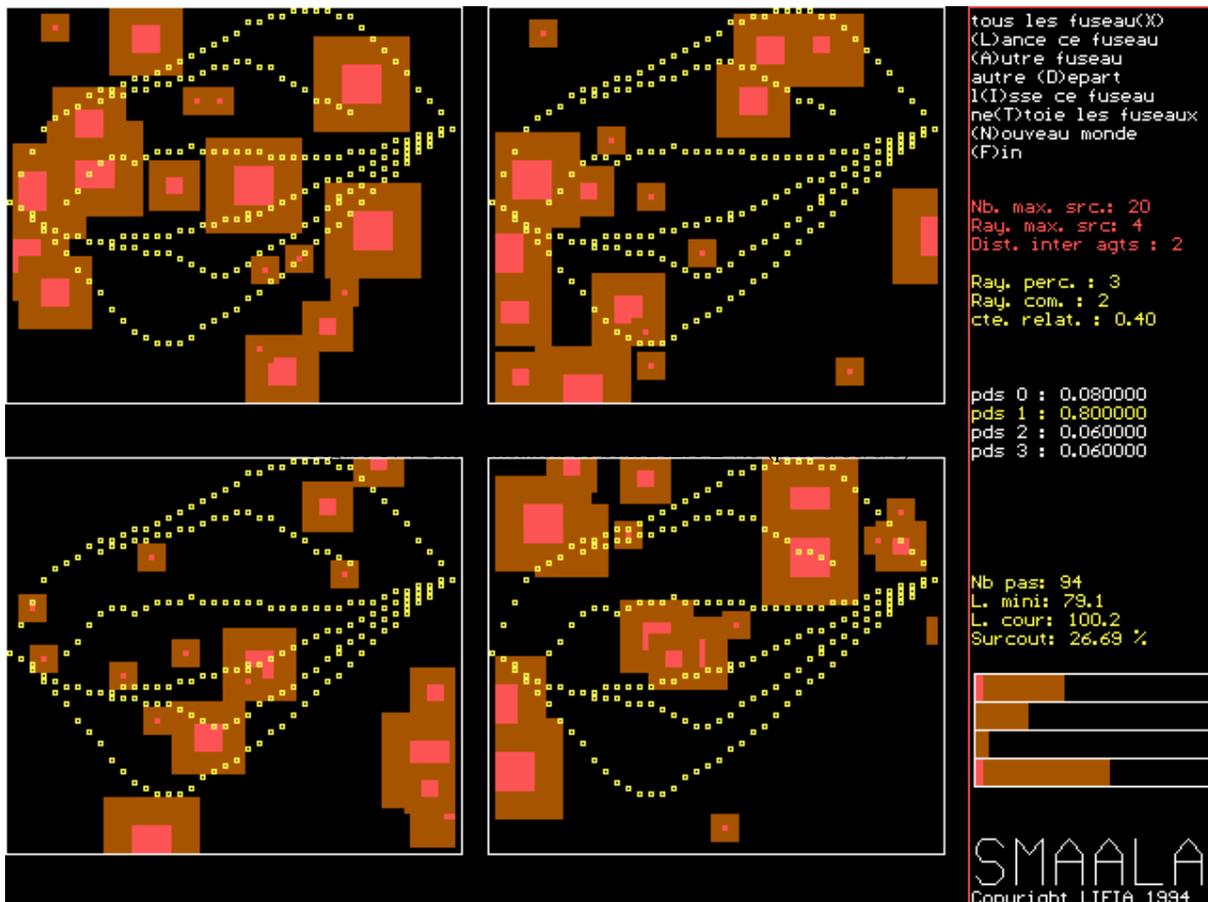
D'autre part, dans le modèle choisi, l'amplitude du déplacement est fonction de l'intensité de la sensibilité : on fuit « plus loin » une contrainte plus forte. Ceci est réaliste car alors on propage une information plus forte sur les autres agents, et on « indique » ainsi que cette zone est vraiment à éviter. Cependant, si on admet que les délimitations ont été bien faites par les experts, il est alors suffisant d'être juste au bord. En pratique, on limite l'amplitude des déplacements à chaque pas à « une case », et, de plus, dès qu'un agent est sur une zone « blanche » (aucune contrainte dans aucune dimension), il n'évalue plus de déplacement externe, ce qui traduit le fait qu'il n'a pas « besoin » de bouger.

4. A l'échelle de l'agent, on pourrait utiliser une méthode multicritères par surclassement pour déterminer un ordre partiel sur les positions du voisinage. Afin de choisir un déplacement, l'agent pourrait envisager d'utiliser les différentes « orientations » des agents voisins, au moyen d'un « vote » pondéré, ou simplement d'une moyenne. Nous n'avons pas essayé cette option.

5. Dans le schéma décrit, on ne fait pas apparaître explicitement les contraintes structurelles sous forme de rayon de courbure. La mise en cohérence interne se limite à maintenir des distances « raisonnables » entre agents voisins. Afin de raffiner, l'évaluation interne (morphologique) doit prendre en compte une contrainte d'alignement, continue, pour assurer la minimisation de la longueur globale, et une

contrainte de courbure, seulement « à la limite », qui interdit les courbures supérieures au rayon max. Pour respecter une contrainte de courbure, il faut prendre en compte un rayon de communication supérieur à 2, et en pratique beaucoup plus du fait qu'il y a plus d'agents que de pylônes effectifs.

- Après discussion avec les experts, il apparaît que, souvent, les sensibilités sont continues : par exemple la sensibilité « habitat » est très forte là où sont les maisons, mais elle décroît continûment avec la distance aux maisons. Le modèle qui prend en



compte des sensibilités discrètes peut facilement être adapté à ce type de problème.

c. Exemple d'utilisation

La première version de SMAALA-L a été écrite en C++ sur PC (Dos). Il s'agit d'une version « démonstrateur ». Pour simplifier la présentation, les cartes sont limitées à un échantillonnage grossier à 3 niveaux. On travaille ici avec 4 critères dont les poids respectifs sont donnés à droite : ici 8%, 80%, 6% et 6%. Les 4 « cartes » qui apparaissent représentent donc le même espace, mais « vu » selon quatre critères différents (numérotés

de 0 à 4 de gauche à droite et de haut en bas). En rouge, on a les zones de sensibilité forte, et en marron les sensibilités moyennes. L'histogramme donne pour chaque critère la distribution des impacts pour le dernier fuseau calculé. On a aussi une indication sur le surcoût du fuseau par rapport au fuseau « droit ». Divers autres paramètres contrôlent le système.

Les figures suivantes représentent différents résultats obtenus en faisant varier les pondérations des critères. Les quatre premières figures illustrent les solutions avec un critère très majoritaire, et donnent donc des solutions monodimensionnelles. On voit les variations dans les solutions obtenues. Chaque solution doit être lue en fonction de sa dimension majoritaire. On a ainsi un aperçu de ce que peut être la perception d'une proposition d'un acteur très focalisé sur un aspect, par un autre acteur focalisé sur un aspect très différent. Il y a peu de recouvrements.

Les deux dernières figures donnent des solutions intermédiaires et permettent de constater

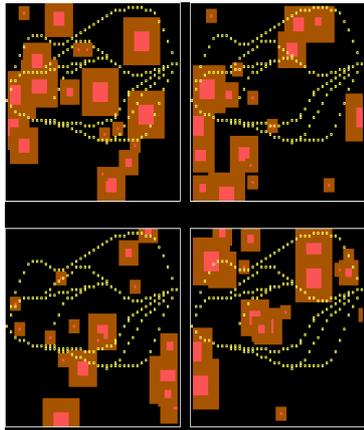


Figure 18 : SMAALA (80/8/6/6)

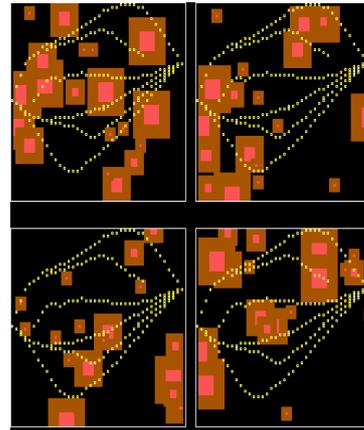


Figure 19: SMAALA (8/80/6/6)

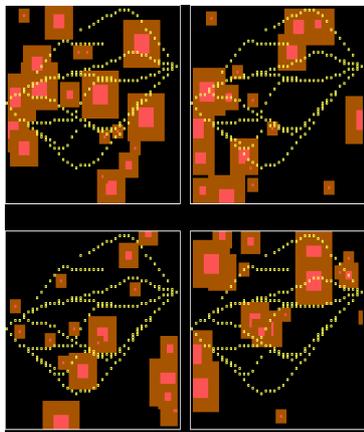


Figure 20: SMAALA (6/7/80/7)

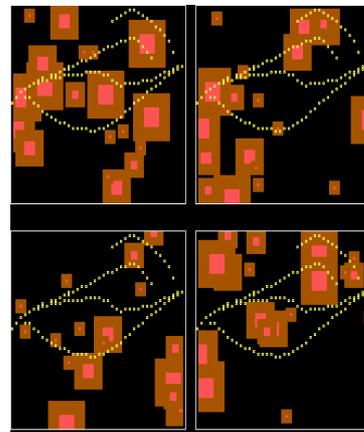


Figure 21: SMAALA (6/7/7/80)

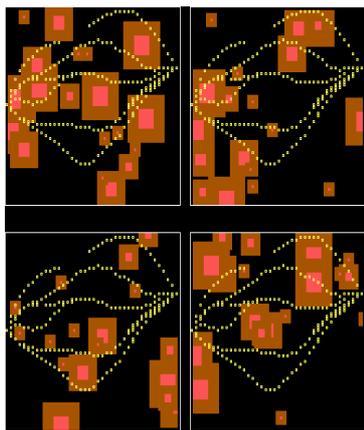


Figure 22: SMAALA (25/25/25/25)

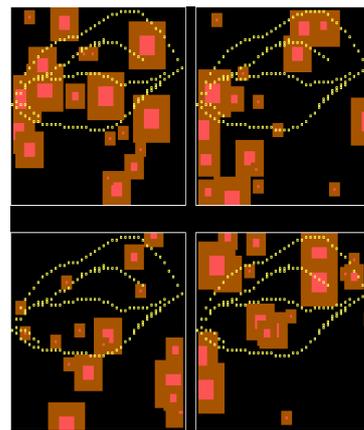


Figure 23: SMAALA (20/25/20/35)

ce que peut signifier en terme spatial un changement de point de vue d'un acteur (variation relative 20 % ici) : on voit que deux solutions ne sont plus acceptables.

Cette version de SMAALA-L est la plus explicite en terme de processus, car elle ne masque pas la recherche, et fait apparaître seulement les sensibilités. Elle est démonstrative, mais ne répond pas aux besoins directs des utilisateurs finaux.

d. Deuxième version : SMAALA-L v.1 (Unix)

La deuxième version de SMAALA, développée sous Unix, en environnement InterViews, reprend les éléments de la bibliothèque SMARRPS. Cette version, destinée à la recherche, ajoute essentiellement le passage à un déplacement toutes directions des agents. Elle introduit aussi l'adaptation des filtres. Par ailleurs, elle permet de travailler avec des fonds de carte réels, et assure la conversion depuis les saisies de cartes numérisisées.

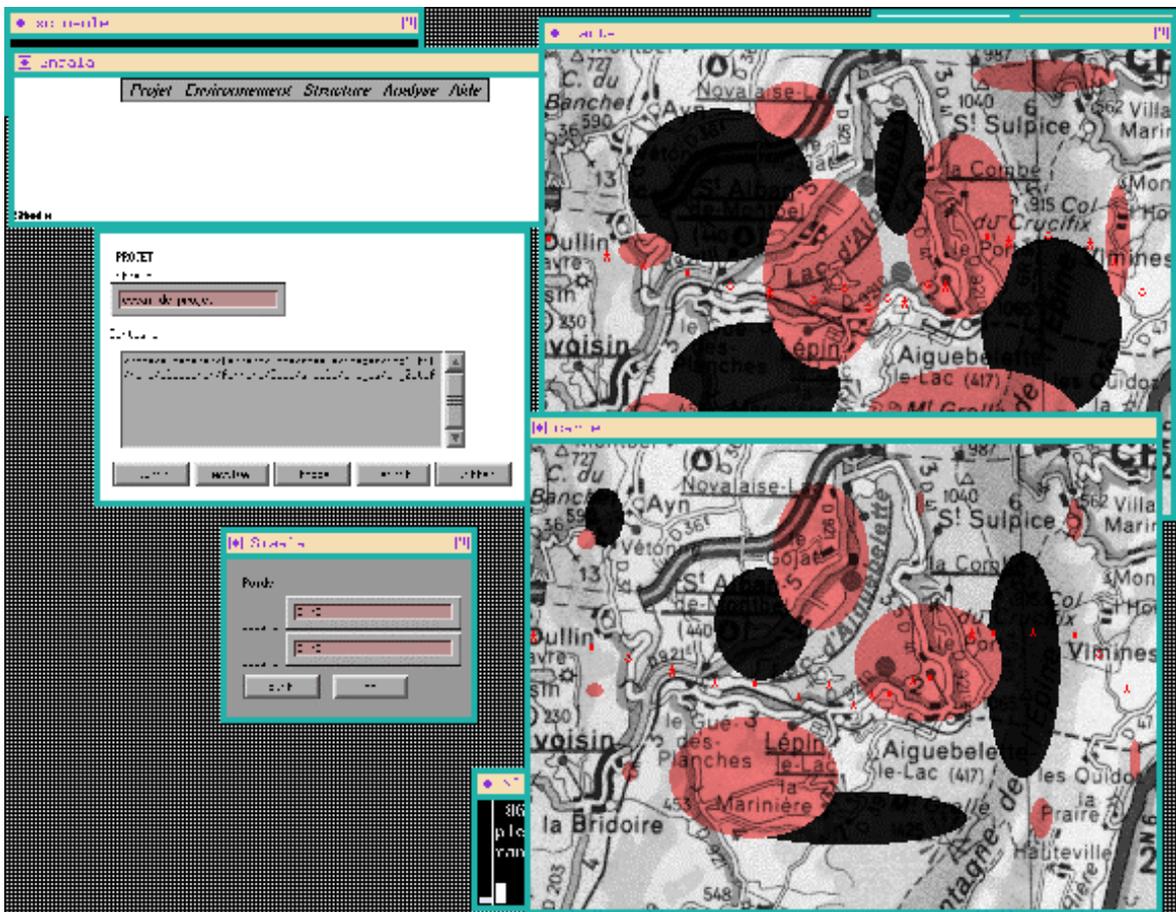


Figure 24 : SMAALA-L v.1 Copie d'écran

Le principe d'adaptation des filtres est relativement simple puisqu'il s'agit simplement d'étendre le rayon de perception quand aucune information discriminante n'est détectée

dans le voisinage. Le rayon de perception est ramené à une valeur minimale dès que l'agent se déplace.

Cette version de SMAALA, bien qu'elle ait été très longue à développer (absence d'outil de spécification graphique) n'a été que peu utilisée. Elle a en fait permis de préciser la version opérationnelle présentée ci-après.

e. Troisième version : SMAALA-L v.2 (Mac)

Cette version a été réalisée afin de servir réellement au sein de CERREP S.A. Du fait du parc antérieur, elle a été développée sur Macintosh, en environnement CodeWarrior. La plus grande part du codage a été réalisée lors d'un stage d'IUT par Pierric PERMEZEL.

Les spécifications avaient été affinées, puisqu'il s'agissait d'obtenir une version intégrée dans l'environnement Mac, ainsi que dans la chaîne de production de documents par le CERREP. On devait pouvoir partir d'une carte de sensibilité saisie numériquement sur un fond à partir d'un outil de dessin, l'intégrer dans le système, et le faire fonctionner sur cette base. Par ailleurs, cette version devait intégrer le minimum de paramètres calculatoires.

On trouve dans la Figure 25 un aperçu des différentes fenêtres du système. On notera que certaines fonctions ne sont pas encore mises en oeuvre dans la version actuelle (Calcul automatique de perturbations, statistiques élaborées, impression de rapport, couper-coller vers l'environnement Mac). Les fenêtres de recherche (cf. Figure 26) permettent directement de lancer le processus, et au besoin de fixer et déplacer des agents pour spécifier des contraintes locales. Dans la Figure 27, on a le résultat obtenu par la recherche des zones blanches, par simple sommation des sensibilités des différentes cartes.

Cette version de SMAALA-L répond globalement aux spécifications. Il reste cependant diverses améliorations à apporter. La plus importante étant la possibilité de spécifier les contraintes structurelles sous forme de rayons de courbure. Les utilisateurs ont aussi manifesté le besoin de pouvoir visualiser l'extension latérale des fuseaux, c'est à dire les zones du voisinage qui ont exactement la même sensibilité. Enfin, sur de « petits » ordinateurs Macintosh, les temps de calcul restent notables (quelques minutes), il faudrait apporter certaines optimisations de code pour accélérer la recherche, ou utiliser des processus légers.

Par ailleurs, on souhaiterait pouvoir intégrer cette version avec un SIG, et une chaîne cartographique.

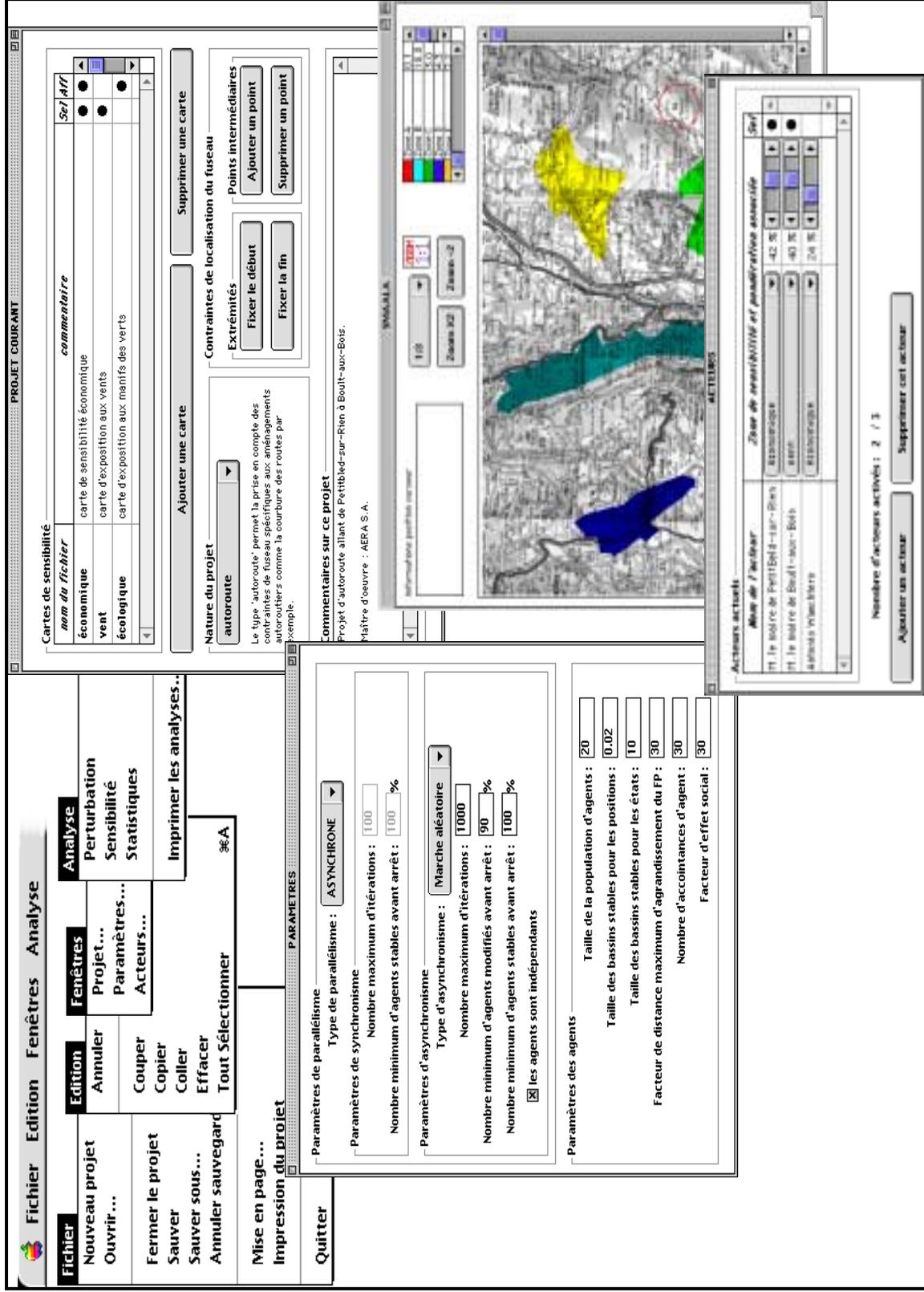


Figure 25 : Les fenêtres de SMAALA-L Mac

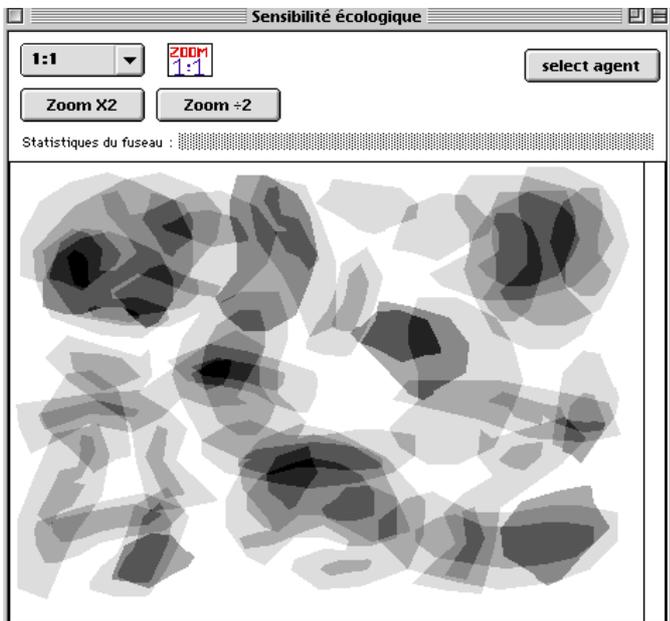
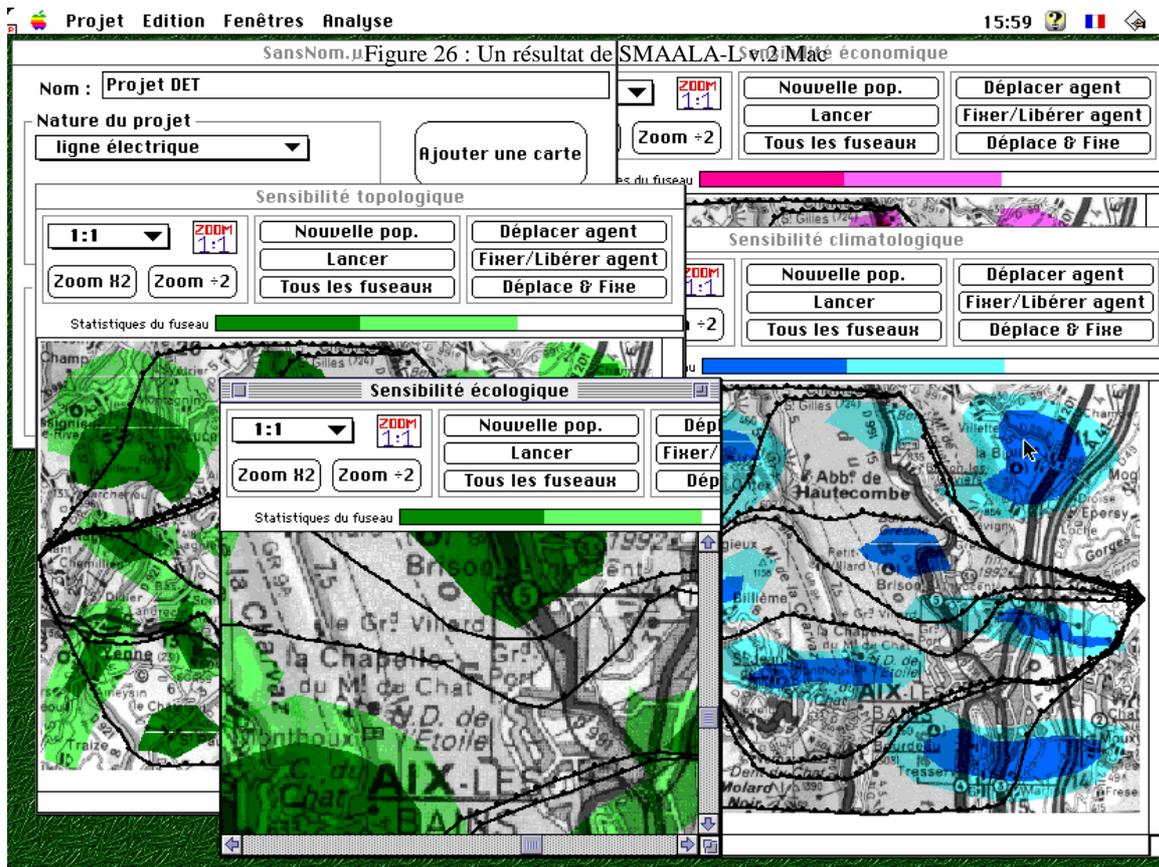


Figure 27 : Recherche des "zones blanches" dans SMAALA-L v.2

f. Quatrième version : SMAALA-L en Java

Afin de pouvoir intégrer un noyau SMAALA dans l'application SANPA d'aide à la négociation de projet en aménagement, nous avons engagé le portage de SMAALA en Java. Un prototype existe déjà, mais on se heurte à des problèmes de performance. Cette version reste à finaliser.

L'objectif final de la version Java serait de pouvoir l'utiliser en contexte distribué, avec différents acteurs qui introduirait leur proposition sous forme d'un groupe SMAALA dans un environnement partagé.

5.2.4 Scénarii d'utilisation et perspectives

Dans le système opérationnel complet, nous avons considéré quatre situations d'utilisation posant différentes questions auxquelles nous nous sommes efforcé de répondre avec les fonctionnalités complètes. Les scénarii sont les suivants :

1. *Je suis l'expert. J'ai cartographié les sensibilités. Où doit passer cette ligne électrique selon les trois points de vue représentés par les systèmes de pondération suivants (...) ?*
2. *Quelle est la sensibilité de chaque solution à un changement de point de vue ? Quelle est alors la solution de compromis ?*
3. *Je suis maire d'un village. Mais j'ai aussi une résidence secondaire ailleurs dans la zone. Ma position et mon autorité ne sont pas uniformes. Quelle est alors la meilleur solution si la décision est territorialisée ?*
4. *Il y a un grand nombre d'acteurs qui participent à la décision. et qui constituent donc un collectif pour la décision, avec un recouvrement des compétences et des territoires respectifs. Existe-t'il encore une solution ?*

Les scénarii 1, 2 et 3 sont réalisables avec les versions actuelles de SMAALA. La solution de compromis est obtenue par recouvrement des fuseaux calculés pour les différents systèmes de pondération. Pour réaliser le scénario 4, on envisage deux options :

- donner une carte de préséance des acteurs, permettant de combiner les cartes de décision individuelle en une unique carte, en fonction de la compétence de chacun pour les différents points de l'espace ; mais cette option ne tient pas compte du processus d'évolution des préférences d'acteurs ;
- intégrer SMAALA dans un système d'information, en maintenant une solution par acteur participant, et en permettant aux acteurs d'échanger autour de cette représentation de l'espace ; cette solution a été reprise dans SANPA (voir chapitre suivant).

Les autres perspectives sont :

- Un système de calcul systématique de la sensibilité d'une solution à un changement de point de vue : il faut itérer systématiquement la recherche au voisinage d'un système de pondération, et mesurer la variation de la solution. Afin de simplifier, on fait l'hypothèse que le point de vue change pour un seul critère, et que la répartition (la somme des critères étant normalisée à 1) se fait également sur tous les autres critères. Dans ce cas, on doit réaliser $2d$ recherches, où d est le nombre de critères.
- Un système intégré de calcul de compromis, c'est à dire de recouvrement de différentes solutions.

Plus généralement, et c'est une direction privilégiée pour l'approche SMARRPS, SMAALA pourrait être étendu vers les problèmes composites : recherches couplées de localisations pour des lignes et des postes, ou des routes de type variés. Pour ce faire, on spécifie des agents différenciés mais organisés entre eux. SMAALA pourrait aussi être utilisé pour des problèmes « zonaux », dans lesquels on cherche à déterminer des surfaces sous contrainte. Il faut alors modifier la frontière en tenant compte de ce qui est enclos.

Enfin, dans des conditions qui restent à déterminer, et sans doute en interaction avec l'expert, SMAALA pourrait être utilisé directement par le décideur afin de comprendre l'implication spatiale des positions qu'il peut choisir.

6. Conclusion

La validité de l'expertise s'appuie sur la certitude institutionnelle et administrative de sa capacité à produire une information consensuelle dans le contexte d'un projet spatial. Celle-ci doit donc être dépouillée de ses composants politiques, donc potentiellement conflictuels. Ce travail impose de disséquer les positions respectives de l'expert et du décideur dans le processus, et de procéder autant que possible à une démonstration des effets respectifs des intrants. L'outil informatique que nous proposons permet ainsi de montrer comment les représentations d'un projet spatial dépendent des acteurs. Dans une perspective de médiation, il facilite la perception par l'expert, et donc les opérateurs, des blocages potentiels, et permet de proposer une politique relationnelle que nous qualifions de « gestion des portes ouvertes », en choisissant de retenir dans les ensembles de choix les solutions les plus largement acceptables.

Au niveau technique, SMAALA n'apporte rien aux SIG pour leurs fonctions gestion de données et présentation. En revanche, il s'inscrit fondamentalement comme noyau d'un processus d'analyse et de décision autour d'un projet d'aménagement. Les mécanismes d'aide à la décision spatiale multi-critères, multi-acteurs, et localisée, qu'il met en oeuvre constituent la base de ce que pourrait être un système intégré d'information pour l'aide à la décision en aménagement.

Enfin, par rapport aux systèmes multi-agents réactifs, SMAALA montre comment ces systèmes peuvent être utilisés pour de vraies applications, ici dans le cas de la recherche de solutions à un problème multicritères continu. On espère aussi avoir ainsi ouvert la voie à un cadre général de modélisation spatiale selon une approche multi-agents réactifs.

Chapitre 7

Aide à la Négociation de Projets en Aménagement

Assistance et simulation pour la décision spatiale collaborative

1. Introduction

Dans cette partie, nous abordons plus spécifiquement l'aide à la négociation en aménagement du territoire. Nous présentons le système SANPA qui vise à faciliter ce type de négociation. Nous détaillons les différentes composantes du système, et en particulier l'architecture multi-agents.

1.1. Origine du projet

SANPA a été conçu à la suite de l'étude de faisabilité européenne GEOMED-F (Geographical Mediation System), dans laquelle on avait analysé les fonctionnalités requises pour l'assistance à des processus de négociation entre acteurs sur des projets d'aménagement. Le projet GEOMED s'était orienté dans une direction "coopérative", c'est à dire que les acteurs étaient supposés rechercher un optimum social. Or, dans la situation française, le modèle de décision collective est davantage conflictuel, chacun des acteurs recherchant plutôt sa propre satisfaction. On a donc été amené à modifier les propositions faites pour GEOMED, et à rechercher un mécanisme permettant de résoudre les conflits, plutôt qu'optimiser les solutions.

1.2. Objectifs

SANPA (Système d'Aide à la Négociation de Projets en Aménagements) doit faciliter la construction, l'échange et la confrontation de représentations spatiales partagées, c'est-à-dire permettre aux acteurs d'échanger des idées, opinions, attentes, autour d'un espace, et de produire ainsi des décisions.

Pratiquement, il s'agit donc d'un outil facilitant la négociation entre acteurs éventuellement distants (par opposition à une assistance aux réunions), souvent asynchrones (il n'y a pas de "temps" fixé pour la négociation), et peu contraints (chacun peut agir à sa guise, sans se

conformer à des cadres qui seraient imposés par l'extérieur). *A priori*, un tel système est peu adapté à une utilisation par des décideurs « importants » entre eux, il s'agit plutôt d'un espace de confrontation pour tous les acteurs qui ne participent pas au processus institutionnel de décision. Le système peut aussi servir de médiateur entre les décideurs finaux et les autres acteurs.

SANPA doit aussi permettre de démontrer certaines propriétés des systèmes multi-agents en tant que communauté d'assistance à un processus collaboratif humain.

2. Définition du problème

2.1. La négociation

Il s'agit de travailler sur la négociation de projets en aménagement. Globalement l'objet est donc de parvenir au choix collectif d'une localisation pour un aménagement. En complément on pourra évoquer un ensemble de mesures compensatoires, périphériques, ou d'habillage. On se référera à l'annexe spécifique sur la négociation pour plus de détails formels sur la négociation.

On retiendra simplement ici qu'une négociation peut se décomposer en un ensemble de phases successives ou concurrentes, correspondant à l'avancement du processus. Chaque phase aborde différents sujets. Chaque sujet est l'objet d'un échange de messages, organisés en schémas. Chaque message entre dans une catégorie dérivée de la classification des actes de langage [Searle, 1969] : question, réponse, proposition, acceptation, refus, insistance, modification, terminaison. Un schéma est alors un enchaînement classique de catégories : question puis réponse, affirmation puis réfutation, etc. On a donc une hiérarchie générale d'organisation du processus, du point de vue de la communication.

Phases
Sujets
Schémas
Messages

Figure 28: Décomposition d'une négociation

Le contexte qui nous intéresse a la propriété de dépendre de l'espace, c'est-à-dire que les arguments utilisés, les stratégies mises en œuvre,

3. Contexte scientifique du projet

Ce projet s'inscrit à l'interface de deux grands domaines : d'une part la Décision Spatiale Collaborative ("Cooperative Spatial Decision Making", CSDM), et d'autre part les communautés d'agents "assistants".

3.1. Décision Spatiale Collaborative

Le domaine de la décision spatiale collaborative (CSDM en anglais) est un champ très récent dans sa perspective instrumentale. Auparavant, de nombreux travaux ([Mermet, 1992], [Ruegg et al., 1992]) avaient déjà porté sur ce thème très pertinent dans tous les contextes publics ou privés de localisation d'aménagements, d'implantation ou de zonage, mais en se focalisant sur l'analyse des processus et leur description à des fins d'amélioration ou de formation. Ces recherches n'avaient pas abordé le support instrumental, et plus particulièrement informatique, que l'on peut apporter dans ces contextes.

Or on a assisté depuis quelques années au développement rapide du *Travail Collectif (ou Coopératif) Assisté par Ordinateur* (CSCW en anglais) [Easterbrook, 1992 ; Palmer & Fields, 1994], lié aux besoins fonctionnels des nouvelles organisations et à la mise à disposition d'outils pour la mise en forme, l'échange, et la publication de données et d'informations partagées ; dans cette dynamique ont aussi émergé des *Outils d'Aide à la Décision de Groupe* (GDSS en anglais) ou d'Aide à la Négociation [French, 1992], plus axés sur la gestion des argumentaires et la confrontation des positions d'acteurs. Par ailleurs, les *Systèmes d'Information Géographique* (SIG, ou Systèmes d'Information à Référence Spatiale, SIRS) [Laurini & Thompson, 1992], destinés à la gestion, le traitement et la présentation de données géoréférencées, deviennent omniprésents dans les organisations amenées à gérer des espaces, tout en ne répondant pas toujours à leurs attentes.

Dans ce contexte, différentes initiatives individuelles ou collectives ont été prises afin de rassembler ces deux champs pour répondre aux besoins potentiels de support informatique à la décision spatiale collective. Il faut en particulier relever l'initiative I17 du National Center for Geographical Information and Analysis (NCGIA). Cette programme incitatif, intitulé " Collaborative Spatial Decision Making ", a pour objectif " d'étendre le cadre conceptuel des Systèmes d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) afin d'aider des groupes de

décideurs à générer des solutions acceptables pour des problèmes spatiaux mal définis ” [NCGIA I17, 1996]. Les trois directions prises par ce programme sont : comment inclure de la connaissance dans les SADS pour assister les décideurs dans la formulation de solutions alternatives à leur problème, comment améliorer l'interaction des décideurs avec les outils d'analyse spatiale, et enfin comment fournir aux décideurs des procédures leur permettant d'évaluer différentes propositions. Dans ce cadre, parmi de nombreuses autres questions, il a été proposé de réfléchir sur les possibilités d'assistance ou de remplacement par des agents artificiels dans différentes situations ([NCGIA I17, 1996].

En résumé, les enjeux actuels de la décision spatiale collaborative sont de divers ordres [Golay, 1995]:

- Etude des processus de décision et de négociation spatiale
- Aide à la compréhension de problèmes et à la génération d'alternatives
- Problème de l'amplification des limitations et difficultés des SIG dans leur utilisation collective
- Approches théoriques : théorie de la décision, théorie de l'argumentation et de la dialectique, théorie de la structuration...
- Niveau de structuration imposé par le système, et type de participation
- Approches distantes via Internet ou autres réseaux
- Problèmes éthiques et politiques.

Et il semble que l'on soit très mal préparés pour y répondre, alors que les enjeux en terme de gestion collective de l'espace sont prégnants.

3.2. Communautés d'agents assistants

Avec l'expansion du réseau Internet et en particulier du World Wide Web (WWW) d'une part, et d'autre part des travaux sur les IHS (Interfaces Homme-Système) dans un cadre de TCAO, le concept initial d'agent inscrit dans un processus collectif a été repris et modifié afin de fournir à des utilisateurs humains des services personnalisés d'accès et de manipulation de l'information, qui bien qu'encore appelés agents, ont parfois perdu la dimension collective de résolution “ multi-agents ”. Ces agents dits “ assistants ” peuvent cependant, dans leurs évolutions les plus avancées dédiées au travail coopératif ou à la discussion, avoir à collaborer à la fois avec des utilisateurs humains et d'autres agents artificiels. Les apports de l'IAD sont alors pertinents.

Les agents assistants qui nous intéressent peuvent être de deux types : soit personnalisés, soit indépendants. Les Agents Assistants Personnalisés (AAP) sont attachés à un utilisateur particulier dont ils “ connaissent ” les caractéristiques et intérêts, et vont soit le représenter lors d'interactions soit l'aider à rechercher, organiser et produire des informations qui le satisfassent. Ils constituent ainsi en quelque sorte des “ secrétaires virtuelles ” le déchargeant de diverses tâches. Un exemple classique est l'AAP gestionnaire de courrier électronique [Lashkari et al., 1994]. Les Agents Assistants Indépendants (AAI) ne sont pas dédiés à un utilisateur particulier ; ils assurent des fonctions dans le système en répondant à des requêtes émises soit par des utilisateurs soit par d'autres agents. En fonction de leurs tâches ils peuvent déléguer à d'autres, appeler à l'aide, ou bien encore migrer sur les réseaux. Leur vocation et granularité peuvent être très variables, mais avec toujours des capacités d'interaction interne (entre agents) et externe (vers l'utilisateur et les données). Ces AAI sont construits pour un système (cas des AAI sur le Web), ou pour un contexte et une application (AAI pour le CSCW).

AAI et AAP sont par nature adaptés à la décision collaborative, puisqu'ils satisfont les contraintes de distribution, d'adaptabilité et de communication ; on est donc fondés à proposer une intégration.

4. Projet de référence

On poursuit ici la référence au projet linéaire de type ligne THT déjà abordé, et qui concerne une zone 200 km par 100 km, avec une centaine d'acteurs importants, dont une dizaine de décideurs participants à toutes les réunions.

4.1. Phases concertées du projet

On considère le cas d'un APS (Avant Projet Sommaire) visant à la définition grossière d'un projet (zone de passage approchée à 1km). Les acteurs principaux de la négociation sont EDF (avec différents représentants, l'état (différentes agences), les collectivités, des associations, des individus, des experts.

Figure 29 : Les phases de la négociation d'un projet de ligne THT

Phase 1 : Introduction du projet, justification globale, perspectives
 Phase 2 : Définition de l'aire d'étude
 Phase 3 : Validation des enjeux
 Phase 4 : Validation des sensibilités
 Phase 5 : Choix des fuseaux possibles
 Phase 5.1 : Proposition par les acteurs
 Phase 5.2 : Discussion par les acteurs, modification
 Phase 5.3 : Validation des fuseaux
 Phase 6 : Choix d'un fuseau et précisions sur un tracé
 Phase 6.1 : Discussion par les acteurs, modification
 Phase 6.2 : Validation des fuseaux
 Phase 7 : Rapport - Publication
 Phase 8 : Enquête - Consultation
 Phase 9 : Confrontation - Recours
 Phase 10 : Décision

Le projet suivant est alors la définition précise du tracé à une autre échelle (et qui peut éventuellement rentrer dans le même projet avec des sous-phases).

Chaque phase peut aborder différents *sujets* ; par exemple :

- Figure 30 : Exemples de sujets abordés en fonction de la phase (1 → 5) d'une négociation de ligne THT
- Ph 1 : Historique (la ligne THT précédente) , justification et équilibre énergétique (pourquoi pas une centrale localement ? pourquoi pas une ligne souterraine ?), choix des participants (quel type de procédure administrative ? est-on prêts ?), enjeux politiques ou économiques externes (on va relier l'étranger avec ça ?)
 - Ph 2 : Coût max. acceptable, passage en bord de mer, les montagnes, les zones militaires, les parcs naturels, contraintes géomorphologiques
 - Ph 3 : Pourquoi ne pas séparer agriculture et forêt ? Quid des sports aériens ? précision de l'analyse ? références scientifiques ? et les monuments historiques / quelles contraintes réglementaires ?
 - Ph 4 : pas de sensibilité écologique ?, comment choisir , argumentaire pour telles ou telles valeurs ? dynamique des sensibilités ? réductibilités prises en compte ?
 - Ph 5.1 : les propositions des différents acteurs, quels acteurs sont oubliés, position des experts, quel choix est unanime
 - Ph 5.2 : positions extrêmes, écolos, mesures compensatoires possibles, substitution de lignes, coût
 - Ph 5.3 : et si... ? Et ne peut on en garder plus ?

Chaque sujet abordé donne lieu à un échange de messages organisés selon un certain schéma.

5. Contraintes fonctionnelles

Les contraintes fonctionnelles qu'il faut prendre en compte sont :

- **Assurer la cohérence spatiale** : les assertions des acteurs ont des implications spatiales dont il faut illustrer la portée et contrôler les éventuelles incohérences.

- **Maintenir dans le temps un projet avec ses acteurs et événements** : les négociations qui nous intéressent ont des durées souvent très longues, et la préservation des acquis et de l'historique est un enjeu majeur.
- **Gérer les accès de tous à différents niveaux** : la question de l'accessibilité et de la consultation du public est un enjeu majeur des systèmes actuels de négociation ouverte, cependant les accès doivent être gérés, car toutes les informations ne sont pas publiables pour tous.
- **Réutiliser et Echanger** : SANPA doit s'inscrire dans un contexte de systèmes déjà existants, de standards de fait, et de plus pouvoir échanger avec l'ensemble des autres outils disponibles.
- **Produire un système utilisable...** : qu'il corresponde à un besoin et puisse être utilisé par n'importe quel utilisateur, quelles que soit ses compétences et intérêts.

6. Besoins à satisfaire

Conformément au cadre décrit dans le premier chapitre ce document, à terme on souhaite satisfaire les besoins divers identifiés dans l'analyse de l'aide à la décision :

- Accès à l'information
- Analyse et Aide à la Décision
- Médiation et Aide à la Négociation
- Publication et Communication
- Intégration

Si on envisage ces besoins dans un cadre général d'analyse, on obtient le détail donné dans la Figure 33. Cette proposition n'est pas un plan de contenu pour la version recherche de SANPA, qui ne peut pas répondre à tous ces besoins dans un premier temps. Il s'agit d'une analyse du contexte d'intégration à partir duquel il faut raisonner. Nous avons souligné les sous-parties qui sont effectivement couvertes.

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Accès à l'information<ul style="list-style-type: none">• Accès facilité, incluant répertoires, index, mises à jour, outils de recherche• Informations multimédias, avec images, films, sons et cartes• Informations légales avec aide contextuelle• Statistiques avec présentation facilitée sur des cartes | <ul style="list-style-type: none">• Recours à des outils classiques (MINITEL)• Requêtes spatiales et recueil de données géoréférencées• Croisement et mise à jour de Bases de Données à partir de programmes de surveillance• <u>Accès à des références antérieures</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fourniture intelligente d'informations dédiées (recherche Web avec apprentissage) • Analyse et Aide à la Décision <ul style="list-style-type: none"> • Aide aux études d'impact • Simulation de projets • <u>Génération d'alternatives</u> • <u>Facilitation de la participation des acteurs</u> • Assistance légale, jurisprudence • Evaluation de coût • Expertise techniques • Gestion de projets • Assistance procédurale • Aide au classement de projets • Aide à la Décision Multi-Critères • Assurance qualité • Médiation et Aide à la Négociation <ul style="list-style-type: none"> • Gestion de documents et d'éléments pour la négociation • <u>Gestion des positions antérieures et des argumentaires des acteurs</u> • <u>Explicitation des positions</u> • <u>Annuaire des participants</u> • Etude de l'effet d'une proposition • Justification de décisions ou positions • <u>Echange de propositions spatiales</u> • <u>Aide à l'argumentaire</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Support à la participation citoyenne • Formation des acteurs • Publication et Communication <ul style="list-style-type: none"> • Réalisation de documents de communication, minutes et rapports • Présentation du projet à différentes échelles et points de vue à partir de cartes et images • Justification (explication) • Rapport de négociation • Documentation officielle • <u>Diffusion large au public</u> • Ciblage de la communication • Intégration <ul style="list-style-type: none"> <i>Externe :</i> <ul style="list-style-type: none"> • Conformité aux standards • Accès aux bases de données existantes • <u>Poursuite de Systèmes d'Information antérieurs</u> • Recours à des agents externes <i>Interne :</i> <ul style="list-style-type: none"> • Echange entre fonctions • Propagation de modifications • Maintien de la cohérence • Ajout / retrait fonctionnels • Activation des différentes fonctions |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figure 31 : Les fonctions projetées pour un système intégré d'aide à la négociation en aménagement

7. Les fonctions dans SANPA

Le tableau de la Figure 32 donne les fonctions intégrées effectivement dans SANPA.

Figure 32 : Les fonctions dans SANPA	i. Messagerie Envoi, réception, validation, acceptation des messages
	ii. Cohérence Contrôle de la cohérence spatiale, contrôle de la validité grammaticale des messages, contrôle des protocoles, des sujets
	iii. Assistance pour la construction de positions Aide à l'identification de positions clés, suivi de protocoles, gestion des acteurs, gestion des marges de manœuvre
	iv. Gestion de l'historique Maintien et recherche dans la succession des messages, ainsi que les entrées et sorties de participants
	v. Gestion des participants Contrôle des droits, fourniture de l'infrastructure SANPA, contrôle des messages échangés, accueil, rejet, de participants.
	vi. Information Recherche et structuration de l'information
	vii. Simulation <ul style="list-style-type: none"> • Simulation de processus spatiaux • Simulation de négociations
	viii. Observation / Généralisation Analyse des comportements des utilisateurs et construction de règles comportementales. Proposition de ces règles et validation.
	ix. Propositions / formation Utilisation des stratégies et registres afin de produire des propositions , et éventuellement former les utilisateurs.

8. Principes directeurs

La conception de SANPA obéit à un ensemble de principes directeurs qui doivent constituer un cadre de travail, ou une "éthique" du développement. En voici les grandes lignes :

i. Transparence

Un utilisateur du système doit pouvoir accéder à tout ce qui lui légalement possible, en terme d'information ou de processus. Si le système réalise automatiquement des opérations, il doit en informer l'utilisateur, ou au moins en conserver une trace.

ii. Contingence

L'information en environnement et aménagement est largement dépendante de son contexte d'utilisation et de la finalité des systèmes d'information qui sont mis en œuvre. En particulier, dans les contextes de négociation, ce sont les représentations qu'utilisent les acteurs, et non les informations elles-mêmes, qui sont pertinentes.

iii. Controlabilité

Un acteur doit pouvoir à tout moment arrêter le système, ou au moins reprendre intégralement la main. Par ailleurs, on doit éviter des processus longs qui laisseraient objectivement l'utilisateur "hors de la boucle".

iv. Fiabilité

La "co-utilisation" d'un système par un ensemble d'acteurs renforce les exigences de fiabilité, dans la mesure où les traces de processus collectifs sont très volatiles et difficiles à reproduire. Par ailleurs, l'ouverture du système le rend plus sensible, car plus accessible à des registres de perturbations et d'erreurs variés.

v. Accessibilité

Un système qui traite de la décision relative à un aménagement concernant une grande population se doit d'être ouvert, pas forcément afin que tous décident, mais au moins pour que tous soient au courant²³.

vi. Distribution

La centralisation n'a pas de sens dans un contexte où les acteurs eux-mêmes sont distants, et où donc le support matériel n'est pas localisé. Par ailleurs, l'indépendance des acteurs fait qu'ils peuvent, à juste titre, souhaiter que leurs agents assistants restent "chez eux". Enfin la fiabilité passe aussi par la distribution.

vii. Adaptation

Afin de permettre de satisfaire les exigences précédentes, SANPA doit être évolutif et adaptatif. Cela signifie en particulier que l'on pourra utiliser la pratique même des acteurs comme fondement pour une amélioration du système. Cela suppose des capacités d'apprentissage et des facultés de reconfiguration.

9. Conception et approche multi-agents dans SANPA

Il existe une forte proximité entre les travaux sur les systèmes multi-agents et les travaux sur les processus collaboratifs et le TCAO (Travail Coopératif Assisté par ordinateur - « CSCW »). Nous nous inscrivons ici dans cette tendance, et nous allons nous efforcer de

²³ Il reste qu'un processus démocratique pragmatique ne peut ouvrir toute l'information à tout le monde.

montrer comment on peut concevoir et utiliser un SMA pour l'aide à la négociation de projets en aménagements.

9.1. Justification de l'approche multi-agents

Le recours à un système multi-agents se justifie d'abord par l'analogie existante entre le processus « multi-acteurs » et le système « multi-agents ». Mais il n'y pas bijection car chaque acteur va être « équipé » au besoin par plusieurs agents, et certains agent peuvent être partagés.

La motivation fondamentale est plutôt liée aux propriétés de flexibilité, d'adaptation, et à l'apport potentiel des organisations d'agents en tant que support d'une plus value informationnelle [Lashkari *et al.*, 1994 ; Koning *et al.*, 1995]. Inversement cette application nous paraît être un support très intéressant pour démontrer un ensemble de propriétés des SMA.

Par ailleurs, l'existence d'une dimension spatiale nous permet d'introduire une organisation mixte avec des agents plutôt cognitifs pour gérer l'ensemble de la discussion, et une couche réactive pour gérer l'information spatiale et sa cohérence.

9.2. La problématique multi-agents

La problématique multi-agents est assez complexe. En effet, alors que dans les systèmes multi-agents classiques, la composante sociale et les modèles afférents portent sur les agents eux-mêmes ; ici, du fait de la finalité d'assistance à un processus social humain, les agents vont manipuler deux types de représentations sociales distinguées mais interdépendantes : un modèle de la société d'agents, et un modèle de la société d'acteurs. Par ailleurs, ils doivent aussi avoir les modèles individuels classiques : modèle de l'utilisateur, et modèles d'acointances. On retrouve ici les stratégies sociales classiques du multi-agents, mais en plus leur objet même est un processus social.

On a donc différents problèmes :

1. Qu'est ce que le multi-agents peut apporter par rapport à une approche client - serveur classique ? Quelle est « l'action sociale » des agents ?
2. Quelle est la structure sociale, l'organisation, et son évolution en fonction du but du SMA ?

3. Quel modèle d'acteur est utilisé ?
4. Quel modèle de négociation et de processus social est utilisé ?

On prendra garde par la suite à bien montrer ce qui « est multi-agents », par opposition à ce qui relève des interfaces, de la recherche d'information, de l'analyse de texte, etc. En bref, par opposition à ce qui « n'est qu'agent ».

En terme de conception, on notera qu'on est dans un cadre fermé. On suppose ici que le système n'est ouvert qu'à des agents spécifiquement conçus pour lui. La seule ouverture éventuelle réside dans le recours à des agents informationnels externes selon les besoins. Ceci n'est pas détaillé ici.

Par ailleurs, on est dans une situation particulière puisqu'il y a une communauté d'utilisateurs et non un unique utilisateur.

9.3. La structure VOYELLES

Nous allons décrire SANPA conformément au modèle VOYELLES présenté dans le chapitre 2.

9.3.1 L'Utilisateur

- Un ensemble d'individus dont l'organisation et la communication est la finalité du projet.

9.3.2 L'Environnement

L'environnement du SMA est constitué par ce qui est fixe ou « balistique » pour le SMA durant son activation :

- Les données générales sur le projet (cartes, Bases de Données spatiales, données structurelles, liste des participants, informations techniques)
- Le reste des informations accessibles dans le monde (WWW)

9.3.3 Les Agents

Après analyse, il apparaît que chaque acteur a des besoins spécifiques et des informations en propre. On va donc lui associer un « pool » d'assistance qui lui appartient. Par ailleurs, il existe un ensemble d'informations partagées, non sujettes à interprétation, et dont

l'intégrité dans le temps est une des contraintes. Il y a donc une structure indépendante des acteurs qui doit gérer ces données et processus. On a donc globalement deux types principaux d'agents :

- les **Agents Assistants (AA)**, attachés à un acteur,
- l'**Agent Projet (AP)**, indépendant des acteurs, et qui gère le projet, maintient la cohérence, coordonne l'ensemble.

On ne précise pas ici si ces agents sont eux mêmes constitués par un groupe d'agents subordonnés ou tout autre structure interne. En particulier une approche raisonnable serait de considérer que l'AP est en fait un « Tableau Noir » un peu complexe.

Par ailleurs, la gestion des informations spatiales va être assurée selon le modèle SMARRPS. On envisage donc un noyau SMAALA, constitué d'agents réactifs, et attaché aux données spatiales. Un tel noyau est utilisé par l'AP à des fins de maintien de cohérence, mais d'autres noyaux SMAALA peuvent aussi être utilisés par les « pools » AA à des fins d'analyse spatiale individuelle. On a donc deux autres types d'agents :

- les **Agents SMAALA (AS)**, gestionnaires de noyaux SMAALA,
- les **Agents « objets géographiques » (GéOA)**, de type réactifs, et utilisés par les AS.

9.3.4 Les Interactions

Les messages entre agents constituent les interactions principales et sont supportés par le langage d'interaction instrumenté par Pierre FERRENT au sein d'ILAPI.

Les GéOA interagissent entre eux sur le mode classique de SMARRPS. Ils sont contrôlés par les AS.

9.3.5 Les Organisations

On n'évoque pas ici l'organisation des GÉOA déjà décrite pour SMARRPS et SMAALA. Les AS sont supposés « encadrer » tous les GÉOA.

L'organisation structurelle est donnée dans la Figure 33. La « BDOS » est la Base de Données d'Objets Spatiaux, qui alimente le processus. Les « AI » sont les interfaces du système. Globalement on voit que l'AP est un tronc commun pour tous les échanges. La raison de ce choix est que le projet doit être maintenu globalement et que l'AP doit être une garantie pour le suivi et les publications ultérieures. L'alternative serait de distribuer les fonctions de l'AP. Mais du point de vue de la sécurité du projet, on est alors un peu désarmé.

Les AS sont organisés en sous réseau spécifique permettant à l'AS de l'AP de rassembler

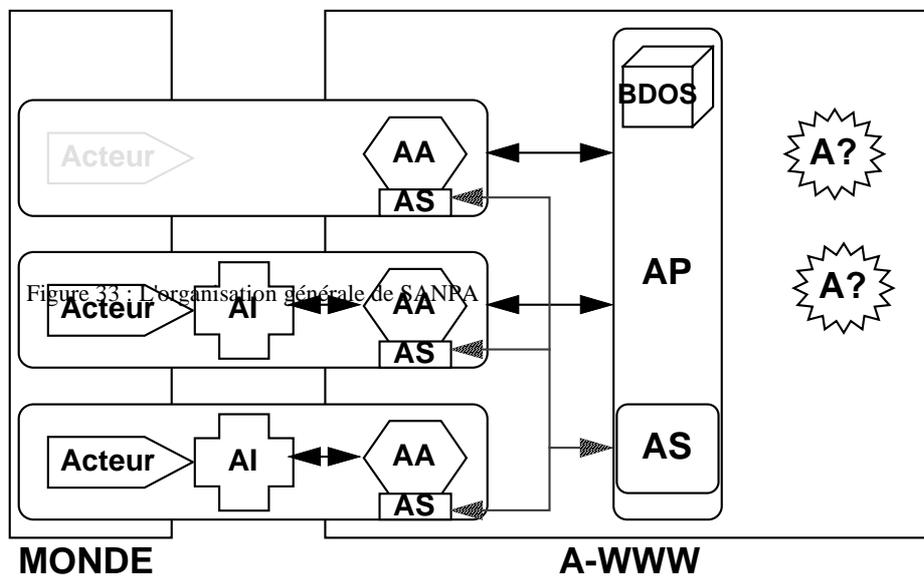


Figure 33 : L'organisation générale de SANPA

les différentes options proposées par les acteurs.

On notera la présence éventuelle d'agents non identifiés *a priori* et prestataires de services « externes ». On voit aussi qu'un AA peut agir dans le processus en l'absence d'acteur le commandant. Il joue alors un rôle de représentant. Un couple (Acteur , AA) peut aussi participer tout en étant déconnecté du processus pour des raisons physiques. Sa présence reste validée par l'AP.

9.4. Scénario d'utilisation

9.4.1 Création du projet

A la création d'un projet, un acteur utilise son agent assistant. Celui-ci fait appel au créateur de projet. On génère donc un agent projet qui prend la main pour ce projet. Cet agent est *a priori* localisé sur la machine du créateur, mais il peut aussi être ailleurs selon les accréditations. On renseigne alors les différents champs d'information sur le projet pour pouvoir démarrer. Le créateur du projet peut spécifier une liste de participants. Ceux-ci sont alors contactés automatiquement par courrier électronique par l'AP. S'ils acceptent de participer, l'AP vérifie qu'ils disposent d'un environnement SANPA (AA, AS), et au besoin le leur fournit. Dès ce moment leurs AA sont activés. En réalité dès qu'au moins un autre acteur est présent, l'AP peut commencer à travailler en mode standard et gérer des communications et des échanges. Cependant il continue la procédure d'accueil d'acteurs. On est donc dans l'état où le projet est chargé avec un ensemble de cartes et données de base, l'historique a démarré puisque les échanges d'accueil sont déjà enregistrés. Par contre, aucune phase n'a démarré.

Les acteurs doivent informer leurs AA de leur état par rapport à un projet : acteur actif ou non. Une « réunion » a lieu quand plusieurs acteurs sont actifs en même temps. Une réunion peut donc durer plusieurs jours en continu. Cependant l'AP doit exiger des AA qu'ils désactivent leur acteur automatiquement au bout d'un certain temps d'inactivité : pas de messages, pas de recherche, pas d'analyse, pas d'interaction AA / Acteur.

Lors du premier contact un agenda est fixé et en particulier une date de première réunion, c'est à dire donc de début d'activité pour au moins une sous-partie des acteurs.

9.4.2 Actions d'un acteur

Un acteur X s'intéresse à un projet dans son environnement.

Tout d'abord il va identifier la localisation de l'agent projet, en effectuant une recherche Internet. Pour cela, deux solutions : soit il utilise un glaneur classique et recherche à partir de mots clés (projet, SANPA, TGV, Troufigny-les-Oies), et il obtient alors l'adresse d'une page façade de l'agent projet. Cette page doit inclure un mécanisme de requête d'entrée dans lequel l'AP se renseigne sur X (formulaire) ; soit il utilise son agent assistant (AA)

déjà activé et lui demande directement de repérer le projet l'intéressant au sein d'une liste maintenue à différents endroits. Cela suppose que chaque nouveau projet se déclare automatiquement à ces listes. Du fait du nombre limité de projets possibles, cela reste raisonnable. Une telle liste peut être stockée en un site "entrepôt".

Une fois l'AP localisé, l'acteur X va effectuer avec son AA toutes les démarches nécessaires pour intégrer le projet (identification, chargement des informations localisées). Il se retrouve donc intégré au projet. Son AA devient alors intégralement actif et se met en veille sur ce projet.

Lorsque X veut travailler sur le projet, il réactive son AA. Celui-ci apparaît dans sa fenêtre. Il évoque aussi la FP qui inclut l'historique des messages.

Les messages ont une forme particulière incluant un ensemble de champs standards, proches des modèles de courrier électronique, plus des champs spécifiques à la négociation. Le contenu du message est structuré au moyen d'une grammaire spécifique dérivée d'HTML, et incluant des champs actifs dédiés (Voir le détail en annexe).

Les nouveaux messages doivent apparaître en "distingué" des autres. L'AA doit aussi fournir le mécanisme de sélection des messages en fonction du calcul des priorités. Soit alors un indice de priorité apparaît en colonne dans l'historique, soit l'AA a une fonction simple qui donne le "message suivant".

X lit le message qu'il veut, et donc la fenêtre message correspondante s'affiche. Ce message a en fait déjà été lu par l'AA qui a procédé à la préparation des enrichissements éventuels pour les différents champs. A chaque fois que X va sélectionner un élément du message, l'AA donne les informations afférentes, ou au moins propose une liste des enrichissements disponibles. X peut alors répondre au message.

L'AA remplit préalablement un ensemble de champs en fonction du contexte : une réponse est déjà préparée pour les destinataires, sujet, éventuellement type. Par ailleurs, tous les objets qui ont été manipulés récemment sont disponibles pour intégration. Le mécanisme d'intégration idéal serait un "drag & drop" uniforme où on prendrait par exemple un objet géographique que l'on pourrait tirer vers le champs contenu du message.

X précise ce qui ne l'est pas encore, en particulier il décide du type, ce qui va modifier le schéma protocolaire standard. Par ailleurs, il va introduire un contenu au message. Pour ce faire, il peut soit taper directement un texte, soit ajouter un objet dans le texte, soit éditer les listes d'objets pour en choisir un, soit enfin créer un nouvel objet, ou même éventuellement un nouveau type d'objet (y compris alors l'édition des propriétés d'un nouveau champs "pré-cablé").

Lorsque le message est entièrement édité, il l'envoie, et tout le mécanisme de contrôle d'expédition se met alors en œuvre.

Indépendamment des messages, X peut aussi travailler sur le projet lui-même, avec différentes possibilités :

- recherche d'informations relatives au projet (on ne détaille pas ici)
- étude et analyse spatiale au moyen des outils SIG intégrés
- utilisation du noyau SMAALA

Le mécanisme de récupération des résultats permet d'intégrer des états SIG ou des états SMAALA dans les messages.

Lorsqu'un message non structuré arrive, l'AA peut proposer à X de le structurer en fonction du lexique et de façon interactive. Ceci afin de permettre d'évoquer les mécanismes d'enrichissement qui ne sont fonctionnels que sur les messages structurés.

Si le message est structuré et contient des informations ou des requêtes spatiales, le noyau SMAALA de l'AP peut informer que des conflits apparaissent (recouvrement, décalage, divergence) et les signaler.

10. Conception détaillée

A la différence d'un SMAR pour lequel l'organisation existe en tant que gestionnaire des processus collectifs, on va ici construire les agents en incluant les contraintes du collectif dans le modèle individuel. On fera ici référence aux réflexions issues du chapitre 3. On aborde tout d'abord les messages qui constituent la base de la négociation.

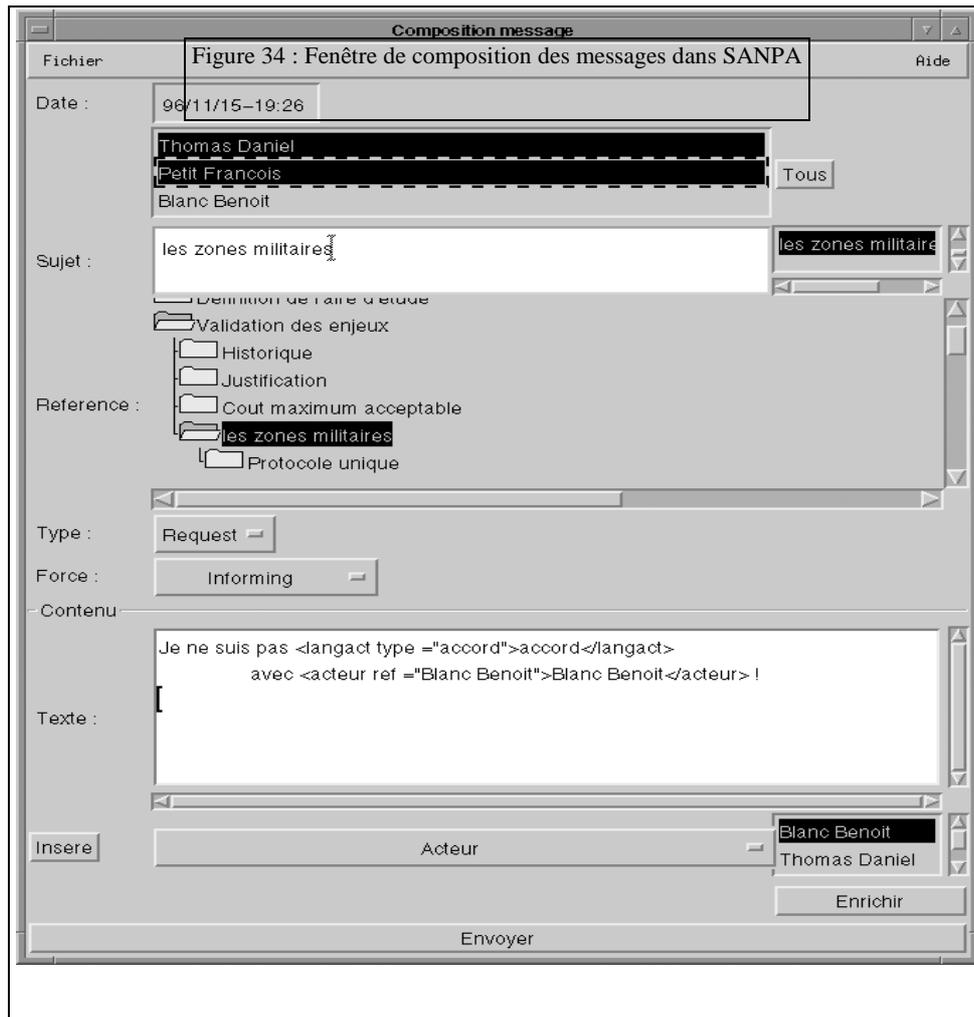
10.1. Les messages

Afin d'illustrer le contenu des messages, nous montrons dans la Figure 34 la forme de la fenêtre de saisie des messages. Un message a donc 8 champs principaux parmi lesquels on retrouve les champs classiques des messages électroniques et d'autres champs spécifiques :

- Expéditeur
- Date
- Destinataire : un ou plusieurs acteurs
- Sujet : par référence aux sujets maintenus par l'AP
- Référence : message auquel ce message fait référence
- Type : type de performatif utilisé, relatif aux schémas de communication
- Force : correspond à la force illocutoire, non utilisé pour l'instant par SANPA
- Contenu : champ complexe contenant le fond du message

Le contenu est codé sous forme d'un texte HTML enrichi. Le détail du langage et ses possibilités d'évolution sont donnés en annexe.

Le principe de la structuration des messages est de permettre d'une part aux agents de réagir directement aux messages pour les traiter puis enrichir, sans avoir à traiter du langage naturel, et d'autre part, de suivre le processus de communication selon un cadre explicite (succession des types de messages). Le principe retenu doit cependant permettre aux utilisateurs de travailler de façon transparente par rapport à la structure, avec les différentes options de structuration automatique, de structuration interactive et de non structuration. Un utilisateur novice peut utiliser du texte brut et ne pas se préoccuper de sa structure. Mais les agents réceptionnaires ne pourront l'exploiter aussi bien.



10.2. Les protocoles de communication

Les protocoles peuvent être abordés à différents niveaux. On parle de protocoles en général pour les règles de bienséance présidant à la communication et aux comportements des acteurs. Il s'agit de règles spécifiant par exemple que le préfet parlera en premier.

Par ailleurs, les protocoles peuvent être les registres de communication haut-niveau que l'on retrouve régulièrement. Il s'agit alors davantage de phases de communication. Elles sont organisées en un semblant de protocole plus ou moins explicite. Ainsi, par exemple, lorsqu'un sujet est abordé, il y a d'abord un ensemble d'affirmations, puis des discussions sur ces affirmations, puis l'élaboration d'un consensus, et finalement la concrétisation du consensus.

Enfin, on retrouve les protocoles classiques en IAD, au sens de suite d'actes de langage, traduisant un certain registre d'échange "bas-niveau" : à une question succède en général une réponse ou une "contre-question".

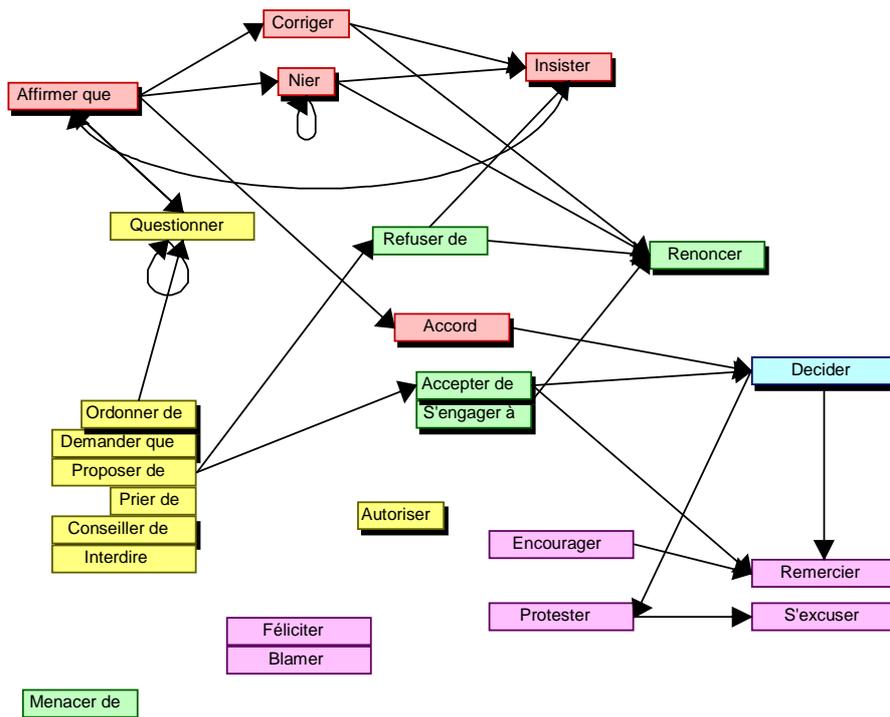
Certains protocoles ont donc trait à la « simple » discussion en tant que communication entre deux individus, et d'autres ont trait à la négociation, et donc plus précisément à la disposition des acteurs par rapport à des propositions. Il y a une imbrication des deux puisque la négociation suppose la discussion.

Dans le cas qui nous intéresse les protocoles de communication classiques en IAD paraissent un peu trop rigide, mais surtout trop orientés vers l'échange entre agents autonomes dans des processus automatisés.

On est donc conduits à proposer un double niveau. D'une part des protocoles très simples et assez contraints, spécifiant par exemple qu'une question attend une réponse ou une autre question. Pour ce niveau nous nous appuyons sur le système ILAPI [Ferrent, 1996]. Et d'autre part des protocoles plus évolués correspondant davantage à des phases de négociations "courtes" avec des options tactiques. Enfin on a des phases longues, mais qui sont hors protocole au sens qu'elles ne sont pas contraintes ; elles ne sont en général qu'observées (par exemple : les phases du cycle de Gulliver en négociation (voir annexe)).

Pour le niveau intermédiaire correspondant à des successions de messages orientés vers l'action, nous proposons de reprendre une sous partie des performatifs cités dans [Vanderveken, 1990]. Le graphe général est donné dans la Figure 35.

Figure 35 : Les performatifs retenus dans SANPA



Le schéma de succession figuré n'est qu'indicatif. En effet le principe retenu est démarrer le processus avec un graphe de succession « plat », sans liens favorisés. Par la suite, les AA vont observer les types de réponses qui sont faites à des types de messages et ainsi mettre à jour des informations sur des protocoles classiques. Puis par la suite quand le nombre d'occurrence dépasse un seuil considérer que cette transition prend valeur de loi. Ces informations apprises peuvent être échangées entre AA via l'AP pour profiter d'un plus grand nombre d'échanges.

Un acteur peut choisir n'importe quel acte, mais l'AA va lui conseiller (en présentant les performatifs dans l'ordre du graphe dominant) ceux qui sont répertoriés comme standards.

10.3. Les agents

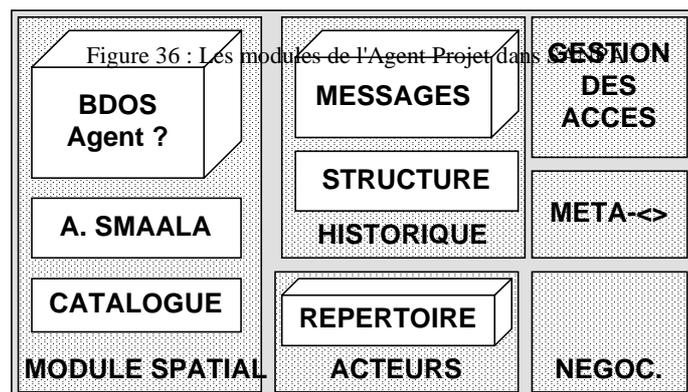
Bien qu'une approche récursive des architectures d'agents soit sans doute intéressante en terme de flexibilité des agents, nous ne l'avons pas retenue ici par souci de simplification. Les architectures sont donc horizontales, et les processus internes aux agents purement séquentiels.

10.3.1 Agent Projet

L'agent projet doit :

- *Créer un projet à partir de données* : l'opérateur initial introduit les données du projet, qui sont alors prises en compte pour mettre en place un cadre de travail.
- *Gérer une population d'acteurs* : accueil, retrait, accès différenciés, présences, "réunions"
- Stocker et gérer les messages en les hiérarchisant
- Traduire les requêtes spatiales et les valider et inscrire dans la représentation spatiale partagée. Gérer la BDOS.
- Observer, généraliser, éduquer : maintenir les catégories d'action et leurs régularités
- Orienter le processus après accord fonctionnel sur un agenda et un protocole relationnel: le respect de l'agenda est lié au déroulement des phases, et le protocole relationnel spécifie les types de participants et de schéma que l'on rencontre pour chaque phase.
- Garantir l'intégrité du projet et produire des traces.

L'agent projet est "peu social". A la limite on peut considérer que ce n'est pas un "vrai agent" au sens qu'il n'a pas de stratégie sociale. L'AP est au service des autres pour gérer l'information. L'AP ne doit pas négocier d'actions avec les autres agents, il se borne à conseiller, informer et prescrire. Comme nous l'avons indiqué, la description qui en est ainsi faite nous suggère une approche "Tableau Noir".



La Figure 36 donne les modules applicatifs de l'AP. On a trois modules de stockage : un module spatial, un module d'historique des messages, et un module acteurs. On a aussi un module de communication inclus dans le module de gestion des accès, un module "méta"

qui effectue les généralisations, et un module de négociation avec les bibliothèques de négociation, les protocoles en cours et leur validation.

Le module principal de l'AP est son système de communication. Il permet de recevoir, contrôler et réexpédier les messages. Suivant la proposition de Pierre Ferrent, cette couche est fondée sur deux processus légers concurrents : écoute et émission.

Chaque message reçu est vérifié, déclaré reçu à l'expéditeur, copié dans l'historique et réexpédié aux destinataires. L'accès aux messages est contrôlé en fonction de leur accréditation. Actuellement un message n'est lisible que par ses destinataires, mais on pourrait imaginer un drapeau message indiquant son caractère public. Ce processus est continu et indépendant des autres.

Le processus de gestion des accès contrôle en permanence l'état d'activité des agents. Si un message spécifique d'introduction est reçu, l'AP va identifier le demandeur, contrôler ses droits, et éventuellement en référer aux acteurs si le demandeur n'est pas reconnu ou sa catégorie non identifiée. Il peut y avoir alors une négociation spécifique sur le statut du demandeur. Quand le demandeur est accepté, l'AP lui fournit l'environnement SANPA si nécessaire, et il devient actif. Quand un acteur est inactif pendant une durée donnée, il est automatiquement sorti du processus.

Tout message incluant une composante spatiale dans son contenu, en particulier un champ "SMAALA" est directement renvoyé vers le module spatial qui ajoute l'objet à la BDOS, ou met à jour s'il existe. Chaque objet de la BDOS est attaché en retour au message qui l'a produit, ce qui permet à partir de la carte de remonter au message.

Le processus "méta" travaille de même que les AA sur tous les champs des messages :

- il évalue les réseaux de relations privilégiées en comptant les messages échangés entre acteurs
- il évalue l'activité des acteurs à partir du nombre de messages produits
- il mesure enchaînements ou relations entre sujets
- il recherche les messages non satisfaits (questions sans réponse, propositions sans retour)
- il met à jour les graphes de performatifs globaux et par phase
- il suit la mise à jour des lexiques et grammaires pour les contenus

- il constitue un index d'occurrence entre les différents champs et leur instance

Par ailleurs, on pourrait envisager de produire une analyse factorielle sur le croisement des différents paramètres à l'intérieur de la négociation : importance de certaines classes d'acteur en fonction de la phase, corrélation entre graphe de performatif et phase, entre champs utilisés et sujet.

Enfin, le module de négociation va suivre le déroulement des phases, contrôler l'agenda, et, en fonction du modèle de négociation éventuellement retenu, contraindre les sujets et performatifs utilisés.

Ces modules sont relativement indépendants. C'est l'arrivée des nouveaux messages qui déclenche tous les processus. Certains pourraient considérer que chaque module est un "agent" mais ça ne nous paraît pas avoir beaucoup de justification ici.

10.3.2 Agents Assistants

Les agents assistants (AA) constituent le noyau de SANPA.. Fondamentalement, ils doivent servir simplement de médium, mais, en fonction du contexte, ils peuvent enrichir, orienter, et même remplacer l'acteur.

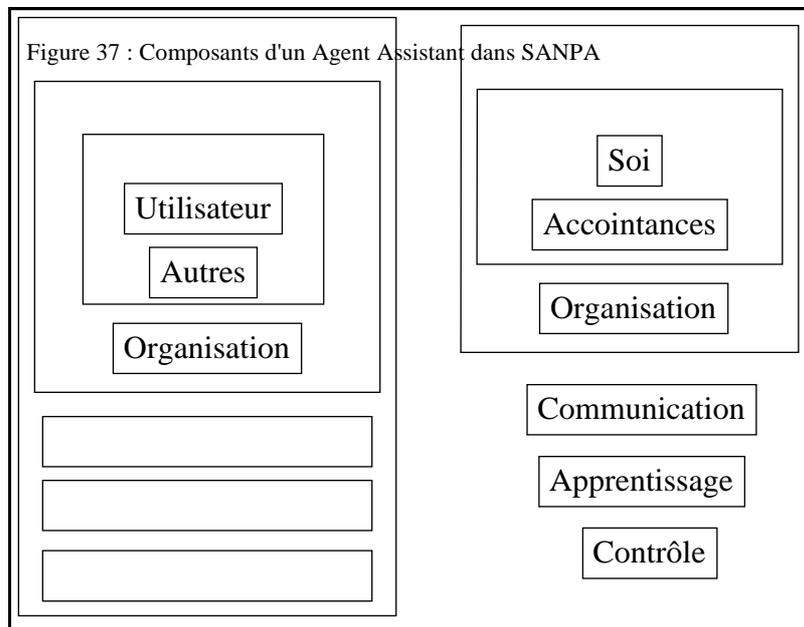
Un AA dispose d'un ensemble de modèles, qui sont plus ou moins "identifiés" (paramètres déterminés), et de données, qui constituent le "savoir" de l'agent. Comme *a priori* le problème des agents n'est pas de décider d'actions, le mécanisme stratégique est assez réduit. On n'est pas dans un cadre "croyances - désirs - intentions" classique.

On a deux types de données très différentes : des données relatives à la négociation et au projet, et des données relatives au SMA. Les données SMA sont assez restreintes ici, puisque chaque AA "reflète" un acteur. Pour les modèles d'agent, on a simplement des informations sur l'état d'activité, l'acteur attaché, et la localisation physique. Pour le modèle de société, on a essentiellement le modèle standard pour la communication (ILAPI ici).

Les données du domaine général sont liées aux champs des contenus de message. Il s'agit des résultats de recherches effectuées à partir d'Internet, ou d'informations obtenues auprès d'autres agents. La catégorisation est faite directement à partir du vocabulaire puisque le lexique est limité.

Les données projet sont des informations non spatiales qui décrivent le contexte du projet et ses contraintes structurelles. On trouve aussi des informations sur le coût.

Les modèles de négociation incluent actuellement seulement l'enchaînement des phases, et le graphe de succession des performatifs. Il n'y a pas d'articulation stratégique relative au contenu ou au relationnel. Les phases sont décrites simplement par un intitulé. Le fait d'être dans une phase ne contraint le processus que par rapport à la validation réalisée à la fin de chaque phase, et qui officialise sa fin.



La discussion du modèle d'acteur est renvoyée en annexe. On retiendra qu'un acteur est décrit par ses valeurs (relativement aux critères retenus), ses contraintes, spatiales ou autres, ses caractéristiques socio-relationnelles (position hiérarchique, charisme, réseaux de relation), ses ressources mobilisables, et ses buts.

Le modèle d'organisation spécifie les liens entre organismes, et la dépendance des types d'acteurs (un maire est sous l'autorité d'un préfet). Le modèle peut spécifier aussi des liens thématiques.

10.4. Le schéma d'action d'un Agent Assistant

Il existe un déterminant intangible du processus : l'acteur reçoit des messages et en envoie d'autres. Entre temps, il a exploité le contenu des messages reçus et produit un nouveau contenu.

i. Gestion des messages

La processus de communication gère l'arrivée et le départ des messages. Il effectue aussi la hiérarchisation selon les principes décrits en annexe. Les schémas de hiérarchisation sont modulables.

L'AA détermine en permanence les messages urgents ou les rappels d'activité, comme les questions laissées en souffrance.

ii. Présentation des messages

Les messages sont présentés sous forme documentée, avec les liens préparés avec les différents objets.

iii. Enrichissement des messages

L'enrichissement peut porter sur presque tous les champs. Il peut être local ou partagé.

- **Expéditeur** : appel à la fenêtre de l'acteur, évocation des messages précédents du même acteur
- **Destinataires** : appel à la fenêtre acteur, évocation des messages précédents des mêmes acteurs, recherche de coalition d'intérêt lié au message
- **Référence** : appel à l'historique, visualisation protocole
- **Sujet** : Descriptif du sujet, les autres messages du même sujet, des informations complémentaires recueillies sur ce sujet par recherche sur le Web
- **Type** : appel au chaîne de protocole, requête auprès de l'AA de l'expéditeur pour identifier son protocole attendu, proposition de type de retour
- **Contenu** : "Préstructuration" interactive si non encore réalisée. Evaluation en fonction des champs pré-cablés (voir annexe), recherche à partir des mots du texte

Tous les enrichissements peuvent être réalisés collectivement en faisant appel aux autres AA.

iv. Préparation des réponses

Les champs "préinstanciables" sont remplis. Les champs ouverts sont conseillés. Il est fait référence aux régularités observées.

v. Conseil thématique et relationnel

Le conseil thématique consiste à analyser les sujets et leur enchaînement en terme d'acteurs concernés. Le conseil incite à utiliser l'agent SMAALA.

Le conseil relationnel est plus fin. Il vise à former des coalitions d'intérêt ou à identifier les acteurs clés. Pour ce faire on recherche les proximités de sujet, de zones de contrainte, de systèmes relationnels. La recherche d'un partenaire va s'appuyer sur des questions du type : « je veux tous les acteurs qui sont intervenus sur ce sujet, en se référant à telle zone ». La recherche est effectuée à partir de la base de l'AP. Par ailleurs, la stratégie de négociation est construite à partir des modèles d'acteurs. La réaction à un message va dépendre de la relation existant avec l'émetteur du message (voir « Dynamique de l'acteur » en annexe).

vi. Apprentissage

L'apprentissage est relativement simple. Il consiste simplement à renforcer des probabilités d'occurrence ou des probabilités de transition pour les différentes composantes du système. C'est un modèle bayésien classique.

10.4.2 Agents SMAALA

L'intégration des agents SMAALA n'est pas encore entièrement spécifiée. Le principe retenu est de permettre l'échange de « populations » SMAALA descriptives d'une proposition dans le contexte du projet. Dans le cas classique, SMAALA est utilisé simplement pour déformer la proposition envoyée en fonction de son propre système de valeurs. On a alors une solution assez proche mais plus conforme à ses valeurs : une reformulation de la proposition.

L'autre possibilité concerne les entités spatiales indépendantes qui sont échangées dans les messages. Pour les intégrer au noyau SMAALA, il faut prévoir de spécifier leurs interactions avec les autres objets. A cet effet, on peut soit disposer d'interactions types en

fonction de la classe d'agent géographique, ou requérir auprès de l'auteur des précisions sur les contraintes qu'il pose sur cet objet. Par exemple, X signale que sa maison est au proche de la route projetée. Le message va donc inclure un champ « objet spatial » de type « bâtiment », et inclure une spécification sur la distance que X admet entre sa maison et la route.

L'agent SMAALA propre à l'AP a un statut particulier car il doit gérer tous les objets à la fois. Le principe est alors que les différentes propositions soient confrontées, et que l'on puisse détecter les recouvrements et les divergences simplement locales.

10.5. L'action sociale des agents

Les agents bénéficient de la communauté essentiellement pour l'enrichissement des messages. Ils peuvent échanger en permanence des informations, à condition que leurs acteurs respectifs aient retenu cette option. Ceci est fondamental pour les graphes de performatifs qui ont besoin de beaucoup de communications pour se renforcer.

Le processus de négociation lui-même est aussi facilité par le fait que les agents s'engagent à orienter le processus conformément au protocole initialement choisi.

Si les acteurs le souhaitent, les AA peuvent aussi échanger les modèles d'acteurs qu'ils utilisent.

11. Implémentation

SANPA est un projet assez important. Son développement est loin d'être achevé. Nous présentons ici ce qui est déjà réalisé, et subséquentement ce qui reste à faire.

11.1. Développement

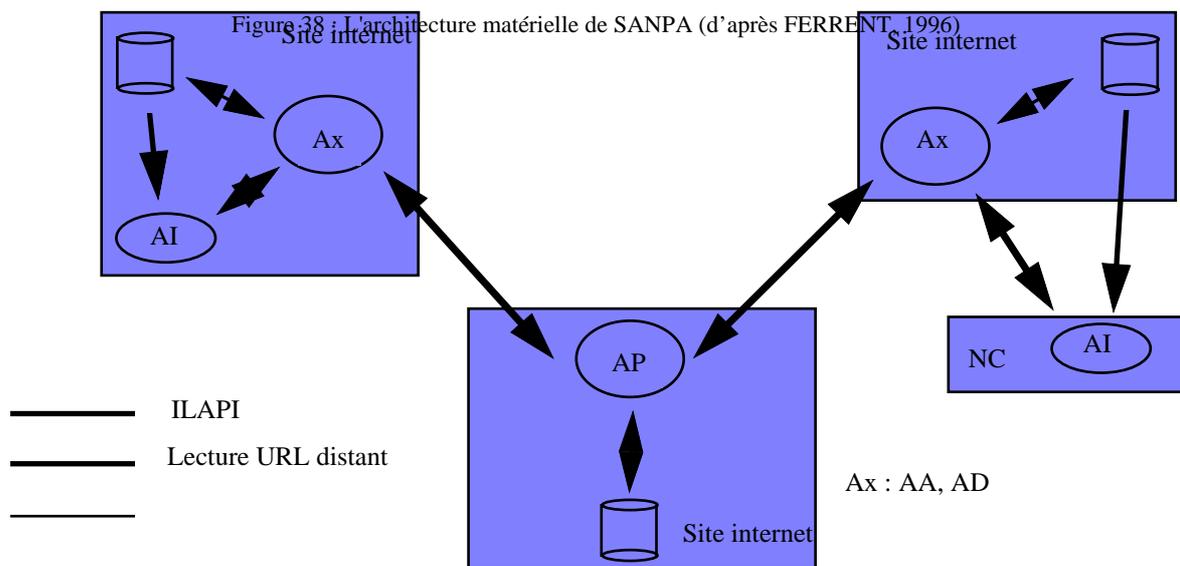
SANPA s'appuie sur différents travaux antérieurs : LE_SALON [Van Aeken & Demazeau, 1996], un lieu d'échange virtuel pour agents, GEOMED [GEOMED_F, 1995], un projet de médiation spatiale, SMAALA, ILAPI [Ferrent, 1996], une bibliothèque de communication fondée sur des protocoles à base d'actes de langage. Par ailleurs, du fait de sa vocation distribuée, SANPA est prévu pour fonctionner à partir d'Internet. Nous avons donc choisi de développer ce système en Java [SUN Corp., 1997], langage adapté aux différentes

contraintes de développement. La plus grande part du développement effectif a été réalisée par Pierre FERRENT, durant son stage de probatoire CNAM.

11.2. Architecture Matérielle

SANPA est prévu pour fonctionner pour des acteurs distants. Chaque acteur va donc *a priori* lancer son agent assistant sur son propre site. Les agents vont communiquer en utilisant les processus standards, en l'occurrence des « sockets » IP. De même les recherches d'information doivent se faire par l'intermédiaire d'URL (« Uniform Ressource Locator ») classiques. Ce niveau ne nous concerne pas ici, il est géré directement par Java. En revanche la gestion des interactions entre agents, au niveau du processus multi-agents, est assurée par le protocole ILAPI standard, sans utiliser les champs « force ».

L'agent Projet peut être localisé n'importe où ; bien qu'en général ce soit l'initiateur de la négociation qui l'héberge. Les agents assistants, bien que normalement ils soient sur le site de l'acteur, peuvent être déportés, en particulier dans le cas d'acteurs intervenant à partir de terminaux légers (NC, Web TV, WebMinitel). Ils sont alors exécutés sur des sites serveurs. L'interface est constituée d'une appliquette (« applet ») en Java, exécutable depuis n'importe quel lecteur HTML avec machine virtuelle Java. L'agent assistant est nécessairement une application autonome pour des raisons de sécurité et de droits d'écritures. Enfin le noyau SMAALA peut être exécuté soit localement soit de façon déportée.



11.3. Interface

L'interface est constituée d'un ensemble de fenêtres courantes qui donnent :

1. une image générale du projet, telle qu'elle est communiquée à l'AA par l'AP,
2. une image détaillée du projet, intégrant la visualisation de l'état SMAALA,
3. un aperçu de l'activité et un contrôle sur l'AA,

ainsi que de fenêtres opportunistes pour :

4. l'envoi de messages,
5. la lecture de messages,
6. l'information sur les acteurs,
7. l'information générale.

11.3.1 Les fenêtres de SANPA

Seules les fenêtres 1, 4, 5 et 6 sont construites et actives. La fonction 3 est réalisée au moyen d'une fenêtre textuelle.

Dans la Figure 34 on a déjà vu la fenêtre de composition des messages. On trouvera ci-dessous les fenêtres 1 et 6.

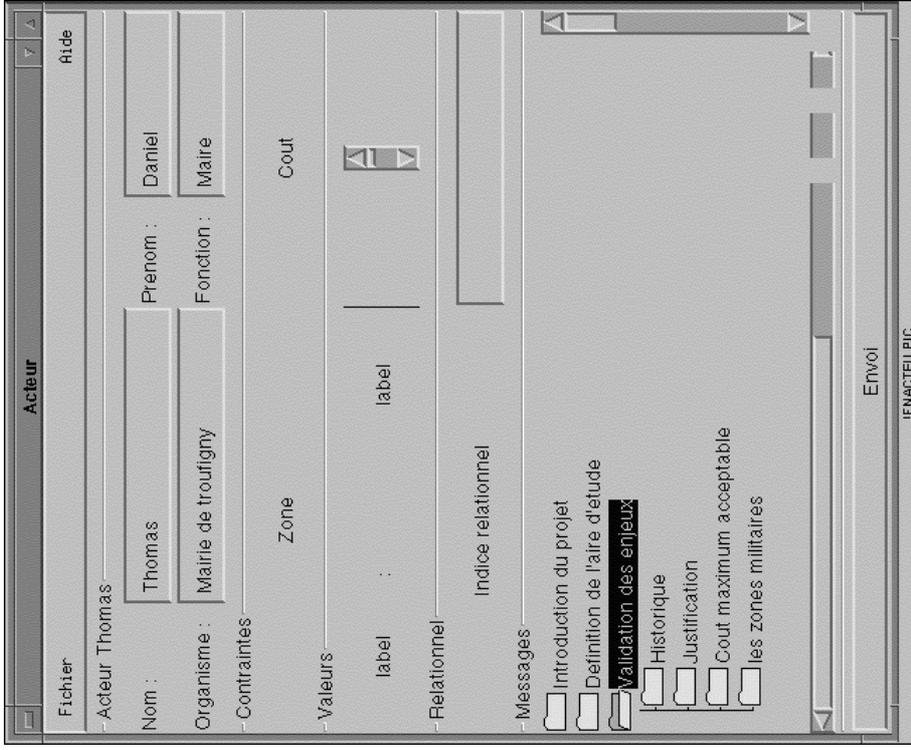


Figure 39 : La fenêtre Acteur dans SANPA

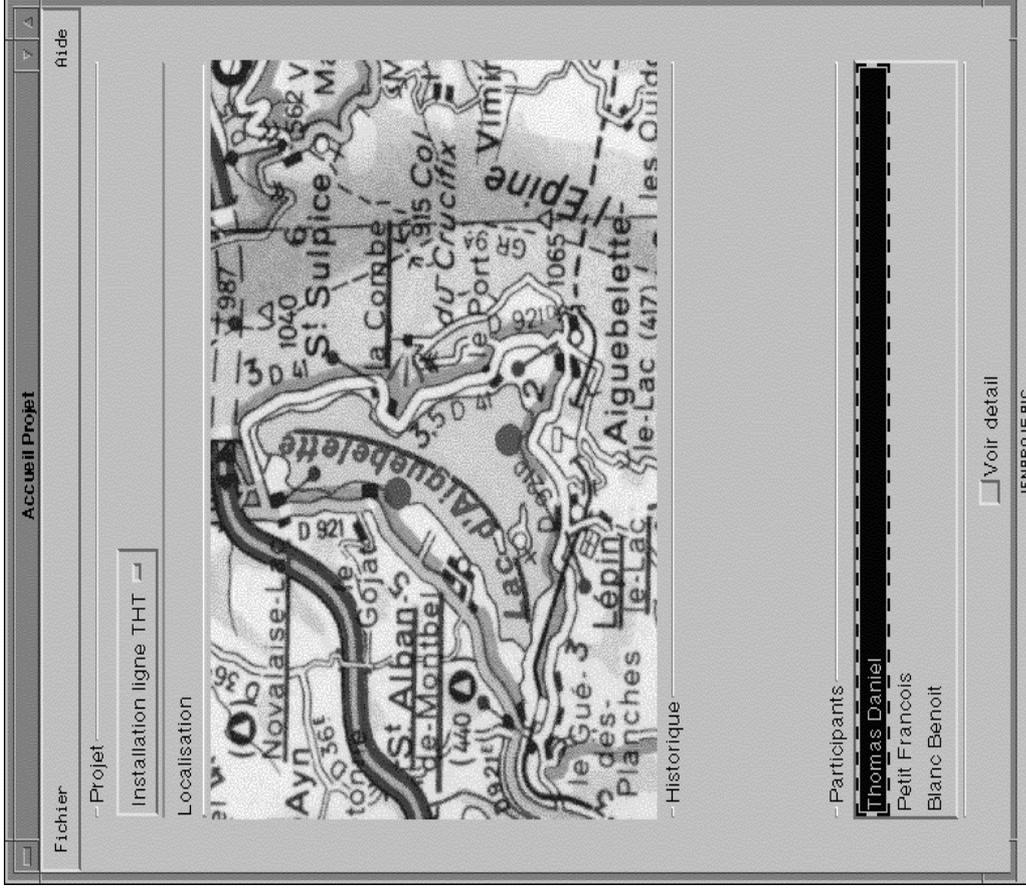


Figure 40 : La fenêtre Projet dans SANPA

11.4. Etat d'avancement

Les communications sont entièrement gérés. Les agents sont implémentés, mais ils ne disposent pas encore de capacités d'apprentissage. Par ailleurs, les agents SMAALA ne sont pas encore opérationnels ; le portage de SMAALA en Java n'étant pas achevé. Il n'y a pas encore de modèle de négociation qui soit utilisé. En revanche un prototype de gestion des champs « pré-cablés » est déjà opérationnel. La hiérarchisation des messages est réalisé sur une base très simple, à partir des sujets, des émetteurs et des dates.

12. Conclusion

Comme on espère l'avoir montré, SANPA est un système prometteur. Il reste une part importante de développement à réaliser, mais on peut d'ors et déjà considérer que le système a constitué un bon moteur de réflexion pour différents problèmes nous intéressant, comme l'interaction entre un SMA d'information et une société humaine, le traitement d'une communication « haut-niveau » proche du langage naturel, la co-construction de référentiels pratiques (protocoles, sujets) dans une communauté d'agents, et l'assistance au processus relationnel.

La perspective première est évidemment d'achever ce qui est spécifié. Mais dans un deuxième temps, on souhaiterait préciser le cadre de négociation, et en particulier envisager le codage de procédures classiques, comme la « négociation raisonnée » ou le « C3C » (voir annexe sur la négociation).

Conclusion

Les résultats inégaux d'un projet ambitieux

Dans cette conclusion, nous allons nous efforcer de reprendre les motivations et objectifs affichés dans l'introduction, afin de mettre en exergue les résultats obtenus, certaines critiques que l'on peut faire, les lacunes (ce qui n'a pas été fait), et abstraire l'apport plus global de cette recherche. Puis nous indiquerons les améliorations attendues, les prolongements possibles, et les nouvelles initiatives que ce travail a pu susciter. Enfin nous concluons par la perception générale que l'on a eue de ce travail, ainsi que des poursuites que l'on entend effectivement lui donner.

1. Rappel des motivations et objectifs

Dans l'introduction, nous indiquions que nos motivations « à long terme » étaient de trois ordres :

- contribuer à la compréhension et l'orientation de l'action dans les systèmes complexes,
- participer à une réflexion sur la place de la technique et en particulier des systèmes informatiques dans la gestion des milieux par les sociétés,
- contribuer à la justification et la valorisation des systèmes multi-agents en tant qu'outil particulièrement adapté à la modélisation et l'action dans les systèmes complexes.

Dans ce cadre, on se fixait à la fois des objectifs pratiques et théoriques. D'une part, on souhaitait proposer à notre partenaire industriel, ainsi qu'à d'autres utilisateurs éventuels, des **outils d'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire, qui répondent à des besoins déclarés par les utilisateurs de terrain.**

D'autre part, on visait différents objectifs théoriques :

1. Modélisation et Implémentation de **système multi-agents réactifs dédiés à la résolution de problèmes,**
2. Choix entre **SMA réactifs et SMA cognitifs selon l'utilisation,**
3. Approche de la **modélisation spatiale** dans un cadre multi-agents,
4. Recherche en **sociologie** de concepts structurant pour les systèmes multi-agents,
5. Modèles d'**acteurs**, et implémentations agent,

6. Aide à la négociation,

7. Simulation de négociation.

Ces motivations et objectifs s'inscrivaient alors dans une problématique à quatre dimensions :

- Outils d'aide à la gestion de l'environnement et du territoire
- Modélisation et aide à la gestion de systèmes complexes
- Systèmes multi-agents
- Application à l'aménagement du territoire

Selon ces différentes catégories, nous reprenons par la suite les résultats obtenus, les lacunes et les critiques possibles.

2. Résultats, critiques et lacunes

2.1. Développements informatiques

Si on reprend les développements dans leur ordre chronologique, on trouve successivement :

1. Reconstruction du noyau PacoElf selon un formalisme "multi-agents" (C++, Unix - X),
2. Elaboration et implémentation du modèle et de la bibliothèque SMARRPS (C++)
3. Développement du prototype SMAALA (C++, PC-Dos) : cartes aléatoires, décision non spatialisée
4. Version recherche de SMAALA (C++, Unix - InterViews) : cartes numérisées, groupes dynamiques
5. Version opérationnelle de SMAALA (C++, PowerMac - CodeWarrior) : interface de manipulation
6. Prototype SANPA (Java)
7. Prototype SMAALA-Web (Java)

Auxquels viennent s'ajouter divers développements ponctuels destinés au test des modèles formels.

2.1.1 SMARRPS

La bibliothèque SMARRPS a été écrite dans une première version en C++. Son utilisation se fait simplement par héritage des classes. Le principe retenu est de disposer d'un noyau accessible par l'intermédiaire des *Paramètres*. L'interface est "à la charge" de l'environnement d'implémentation. Les bases d'une seconde version ont été mises en place, et qui permettrait d'utiliser un "script" de configuration. Cette deuxième version intègre l'hypothèse d'un environnement symbolique, avec un référencement par "clés". Cette version n'est pas encore complète.

La critique principale que l'on peut faire à SMARRPS, c'est de ne pas disposer d'une bibliothèque d'*organisations*. Par conséquent, on est obligés d'utiliser des *Interactions* construites de façon *ad hoc*, à chaque utilisation. Par ailleurs, SMARRPS n'est pas, en l'état, prévu pour intégrer des agents "très" différents : il faut au moins que les agents en interaction aient les mêmes types d'attribut d'état. Enfin, l'activation est "mono-processus", c'est-à-dire que la simulation du parallélisme se fait au moyen d'une boucle sans fin qui active successivement les agents selon les différents synchronismes possibles. Une distribution en processus légers ("threads") serait préférable. Le prototype de SMAALA-Web, en Java, est construit selon ce principe.

La perspective idéale pour SMARRPS serait de disposer d'un environnement de développement, avec une construction sous forme graphique du système. En particulier, dans le contexte actuel de composants modulaires réutilisables (p.e. "Java Beans"), on pourrait envisager des éléments auto-assemblables, pour peu qu'ils soient mis en interaction au sein d'un environnement partagé. Avec une conception homogène, on pourrait envisager de "jeter" dans un SMA actif de nouveaux agents, qui lors de leur première interaction avec les "anciens", demanderaient à l'utilisateur de spécifier les effets.

Par ailleurs, les outils d'évaluation de SMARRPS sont limités actuellement à la mesure de stabilité. La réflexion sur les métriques commencée dans le chapitre 7 pourrait être utilisée pour raffiner ces évaluateurs. De même les processus d'observation pourraient aussi être mis en "bibliothèque", alors qu'actuellement ils dépendent de l'application.

2.1.2 SMAALA

A l'heure actuelle, la version recherche de SMAALA n'est plus fonctionnelle du fait du passage en environnement Sun-Solaris 2.5, et de l'absence de mise à jour d'Interviews. En revanche la version "opérationnelle" sur Macintosh est active (ainsi que le prototype initial sous Dos). Elle répond à peu près à ses spécifications initiales ; elle permet ainsi :

- de transformer en "environnement multi-agents" des cartes de sensibilité,
- de fixer des contraintes structurelles,
- de choisir des systèmes de pondération,
- d'activer la recherche, des fixer des agents, d'évaluer le résultat
- de gérer des impressions.

Les défauts constatés et devant donner lieu à une mise à jour sont :

- le trop grand nombre de paramètres résiduels, les utilisateurs souhaitant un système "monologique", dont les réponses ne soient pas fonction de critères externes au problème,
- l'absence de données structurelles sous forme "mécanique" classique : courbure, continuité,
- la lenteur de la recherche (5 min) sur un "petit Mac" (Performa 6300),
- l'absence de raffinement de la recherche entre deux agents,
- l'absence de statistiques complètes sur les fuseaux.

En complément de ces améliorations, on peut envisager différentes options :

- connexion à un SIG pour la saisie des données initiales,
- interface pour la saisie de cartes de décision,
- analyse de sensibilité,
- analyses "composites" avec différents types d'aménagements.

Du fait des difficultés de l'environnement Apple, il faudra aussi envisager un retour au PC en version Windows. Cependant cette option pourrait être abandonnée si le prototype en Java, destinée à une utilisation distribuée, est finalisé et suffisamment performant. Son utilisation supposerait la possibilité de l'intégrer dans la chaîne des traitements réalisée par les utilisateurs (intégration dans une "suite" bureautique en Java, intégration avec un SIG).

Dans cette thèse, SMAALA est clairement le produit principal. Sa place relative aurait pu être moindre, et ses fonctionnalités élargies, si les contraintes techniques "extérieures" (environnement normalisé de développement au laboratoire, environnement informatique du partenaire) n'avaient pas conduit à de nombreux développements redondants sur différentes plates-formes.

2.1.3 SANPA

Le prototype de SANPA, écrit en Java, est fonctionnel, et permet l'échange de messages, et la structuration des communications. En revanche, les agents de SANPA ne sont pas encore dotés d'un processus collaboratif de structuration. Leur activité collective se limite au respect des protocoles de communication. Par ailleurs, l'intégration avec le noyau SMAALA n'est pas réalisée, puisque ce noyau lui-même n'est pas achevé. Il reste donc une part importante de développement à réaliser.

Dans ses principes, SANPA propose de nombreuses approches originales de problèmes posés par l'aide à la négociation, en particulier :

- construction des protocoles de discussion avec structure dynamique,
- utilisation de messages textuels structurés par un langage dédié, avec lexique adaptable, et utilisables par les agents,
- intégration d'un outil de gestion dynamique des représentations spatiales, avec une architecture multi-agents réactifs,
- gestion de priorités de messages à partir de tous les champs de contenu.

Le défaut principal de SANPA est de n'être pas achevé, mais on peut citer diverses autres lacunes, même dans les spécifications :

- un agent projet centralisé,
- pas d'analyse stratégique en fonction de positions d'acteurs, qui pourrait être réalisée à partir du modèle DEPNET [Sichman, 1995],
- pas de bibliothèque ou de guide de négociation,
- pas de réorganisation dynamique,
- pas d'ouverture vers les agents informationnels sur le Web, en l'absence de standard pour les architectures et la communication.

L'objectif principal pour l'avenir est d'achever ce qui est prévu dans les spécifications, avec deux développements possibles : d'une part aller vers l'autonomie des agents quand les protocoles de discussion seront stabilisés, à des fins de simulation, et d'autre part généraliser l'approche pour un système d'information plus étendu, incluant des outils de capture d'information et de publication. L'argument sous-jacent est lié à la constitution d'organisations dynamiques susceptibles d'adapter les schémas de circulation de l'information en fonction des besoins. On peut noter en complément qu'en l'état SANPA constitue déjà une plate-forme intéressante pour tester différentes approches en terme de systèmes multi-agents cognitifs dédiés à l'information.

3. Résultats théoriques

3.1. Systèmes Multi-Agents

1. Nous avons proposé un modèle de **système multi-agents réactifs dédiés à la résolution de problèmes**, le modèle SMARRPS. Ce modèle s'articule autour de la notion de contrôle des interactions par des filtres. On a illustré comment on pouvait tout d'abord spécifier le système en fonction de la donnée d'un problème, puis nous avons proposé quelques stratégies d'adaptation pour améliorer les recherches de solution. Nous avons particulièrement insisté sur le rôle de l'utilisateur pour détecter la solution. Nous avons présenté quelques exemples d'application. Ce modèle introduit en particulier un modèle spécifique d'agent, présenté sous une forme proche de l'automatique.
2. Nous avons analysé **trois modèles** de systèmes multi-agents réactifs, un modèle booléen, un modèle entier simple, et le modèle SMARRPS. Nous avons détaillé quelques propriétés, et montré que la spécificité de ces modèles réside d'une part dans la dépendance des entrées externes (de l'environnement) sur l'état de l'agent, et d'autre part sur l'adaptabilité des interactions.
3. Nous avons abordé le débat sur **la catégorisation réactif / cognitif**, en montrant que, selon nous, les systèmes multi-agents réactifs constituent la base structurelle de toute recherche sur les systèmes multi-agents.
4. Sur la base de cette dialectique réactif / cognitif, nous avons montré que **simulation et résolution** pouvaient être abordés à partir des mêmes modèles conceptuels, mais que la

démarche de conception et le rôle de l'utilisateur variaient. En particulier, il semble que la résolution de problèmes peut souvent être abordée sur un mode réactif, et, respectivement, la simulation de systèmes devait davantage aborder la simulation de processus sociaux réels.

5. Nous avons proposé une approche de la **modélisation spatiale** fondée sur le modèle SMARRPS, et qui permet à la fois de décrire de façon facilement utilisable, et d'autre part d'utiliser le modèle ainsi construit pour résoudre un ensemble de problèmes de type spatialisé. Nous avons ainsi donné une alternative aux bases de données spatiales classiques, qui pourrait permettre de disposer de SIG dynamiques, orientés vers la simulation. La notion principale est le remplacement de structures de stockage des données, par des structures d'organisation dynamique d'objets spatialement distribués.
6. Nous avons extrait de quelques **références en sociologie** divers éléments qui pouvaient concourir à reformuler des modèles de systèmes multi-agents proches des systèmes sociaux humains. Nous avons en particulier détaillé les notions de normes, et de leur construction. Nous avons aussi discuté du problème du partage de références pour des communautés d'agents cognitifs. Enfin nous avons abordé le problème du pouvoir, et de sa relation à l'incertitude. Sur cette base, nous avons cherché à répondre à la question de la validité de la référence sociologique pour la conception des systèmes sociaux artificiels.
7. Nous avons travaillé sur l'**aide à la négociation**. Nous avons analysé les besoins, les contraintes, les possibilités actuelles, puis nous avons proposé une approche fondée sur l'utilisation d'agents assistants organisés pour structurer la négociation. Nous avons identifié les différents composants de l'assistance et proposé des solutions techniques. Nous avons ainsi illustré que l'aide à la négociation ne peut s'arrêter à une simple problématique multi-agents, et qu'il faut considérer différentes composantes liées aux interfaces, à la communication et au stockage des données.

En revanche, malgré cet affichage dans les objectifs initiaux, nous n'avons pu concrétiser les travaux sur les modèles d'acteurs et leur implémentation agent. Nous avons du nous limiter à quelques amorces de réflexion sur les enjeux de cette modélisation, et identifier quelques "pistes". De même, alors qu'il s'agissait d'un des objectifs initiaux importants,

nous n'avons pas réalisé de simulation de négociation. Il s'agit sans doute d'un motif important d'insatisfaction dans ce travail.

3.2. Modélisation et aide à la gestion de systèmes complexes

Dans ce domaine, l'apport théorique est de deux ordres : d'une part le fait que, au travers de l'outil que fournit les systèmes multi-agents réactifs, on montre que la modélisation peut conduire à la résolution de problèmes, en exploitant la structure des problèmes et en la transcrivant dans une image de solution qui évolue jusqu'à satisfaire au mieux les contraintes. D'autre part, on a abordé les enjeux de la modélisation et de la gestion collective de systèmes complexes, en discutant les problèmes de coévolution de représentations, ainsi que de l'instrumentation de tels processus.

En revanche, on n'a absolument pas exploré les différentes voies formelles (systèmes dynamiques, physique statistique, théorie de la viabilité, théorie algébrique des systèmes à événements discrets) qui étaient initialement prévues pour la modélisation des systèmes complexes.

3.3. Outils d'aide à la gestion de l'environnement et du territoire

Hormis la part spécifique des systèmes multi-agents que nous avons déjà discutée, cette thèse a permis de montrer comment on pouvait intégrer une perspective "multi-acteurs" dans un outil d'aide à la décision. Par ailleurs, on a fourni une alternative dynamique et adaptable aux méthodes classiques d'optimisation.

On a largement débattu sur les SIG et leur place dans la gestion du territoire. On a montré que la prise en compte du contexte socio-politique conduisait à abandonner une perspective de gestion de l'information au profit d'une approche fondée sur la construction de représentations. On a abordé la problématique de l'expertise en choisissant de focaliser les systèmes sur l'explicitation des rôles respectifs de l'expert et du décideur.

Par ailleurs, on a défendu la thèse d'une intégration poussée des systèmes d'information en environnement, en donnant les différents composants, et en montrant comment elles s'organisent à l'intérieur d'un processus global de production, de transformation et d'échange de représentations.

On peut regretter ici de n'avoir pas pu démontrer les thèses avancées sur les systèmes d'information en environnement dans un système complet. Cela reste un objectif important pour la suite. De même le développement d'un SIG spécifique construit selon les principes prescrits n'a pu être réalisé.

3.4. Application à l'aménagement du territoire

L'application en "grandeur réelle" en aménagement du territoire n'a pas encore débuté, car les améliorations citées plus haut pour SMAALA doivent auparavant être apportées. Cependant, aux dires mêmes des experts du bureau d'étude partenaire, l'analyse qui a été faite en commun a permis de concrétiser des réflexions méthodologiques initiées auparavant, et a donné lieu à la publication d'une méthodologie. Celle-ci constitue une "marque de fabrique" spécifique qui est une plus-value certaine pour l'entreprise.

Par ailleurs, plus globalement, l'introspection suscitée par cette recherche a permis d'identifier différents points de blocage non explicités. De même on a pu éclairer des stratégies d'acteurs à l'aune d'une analyse systématique. Enfin la collaboration a permis d'ouvrir le partenaire sur de nouvelles technologies et de susciter une réflexion en commun.

Au delà du seul bureau partenaire, l'apport essentiel a trait à la réflexion sur la place des outils techniques dans la gestion du territoire. Dans ce cadre, nous avons d'une part montré que l'informatique ne pouvait résoudre "magiquement" les conflits d'intérêt, et que les SIG ne pouvaient donc constituer une solution, mais tout au plus un outil facilitant le travail de médiateurs. D'autre part, nous avons abordé la question des outils d'aide à la décision spatiale collaborative en signifiant qu'avant de mettre à disposition toute l'information à tous les citoyens, il était nécessaire de s'assurer de l'usage et de la compréhension qu'ils pourraient en avoir, en particulier lorsque cette information résulte de modèles. De plus, la perspective d'une démocratie "directe" nous a semblé potentiellement porteuse de risques pour la pérennité des milieux, en conduisant à une politique de moindre conflit, dispensée de principes de responsabilité et d'engagement du politique.

On regrettera aussi ici l'absence de test en grandeur réelle, ou de démarche expérimentale avec des populations - témoin, en particulier pour SANPA.

4. Perspectives

Comme on l'a vu, il reste de nombreuses parties inachevées, et en fonction des possibilités ultérieures et des opportunités de financement, on devra faire des choix. Mais il y a quelques tendances fortes :

- SMAALA doit être amélioré et valorisé. Une intégration avec un SIG est indispensable.
- SANPA doit être poursuivi, mais le volume de développement étant très important, ce système devra être supporté par des projets applicatifs.
- Il faut exploiter davantage la bibliographie réalisée sur la négociation en mettant en place la base de négociation annoncée. Ceci peut s'intégrer dans SANPA.
- Il faut poursuivre la voie des systèmes intégrés d'information en environnement, en se focalisant en particulier sur la collecte "économique" et réactive de données, mais aussi sur les enjeux de l'ouverture au "grand public".
- Il faut explorer des possibilités de développement d'un SIG orientée Agents.
- Il faut reprendre le travail sur les modèles d'acteur, et le finaliser dans une simulation, en comparant différentes approches.
- La résolution de problèmes par système multi-agents réactifs doit être comparée systématiquement aux autres méthodes classiques, et testée sur des "benchmark".
- L'interaction avec la sociologie doit être reprise, mais au moyen de collaborations effectives, et en suscitant éventuellement des recherches couplées.

On espère que ces perspectives pourront se réaliser à terme, en particulier dans le contexte actuel où les systèmes multi-agents tendent à se développer, y compris dans des contextes industriels, et où, d'autre part, les systèmes d'information en environnement deviennent de plus en plus ouverts et collaboratifs, et où il y a donc d'importants besoins pour des méthodes et des outils supportant le partage et la distribution.

5. Bilan général

Cette thèse a certainement été trop ambitieuse. SMAALA, poursuivi dans tous ses prolongements, aurait pu constituer un ensemble cohérent et suffisant. Mais nous souhaitons réellement aborder les problématiques de négociation. Nous avons fait le choix de l'assistance aux dépens de la simulation, de façon opportuniste et en relation avec un

projet européen. Il est apparu que le système et son interface devenait alors prépondérant sur son noyau multi-agents. On peut donc sans doute regretter ce choix qui nous a amené à considérer de nombreux problèmes annexes peu pertinents pour la thèse. Par ailleurs, les contraintes techniques ont conduit à multiplier des développements d'interfaces avec des outils peu performants, et la productivité s'en est ressentie.

Du point de vue scientifique, et malgré la difficulté de mener de front les différentes voies, cette recherche a été une source constante de nouvelles interrogations et de nouvelles perspectives. A cet égard, elle n'a pas déçu les attentes qu'elle supportait. En revanche, elle a été aussi la source de nombreuses insatisfactions dans les résultats obtenus ou les possibilités d'achever les parties projetées. La perspective de travaux formels (modèles de systèmes complexes) n'a pu être poursuivie, et on doit le regretter. En particulier on pouvait beaucoup attendre d'une référence à la théorie de la viabilité, appliquée aux systèmes multi-agents. D'autre part, le domaine des systèmes multi-agents reste exempt d'une confrontation élaborée et durable avec la sociologie, et c'est probablement aussi une grande lacune.

Le partenariat industriel a, pour sa part, été très satisfaisant. On a pu travailler avec des experts privés, avec des formations universitaires de haut-niveau, mais confrontés aux réalités du terrain, et contraints en permanence de défendre leurs positions scientifiques dans un contexte très conflictuel. On a ainsi pu observer comment se construisait la place de l'expertise dans le champ de la décision publique, et le rôle que pouvait jouer les outils d'assistance informatique. Cette confrontation au "terrain" et les leçons qu'on a pu en tirer reste comme une expérience déterminante. Et, fort heureusement, on a le sentiment que notre contribution n'a pas été vaine, et a pu apporter des innovations, que ce soit dans la concrétisation de méthodes, ou dans la fourniture d'outils.

La recherche a pris place dans un laboratoire en restructuration et une équipe en pleine expansion, et elle a dû s'adapter aux perturbations induites. Le projet de cette recherche, puis cette thèse, ont largement contribué à faire des domaines de l'information spatiale, de l'environnement, et de l'aide à la décision, des cadres privilégiés d'application pour les systèmes multi-agents, et d'ainsi les valoriser. Il semble que cette dynamique ne doive pas s'arrêter, puisque de nouveaux projets sont déjà lancés et financés dans ce cadre.

Enfin, par ses multiples développements potentiels, et les nombreuses perspectives ouvertes, cette thèse peut constituer le fondement d'un projet à plus long terme, dédié

globalement à l'amélioration et la pérennisation de la gestion des activités humaines au sein des milieux, et structuré autour de la conception de modèles et d'architectures multi-agents spécifiques, utilisés dans des systèmes d'information pour l'aide à la décision et la négociation, respectueux du contexte et des enjeux éthiques qu'ils supportent.

Annexes

Etude et d'action dans les systèmes complexes

Enjeux des Systèmes d'Information en Environnement

Composants annexes de SANPA

Acteurs et Négociation

Quelques résultats pratiques

étude et d'action dans les systèmes complexes

Un des arguments fondateurs de cette thèse, et il est largement partagé au sein de la communauté, est que les travaux sur les SMA doivent faciliter la modélisation, l'analyse, la compréhension, la décision et l'action au sein des systèmes complexes. Si on se refuse à parler de « gestion de la complexité », on suppose néanmoins que le recours au SMA devrait ainsi permettre d'améliorer l'action au sein de ces systèmes, malgré la connaissance limitée que l'on peut en avoir.

Afin de resituer cet argument, nous précisons notre compréhension des systèmes complexes, de leur modélisation, de la décision et de l'action.

1. Une définition des systèmes complexes

Dans un premier temps, nous donnons ici une proposition de définition pour les systèmes complexes. Il s'agit d'une classe très générale, avec des propriétés communes, et souvent des « problèmes » similaires. L'approche est essentiellement structurelle (on ne définit pas le système par ce qu'il fait).

Un système complexe (SC) est un ensemble d'entités en interaction, soit entre elles, soit avec d'autres systèmes, extérieurs, ou englobant. Cet ensemble subit ainsi des perturbations "extérieures". La structure d'interaction n'est pas nécessairement figé, et elle peut se modifier en fonction de l'état interne du système (sans action de l'observateur).

Le propre de la complexité est d'être entièrement arbitraire : l'observateur est déterminant. Son interaction avec le système est structurante. C'est à dire que la complexité d'un système ne sera pas perçue identiquement par des observateurs ayant des finalités différentes. C'est ce qui fait la difficulté de la prise de décision d'acteurs au sein de systèmes complexes : il faut mettre en correspondance des réalités non cohérentes. On aborde plus loin dans cette thèse l'importance de la représentation dans les systèmes opérationnels d'aide à la décision.

En pratique, on décrit un SC comme un ensemble d'unités arbitrairement délimitées, dont on précise les comportements individuels (fonction de transfert, trajectoire, autécologie, programme individuel...) ainsi que l'inventaire des relations possibles et des réponses

apportées (incluant les modifications induites dans le réseau de relation). L'état du SC est alors caractérisé par les différents états des éléments, ainsi que par la structure instantanée du réseau (ce qui peut être redondant si la connaissance de la position de tous les éléments donne la structure).

Cet état est défini dans le modèle observatoire que l'on se donne. Ce n'est qu'un reflet de la situation absolue (inobservable) du SC. Il est donc réducteur. A un même état observé peut correspondre deux situations réelles différentes pour des variables non considérées. Dans la plupart des cas cette réduction a un effet négligeable sur le futur prévu et observé du système, mais parfois la dimension négligée induit des catastrophes inattendues et imprévisibles avec les observables choisies.

2. Modèles de Systèmes Complexes

De facto, nous avons déjà abordé les modèles de Systèmes Complexes, en en évoquant les représentations utilisées par les observateurs. Ces représentations, quelle qu'en soit la forme et la traduction symbolique, constituent des modèles.

Un modèle de SC est une représentation de la réalité par une estimation quantitative ou qualitative des comportements individuels et collectifs des entités considérées.

Cette définition n'est donc volontairement pas limitée à la modélisation mathématique. En effet si pour les physiciens, et certains économistes ou biologistes, les modèles utilisés sont formalisés par des équations ou des statistiques, pour la plupart des décideurs, *le modèle est qualitatif, symbolique*, et exprimé dans des termes propres à son expérience et sa compétence. L'Intelligence Artificielle (IA) a ainsi fondé la plus grande part de ses recherches sur le recours à des modèles symboliques, construits à partir de faits et de règles (approche symbolico-cognitiviste).

Quand un SC est modélisé, il existe une correspondance avec un espace formalisé, soit numérique, continu ou discret, soit symbolique, dans lequel on peut écrire des équations d'évolution, ou une description abstraite. Mais cette correspondance n'est pas biunivoque, car d'une part à un système on peut associer différents modèles, et d'autre part à un même modèle "vivant" dans un espace peuvent correspondre plusieurs systèmes. C'est le sens de *l'analogie* : il existe pour des domaines différents des problèmes et des modèles similaires

(la forme des systèmes formels les représentant est la même). Si des résultats intéressants ont été obtenus dans un cas, ils sont souvent transposables aux domaines analogues.

3. Décision au sein des Systèmes Complexes

Un observateur d'un système complexe en devient un acteur, dès qu'il peut, par le jeu des interactions avec des éléments du système, en modifier l'état ou la dynamique. En particulier, lorsqu'il appartient au système, il en est un acteur. Mais existe-t'il vraiment des « acteurs extérieurs » ? Encore une fois, la clôture du système est déterminée par l'observateur. Celui-ci peut se « déclarer hors » du système, mais dès qu'il agit sur la réalité de ce système, il en devient une partie. Tout ceci pour signifier qu'il n'y a pas d'action « sur » un SC, mais bien « au sein de ». Par conséquent, la problématique de la décision, c'est à dire de la détermination de l'action en fonction de l'information, revient, pour un acteur, à évaluer son influence, et le contrôle qu'il en a, sur les éléments du système auquel il a accès. Nous n'abordons pas ici la motivation de la décision, ou la rationalité de l'acteur. Posons simplement que l'acteur a, à un certain instant, une représentation de l'état du système, et qu'il veut changer cet état, pour atteindre un autre, « préféré ». Décider c'est alors, selon Simon [1977], s'informer pour affiner sa représentation, identifier ses capacités d'actions (conception), choisir une action, et évaluer ses choix.

Considérons la conception et le choix. Il existe globalement deux approches possibles, qui, toutes deux, s'appuient sur un modèle : on peut soit préciser directement ce qu'on veut atteindre, et utiliser des méthodes permettant de déterminer l'enchaînement des actions auxquelles il faudra recourir ; soit, en particulier quand il n'existe pas de méthodes adaptées dans la première approche, procéder par essais et adaptations, directement au sein du système réel (expérimentation), ou sur une image analogique de ce système (simulation). On retrouve ainsi les deux cadres principaux d'utilisation des systèmes multi-agents : la résolution de problèmes, et la simulation. En complément, si on souhaite améliorer la correspondance entre sa représentation et la réalité, on peut s'informer « plus et mieux ». Ce qui appelle une autre dimension des services éventuels de SMA.

Enfin, le cadre de l'action est, ici, indissociable de la notion de co-action, c'est-à-dire du fait qu'un acteur participe à l'évolution d'un système complexe, mais qu'il ne le maîtrise pas. Il y a une ensemble d'acteurs dont les décisions et actions conjointes, collaboratives ou

non, produisent finalement les changements. On est ici dans le cadre de la décision collective, qui est encore un domaine éventuel d'utilisation de SMA.

ACTEURS ET NEGOCIATION

Dans cette annexe, nous présentons quelques éléments de référence sur la négociation. Mais, afin de comprendre le fonctionnement des acteurs à l'intérieur de la négociation, nous donnons un aperçu de l'approche stratégique descriptive des acteurs et organisations.

1. Acteurs et organisations

Cette partie reprend essentiellement les travaux de [Crozier, Friedberg, 1977] et [Bernoux, 1985].

1.1. Acteur et Théories de l'Acteur

L'analyse stratégique en sociologie, aussi appelée "Analyse Stratégique par l'Acteur", prend comme hypothèse que **la situation d'action est première** : "La perspective (de l'acteur) rapporte mobiles et modes opératoires à la **situation** dans laquelle se forme l'action". Dans le cadre acteur, les actes sont explicables à la fois par les logiques d'action et par les situations d'action.

Par ailleurs, alors qu'en économie classique on postule l'existence d'une fonction d'utilité universelle, et la rationalité partagée des modes opératoires ; on postule ici à l'inverse "la valeur socialement créative de l'action individuelle" : les faits collectifs sont la **composition** des actions individuelles, et la situation d'action constituée par les **interdépendances entre des acteurs et des institutions** permet d'expliquer les mobiles et les comportements des acteurs. On ne peut donc déduire les comportements des seuls attributs sociaux. Il faut tenir compte des comportements résultants de déterminants antérieurs (histoire des individus, situation sociale, traits psychologique), et les distinguer des actions définies comme la recherche d'une fin.

Selon Crozier - Friedberg, un *acteur* est celui dont le comportement contribue à **structurer un champ, c'est à dire à construire des régulations**. Le social doit être expliqué à partir du jeu des acteurs empiriques, calculateurs et intéressés. Les acteurs sont autonomes, "localement" rationnels (par opposition à une rationalité exacte intégrant l'ensemble des déterminants extérieurs à l'acteur), et en interaction.

1.2. L'acteur et le système d'action concret

Les acteurs créent le système au travers de leurs relations, des négociations, des échanges, des décisions. Le fonctionnement du réseau de relation est tel qu'il permet de résoudre effectivement les problèmes posés en utilisant les modes de relation habituels. Celles-ci sont créées et maintenues en fonction des intérêts des individus, des contraintes de l'environnement, et donc des modulations proposées par les acteurs.

L'entente entre les acteurs est souvent informelle, implicite, par acceptation de comportements *de facto*. En particulier, si un système ainsi constitué "se dérègle", alors il faut y voir davantage un problème systémique qu'individuel, et il faut tenir compte de l'organisation de fait. Il n'y a pas *a priori* de coupable individuel.

Du point de vue de l'IAD, ceci suggère que les organisations posées a priori ne sont pas forcément idéales, ou que, pour le moins, elles doivent être adaptables de façon autonome. Mais quels sont les mécanismes qui permettent aux acteurs d'évaluer le meilleur comportement ? En pratique, ils cherchent à maximiser leur pouvoir, leur marge de manœuvre. Et cela conduit à une amélioration globale du système par ajustement

Dans l'analyse stratégique de ces systèmes, on distingue les cas où, tout en étant interdépendants (liés par un contexte global), les acteurs ne sont pas ou plus en interaction (liés par des fonctions complémentaires). A la différence de l'analyse systémique, l'interdépendance n'aboutit pas toujours à l'interaction.

1.3. Le système d'action concret et l'organisation

Bernoux [1985] propose la définition suivante : "une *organisation* est un construit humain ou un ensemble humain structuré, constitué de membres y développant des stratégies particulières, et qui les structurent dans un ensemble de relations régulières soumises aux contraintes changeantes de l'environnement, et donc lui-même (l'ensemble) en mouvement permanent." Les ajustements se font par le biais des relations interindividuelles, qui cherchent à reproduire l'ensemble lorsqu'il est perturbé. Il n'y a pas de réorganisation formelle, explicite ; c'est un construit, qui traduit *le système d'action concret*, c'est-à-dire la manière dont les acteurs organisent leurs relations, pour résoudre les problèmes concrets posés par le fonctionnement de l'organisation (ce qui ne correspond

pas forcément aux définitions initiales des fonctions). Ils le font en fonction de leurs objectifs et de ceux de l'organisation. Il y a alors deux régulations internes :

- La régulation des relations, qui est une pratique officielle et effective. Il ne s'agit ni de contraintes normatives (Durkheim), ni de valeurs (Parsons). Il s'agit plutôt d'un contrat posant les concessions réciproques et un compromis sur les contraintes mutuelles.
- Les alliances, qui sont des échanges d'appuis et de confiance, souvent temporaires. Elles reflètent les différences de choix stratégiques pour l'organisation.

Crozier et Friedberg reprennent la notion de *jeu*, en définissant le système d'action concret comme "un ensemble humain structuré qui coordonne les actions de ses participants par des mécanismes de jeu relativement stables, et qui maintient sa structure, c'est à dire la stabilité de ses jeux et les rapports entre ceux-ci, par des mécanismes de régulation qui constituent d'autres jeux". Ces jeux ne sont pas gratuits, de même que les alliances : ils sont liés aux contraintes de l'organisation.

1.4. L'incertitude comme moteur de la dynamique

L'environnement (contraintes qui sont prises en compte dans le jeu des acteurs, et non subies) est fluctuant, et incertain ; et cela détermine la forme même de l'organisation. L'incertitude rentre aussi dans le jeu des acteurs en renforçant ou diminuant leur *autonomie*, et par là leur *pouvoir*.

L'autonomie dépend soit d'une attribution (statut), soit d'une appropriation ("un travail à soi" : compétence et adaptation). Or, avec de l'autonomie, l'acteur a du pouvoir ; car il peut négocier, et monnayer ses capacités d'action. Il se crée donc des marges de liberté. Il faut cependant que « l'autre » ne maîtrise pas cette marge de liberté, et que le comportement reste imprévisible.

L'incertitude vient aussi de l'environnement ; et, si l'adaptation structurelle est nécessaire, il n'y a pas cependant un strict déterminisme des choix stratégiques : les réponses sont multiples.

1.5. Le pouvoir comme problème central dans les organisations.

Il y a toujours des jeux de pouvoirs, et non un simple consensus sur sa répartition. Les objectifs et les moyens de chacun sont différents. Il y a donc souvent conflit. D'où la nécessité d'un pouvoir régulateur de conflits.

Le pouvoir peut, dans une première approche, être considéré comme la capacité pour certains individus ou groupes d'agir sur d'autres individus ou groupes, au sein d'une relation particulière. Il peut y avoir délégation et réciprocité, et l'inférieur peut toujours obéir de différentes façons. Ainsi, par exemple, les différences de perception des problèmes entre subordonnés et cadres conduisent souvent à des discordances dans les priorités. Si la demande du supérieur est pressante, l'inférieur en profitera pour obtenir des avantages variés. Il y a une pression mutuelle possible.

C'est le « changé » qui décide en dernier ressort, c'est-à-dire l'inférieur qui, finalement, contrôle le processus. Il y a donc une stratégie de connaissance des enjeux des supérieurs permettant aux inférieurs de mener leur stratégie. De même, «savoir ce que veut le chef peut être utile pour définir son propre comportement ».

La relation reste cependant déséquilibrée. Les ressources du supérieur sont toujours plus importantes : pouvoir formel (position hiérarchique), maîtrise de l'information, système de relations, capacités d'interventions.

Ainsi on peut aussi poser que le pouvoir de A sur B est la capacité de A d'obtenir de B qu'il fasse quelque chose qu'il n'aurait pas fait sans l'intervention de A (Weber). Mais en fait B peut toujours refuser ou au moins monnayer. Un supérieur vérifie toujours que son ordre est exécutable. Il doit prévoir les blocages et les épreuves de force.

Une définition plus réaliste est donc : «Le pouvoir de A sur B est la capacité de A d'obtenir que, dans sa relation avec B, les termes de l'échange lui soient favorables ».

1.6. Les ressources du pouvoir : contrainte et légitimité.

Le pouvoir peut s'appuyer sur des contraintes liées à l'usage éventuel de la force. Mais tout rapport de pouvoir n'est pas réductible à un rapport de forces : chacun cherche à renforcer l'interaction non violente, avant d'arriver au stade du rapport de force.

La ressource antithétique de la force est la légitimité, c'est-à-dire la capacité pour le détenteur du pouvoir de faire admettre ses décisions. Il y a alors adhésion du dominé. Le supérieur obtient obéissance par sa seule autorité, car il a légitimé l'exercice de son pouvoir, et une relation de confiance s'est instaurée.

Un schéma de pouvoir fonctionnel va chercher à mettre en cohérence pouvoir et autorité.

1.7. Les sources du pouvoir.

Le pouvoir peut s'appuyer sur différentes caractéristiques individuelles :

- *l'expertise* : possession d'une compétence ou d'une spécialisation fonctionnelle difficilement remplaçable, et qui permet de résoudre des problèmes cruciaux ;
- *la maîtrise des relations avec l'environnement* : un « marginal sécant » participant à plusieurs systèmes d'action en relation les uns avec les autres, permet l'échange entre ces systèmes ;
- *la communication* : organisée ou non, elle est toujours déterminante ;
- *la maîtrise des règles organisationnelles* : qui maîtrise les règles peut les utiliser... et leur multiplication favorise ceux qui les connaissent.

Le pouvoir de l'expert présente deux difficultés :

- la nature des problèmes cruciaux n'est pas uniformément reconnue, et l'expertise reste un pouvoir si elle est liée à une situation stable et reconnue dans l'organisation ; la compétence devenant alors un statut ;
- les conclusions de l'expert ne sont pas toujours reconnues, du fait des limites de la « rationalité wéberienne » : les échecs de la science sont liés à son image d'intangibilité, qui ne permet pas sa mise en perspective dans un groupe social.

2. Négociation

DISCUSSION : Les enjeux des systèmes d'information en environnement

Contraintes éthiques

La banalisation des outils informatiques et l'explosion du « multimédia » et des réseaux électroniques mondiaux constituent une conjoncture favorable à une technicisation accrue des processus d'évaluation, de prospective, de décision et de gestion relatifs aux sociétés et à l'espace qu'elles occupent. Dans ce cadre, il paraît nécessaire de s'interroger sur la nature et le rôle des systèmes intégrés d'information et d'aide à la décision destinés à instrumenter la gestion de l'environnement et du territoire. L'inscription de la maîtrise du long terme et du renforcement de la démocratie dans la finalité de ces systèmes impose une remise en question de nombreuses clôtures disciplinaires, ainsi qu'un renversement des priorités dans l'adaptation mutuelle entre informatique et pratiques sociales dans les organisations. Elle justifie d'une réflexion téléonomique sur les choix techniques et les méthodologies de développement. Cette introspection « orientée », en identifiant des besoins insatisfaits, peut susciter concrètement de nouveaux travaux scientifiques (et leurs développements afférents) pour y répondre.

Afin d'aborder ces questions, il faut s'attacher tout d'abord à analyser les circuits de l'information, depuis la production sur le terrain jusqu'à la diffusion finale, en passant par des phases intermédiaires de validation, modélisation, simulation, publication, et des étapes plus abstraites relatives à la négociation et la décision multicritères. Ces processus prenant place à l'interface entre trois systèmes très différents : le système socio-économique, la « nature » et les systèmes informatiques, nous illustrons en particulier que les trois flux informationnels intermédiaires coexistent. Les acteurs ont ainsi une représentation directe de leur environnement, mais ils en ont aussi une représentation au travers de l'ordinateur, qui lui-même peut disposer de certains modèles relatifs à la société et au monde, actualisés par des procédures plus ou moins automatisées. Enfin, l'état de l'environnement traduit souvent une représentation de l'état des sociétés. Dans cette dialectique complexe entre ces trois systèmes, on remarque que seuls les systèmes informatiques sont contrôlables directement par le gestionnaire. Or, dans le contexte actuel de production de la réalité à partir de représentations (liée à la place de la communication dans les processus de

décision), les attendus et la structure des systèmes d'information déterminent en grande partie l'évolution des milieux. Ainsi le développement technique n'est absolument pas abstrait des préoccupations politiques relatives à la démocratie et la maîtrise du long terme. Par conséquent le travail du concepteur doit se faire en conscience des implications socio-politiques des contraintes que son instrumentation impose au processus.

Pour affiner cette idée, nous proposons quelques « pistes » théoriques assorties de propositions techniques concrètes.

1. En matière d'environnement, il n'existe pas d'information absolue. La contingence des données et des constructions induites résulte à la fois des incertitudes inhérentes aux objets complexes considérés, et des traitements implicites opérés par les processus sociaux qui les produisent et les véhiculent. Un système d'information fonctionnel ne peut donc être construit a priori : dès lors que l'information doit servir un processus social, le système devient essentiellement un constructeur de représentations fondées sur d'autres représentations. Cette affirmation a diverses conséquences méthodologiques dont en particulier de grandes exigences relatives à l'interactivité et la transparence des traitements. Plus précisément, nous promouvons ici des systèmes permettant d'explicitier des « points de vue », c'est à dire des sous-ensembles cohérents d'images du monde.
2. La complexité et la taille systémique de l'objet considéré imposent un principe économie dans la quantité d'information utilisée. Une politique discriminante de qualité doit toujours orienter la conception. En effet, s'il est facile de viser une collecte exhaustive, son traitement et son utilisation s'avèrent vite impossible. Un important travail à-priori de choix de données pertinentes doit être fait, dans le respect cependant de la clause 1) ci-dessus énoncée. La double perspective de modélisation de l'environnement et de respect des points de vue doit permettre d'identifier les « bonnes » informations. Nous défendons ici un principe adaptation dynamique des systèmes par sélection « naturelle » relative à l'usage et l'utilité.
3. L'instrumentation informatique des procédures institutionnelles d'affichage, de négociation et décision doit permettre d'améliorer la démocratie, en facilitant la participation citoyenne. En effet en automatisant l'information et la consultation du public, on rend possible sa dissémination, rendue auparavant difficile par les contraintes économiques, spatiales et temporelles. On en systématise le traitement, et on peut

espérer les rendre plus transparentes. Cependant les systèmes doivent être construits dans une perspective d'ouverture du contenu, et non comme un carcan procédural. Car la sauvegarde de leurs marges de manœuvres par les acteurs les conduirait à déplacer les enjeux. Dans cette optique, nous prôtons la mise en place de forums électroniques d'information et de consultation, articulés autour de représentations conviviales de l'environnement et des projets en question. Ces systèmes peuvent supporter l'expression multiformes d'opinions et éventuellement à bas niveau le développement de controverses étayées par des apports scientifiques. Enfin on peut supposer qu'un système bien conçu devrait inciter la participation en produisant des représentations du problème accessibles à tous (cartes alternatives, mais surtout simulations spatio-temporelles).

4. L'expertise est un enjeu majeur de la démocratie et de la gestion prospective. A ce titre, les outils d'aide à l'expertise doivent être pensés d'une part comme des résolveurs partiels des conflits internes au domaine d'expertise, mais aussi et surtout comme des « expliciteurs » des rôles respectifs de l'expert et du décideur politique dans les processus. L'aide à l'expertise ne vise donc pas à remplacer l'expert dans son analyse systémique d'un problème complexe (ce pour quoi il est reconnu), mais plutôt à l'aider à communiquer son expertise et à la situer par rapport à la demande. Ce faisant, on résorbe partiellement une tendance actuelle qui fait de l'expert un médiateur ou un réceptacle à transfert de responsabilité.
5. En France, les décisions collectives relatives à l'environnement et au territoire résultent souvent de grandes négociations multi-acteurs. Or indépendamment des aspects information /consultation déjà cités, les négociations constituent un contexte particulier d'interaction entre acteurs, pour lequel de nombreux progrès peuvent encore être faits dans le sens d'une meilleure prise en compte et échange des positions respectives. La recherche d'un compromis passe par une co-évolution des points de vue et des mécanismes de concession dont l'articulation et la lisibilité extérieure restent problématiques. En particulier la conciliation de l'intérêt collectif instantané avec les exigences de durabilité des milieux doit être explicitée. On reproduit cependant ici encore un principe de précaution visant à garantir aux acteurs des marges de manœuvre identiques à celles existant sans le système. Divers travaux ont porté sur l'assistance informatisée à la négociation, mais très peu considèrent le cas de l'aménagement du territoire où aucune clôture n'est possible en terme de participants ou d'objectifs. Il y a

donc place pour un travail spécifiquement attaché à l'aide à la négociation spatiale ouverte.

6. La compréhension et la maîtrise à long terme des systèmes complexes que constituent la juxtaposition des systèmes sociaux et des milieux anthropisés, passe pour les scientifiques et les décideurs par des outils leur permettant de les appréhender et d'explorer des futurs possibles. Or ces systèmes ne sont pas manipulables expérimentalement dans leur ensemble. Il faut donc en passer par des étapes successives de modélisation, de simulation et d'analyse. Le rôle que sont appelées à jouer ces simulations ne peut que s'accroître dans la mesure où les outils de manipulations des modèles et des simulations sont plus conviviaux et directement utilisables par les experts du domaine. On en vient progressivement à un principe de modélisation interactive et incrémentale distribuée : plusieurs experts collaborent à faire grandir et à affiner un modèle.

Techniquement, il est désormais possible de s'affranchir des contraintes calculatoires antérieures, qui entravaient les approches systémiques dans leur utilisation. En particulier, des modèles informatiques avancés, issus de l'intelligence artificielle distribuée, permettent de transcrire directement dans un modèle opératoire des attributs structurels et fonctionnels d'objets, y compris sous la forme qualitative utilisée dans les descriptions phénoménologiques. On peut donc aider le modélisateur à produire une représentation non contrainte par la quantification, et qui peut être manipulée à l'image d'un objet de laboratoire. Dans le prolongement de ces systèmes, il est nécessaire de poursuivre une réflexion sur les méthodologies afférentes à la simulation, qui inclue des avancées dans le domaine de la communication des modèles et de leurs limitations vers un public non-expert. Ce dernier enjeu est fondamental dès lors que l'on articule des outils d'aide à la décision et la gestion autour de modèles pré-construits, car les décideurs vont les utiliser comme image opératoire du monde. Dans le même cadre, on considère avec attention les perspectives actuelles relatives aux systèmes d'aide à la modélisation, qui devraient faciliter à terme la construction de modèles fonctionnels par des publics même non scientifiques (expression des représentations sociales). La co-construction de modèles par des groupes peut intervenir de la même façon. Enfin les sorties des modèles pourraient être représentées de façon « naturelle », toujours au moyen des nouveaux outils de visualisation 3D.

Après ces quelques pistes, nous souhaitons conclure avec deux principes généraux qui doivent, à notre sens, orienter le développement et la mise en place des futurs systèmes d'aide à la décision et la gestion de l'environnement et du territoire.

D'une part nous insistons pour que soit portée une plus grande attention sur les détournements informationnels que la mise en place de ces systèmes provoque dans les organisations. En effet, dans la mesure même où l'objet de leur existence est constitué de processus socio-politiques (des décisions) et traduit des mécanismes démocratiques, l'information qui sera ainsi instrumentée, et donc « dès-appropriée » par les acteurs, ne pourra plus structurer les schémas de pouvoir antérieur. Or ceux-ci étant des déterminants structurels du fonctionnement des sociétés, leur stabilité est conditionnée par les restructurations qui peuvent avoir lieu. En particulier l'émergence de groupes de pressions autonomes disposant désormais d'un contrôle informationnel renforcé peut conduire les échelons administratifs et institutionnels à reconstituer un pouvoir par des voies procédurales ou autoritaires. La transparence et la démocratisation de l'information sont certes des objectifs souhaitables, mais il faut maîtriser les effets sociaux que leur amélioration peut engendrer. Or le savoir et les recherches relatives à ces aspects intermédiaires entre technique et sciences sociales sont quasi-inexistants. Et les recherches techniques sont loin de prendre en compte ces aspects.

D'autre part, la vocation de ces outils étant d'aider, de faciliter, et à terme d'améliorer les processus socio-politiques d'évaluation et de gestion de l'environnement, leur « ergonomie cognitive » est fondamentale : le système ne doit pas contraindre la représentation, car alors on entrerait effectivement dans un processus de « virtualisation » de l'environnement objet de l'évaluation sociale, qui conduirait inévitablement à moyen ou long terme à des divergences catastrophiques entre modèle et réalité. Cette perspective semble malheureusement se concrétiser peu à peu dans l'utilisation abusive de Systèmes d'Information Géographique pour l'aménagement, considérés comme suffisants pour orienter la décision (le « terrain » devenant l'abstraction). Cette ergonomie cognitive est aussi un prérequis pour l'acceptation et l'utilisation effective des outils par les décideurs ; Elle nécessite donc avant tout développement d'analyser les modèles mentaux manipulés par les futurs utilisateurs ; ceci étant acquis, il est alors possible de travailler à une transcription informatique de ces modèles qui ne les transforme pas structurellement. Comme on peut désormais considérer que la capacité de stockage et de calcul des machines ne constitue plus une contrainte irrémédiable, l'éthique même du développement peut ainsi

être repensée en fonction des finalités, et non plus des moyens. Le caractère sous-optimal et non rationalisé des modèles opératoires doit être accepté et intégré dès lors qu'ils sont ceux des utilisateurs. La modélisation et la gestion de ces systèmes complexes peut conduire la recherche en informatique à davantage se mettre au service et à l'écoute des besoins, afin de répondre non plus à de faux problèmes qu'elle sait déjà résoudre, mais plutôt d'aider à identifier de vrais problèmes qu'elle doit apprendre à instrumenter. Dès lors le rôle technique de l'informaticien(déjà réduit par le développement d'outils conviviaux de développement) doit s'effacer devant celui de « maïeuticien » (accoucheur de problème) et de modélisateur.

Dans les décennies à venir, la maîtrise du long terme et le renforcement de la démocratie vont irrémédiablement dépendre des systèmes de traitement de l'information que nous utiliserons, ne serait-ce que pour des raisons de poids économique et de diffusion des produits vers le grand public. Il est donc indispensable de promouvoir une connaissance et une pratique de ces systèmes qui garantisse que leurs effets soient au moins respectueux des principes et valeurs qui fondent nos démocraties, et que de plus ils participent à l'amélioration de notre environnement à court ou long terme. Cet objectif doit être présent dans tous les nouveaux développements techniques, et peut sans doute amener les communautés concernées de l'informatique à reconsidérer leur pratique et formation, dans la perspective d'une nouvelle « éthique » accompagnée d'un paradigme téléonomique du traitement de l'information qui replace la conception des outils dans le processus social qu'ils instrumentent.

COMPOSANTS ANNEXES DE SANPA

1. Choix d'un modèle d'acteur

L'objet d'une négociation en aménagement est de parvenir à un consensus ou un compromis sur la localisation ou la forme d'un aménagement spatial. On pourrait donc penser que les données topologiques et morphologiques sur le projet constitueraient un bon descripteur de la « position » des acteurs. Mais, après SMAALA, il nous semble que ses entrées sont suffisantes pour définir le point de vue des acteurs. Il n'est donc pas nécessaire de connaître tout le projet proposé par l'acteur. En effet, à partir de ses pondérations et d'autres paramètres, on peut reconstituer la représentation spatiale qu'il manipule.

Cela suppose deux hypothèses fortes : d'une part les cartes de sensibilité produites par l'expertise technique ne sont pas contestables. Cette première hypothèse est discutable, mais il faut cependant noter que le résultat d'expertise qui est souvent contesté est plutôt les fuseaux de moindre impact. Or ceux-ci ne sont ici pas issus de l'expert, mais du système contrôlé par le décideur. Contester les cartes de sensibilité ne peut être fait que dans le pur registre technique, non au plan politique.

L'autre hypothèse est que tous les acteurs utilisent le même système de production de représentations spatiales à partir de systèmes de valeurs. Ceci est difficilement acceptable en terme de psychologie sociale, mais est possible dans le cadre du développement d'un modèle pour l'assistance.

En conséquence le fondement de la représentation des acteurs dans notre modèle sera le *système de pondérations* applicable à SMAALA. On peut d'ors et déjà lui associer un *système de tolérance* pour chacune des valeurs, c'est à dire pour chaque critère un indice de rigidité de la position de l'acteur. Un tel système est largement appliqué en décision multicritères.

Ces pondérations concernent des critères spatialisés. Mais il existe aussi des *critères globaux* non spatialisés comme par exemple le coût ou la durée de réalisation. Ceux-ci peuvent être pondérés et donc pris en compte dans le modèle d'acteur.

Pour les besoins de la dynamique, nous devons introduire un *indice de satisfaction* de l'acteur qui nous permette de modéliser "l'envie de participer" de l'acteur, son intérêt à voir la situation évoluer. Cet indice est peut être positif ou négatif. Il est nul si l'acteur est indifférent au projet.

Cet indice de satisfaction fait référence à l'environnement, c'est à dire au projet spatial, par opposition à la négociation elle-même pour laquelle on pourrait définir un autre indice descriptif de l'inconfort relationnel relatif de l'acteur. Mais cet indice est en fait évaluable indirectement.

Il faut maintenant définir l'acteur socialement. Pour cela nous introduisons d'une part une *identification de l'organisation* qu'il représente ou à laquelle il appartient, et d'autre part un *indice hiérarchique* interne. On spécifie aussi la *taille de la population qu'il représente*. Enfin on indique sa *compétence territoriale* sous la forme d'une carte d'extension d'influence (domaine de compétence).

La description relationnelle est faite par un *indice de charisme (capacité à convaincre)*, et un *facteur de confiance (capacité à tenir sa position)*.

On précise ses contraintes : politiques ou spatiales, sous forme de zones interdites ou obligées, ainsi que de situation relationnelle recherchée ou évitée. Une situation relationnelle est simplement décrite par la donnée de l'ensemble des indices de satisfaction des acteurs.

Enfin on détermine l'ensemble du schéma d'action au moyen de la définition structurée d'ensembles de *buts, plans (stratégies) et ressources disponibles*.

Voici deux exemples d'acteurs selon ce modèle dans un cas de ligne électrique :

Acteur	Représentant d'EDF	Maire de Troufigny
<i>Pondérations spatiales</i>	Figure 41 : Description de deux acteurs 	
<i>Pondération coût</i>	$c = 0,9$	$c = 0,2$
<i>Satisfaction</i>	$s = 10$	$s = -50$
<i>Organisme</i>	EDF	Mairie de Troufigny
<i>Indice Hiérarchique</i>	4	1
<i>Population représentée</i>	0	540
<i>Territoire d'influence</i>	Aire d'étude	Commune de Troufigny
<i>Superficie d'influence</i>	1000 km ²	100 km ²
<i>Charisme</i>	$ch = -1$	$ch = 3$
<i>Confiance</i>	$cf = 2$	$cf = -2$
<i>Zones particulières</i>	!+! postes début et fin de ligne	!-! village de Troufigny
<i>Situations particulières</i>	$s(\text{Maires}) > 0$	
<i>Ressources</i>	!+! argent	!-! argent
<i>Buts <=< Plans</i>	faire la ligne <=< éviter rupture négociation	Maintenir l'école <=< attirer population <=< développer activités

1.1. Dynamique de l'acteur

Dans le cadre de la négociation, le fondement de la communication est d'échanger le schéma d'aménagement à négocier. L'acteur évalue sa satisfaction par rapport à ce schéma. Pour cela il le compare au résultat de son évaluation à partir de SMAALA, ainsi qu'à la satisfaction des contraintes l'intéressant (zones et coûts). En fonction de sa satisfaction, il articule une requête en fonction de ses buts, en spécifiant les ressources dont il a besoin. Il propose donc une alternative d'aménagement, liée à sa requête. Les éléments de charisme et de confiance sont utilisés dans la gestion des protocoles d'interaction. La territorialité est prise en compte dans la détermination de l'influence de l'acteur dans le processus, sachant que des négociations parallèles peuvent avoir lieu pour les différentes parties du territoire.

La discussion est liée à la localisation d'un projet. Mais la nécessité du projet elle-même peut être remise en question par les acteurs. On suppose alors que l'argument est de dire que le projet doit être "nulle-part". Dans le cas contraire, on ramène tout à une localisation.

Donc le processus consiste à avoir une proposition initiale, c'est à dire une localisation. Ce projet est discuté par tous les acteurs. Pour cela il y a :

- Evaluation de projet spatial :
 - par rapport aux valeurs : dans l'absolu

- par rapport aux contraintes : contextualisé
- En fonction du résultat :
 - si pas d'opposition sur la localisation :
 - y-a t'il une opposition de nature autre ?
 - contraire aux objectifs
 - émetteur du projet
 - contre-stratégie
 - Y-a t'il une stratégie afférente à l'acceptation du projet ?
 - si opposition sur la localisation.
 - Raisons ?
 - - valeurs : argumentaire politique
 - - contraintes : argumentaire d'intérêt
 - Que faut-il changer ?
 - - localisation ? cas général : le projet = autrui
 - - système de valeur personnel ? se remettre en question : soi
 - - contraintes ? tolérer : soi
 - A quel prix ?
- Discussion projet
 - contre-proposition spatiale
 - proposition autre : contreparties
 - élaboration d'une stratégie
 - objet : par rapport aux possibilités de manipuler le projet
 - relationnelle : manipuler les personnes et laisser une place aux autres
 - évaluer les valeurs d'un autre
 - évaluer ses contraintes
- Discussion autre
 - mes objectifs (buts)
 - proposition de stratégies relationnelles

Le message d'argumentaire produit en retour peut inclure :

- un tracé
- un autre contenu :

- spatial : pas chez moi, par la, au nord OU
- objectal QUOI
- procédural : COMMENT
- relationnel QUI
- motivations POURQUOI
- primitive de protocole, et contenu procédural

2. Les messages

2.1. Echange de messages

Un message est composé avec l'aide l'AA sous la forme d'un fichier type HTML. Une référence (URL) est expédiée à l'AP au moyen d'une communication quelconque... L'AP vérifie la forme et la présence du message. Il le recopie dans sa base de messages. Il envoie à l'AA émetteur un Accusé de Réception, puis distribue une référence message aux destinataires. Ceux-ci à la réception du message vérifient la référence et renvoient un Accusé de Réception à l'AP, qui répercute à l'AA émetteur en y ajoutant l'information sur l'état de l'acteur destinataire. Un message arrivé à un acteur actif est réputé "présenté" ; son état est modifié au niveau de l'archive AP. Si l'acteur est inactif au moment où le message lui arrive, l'AA envoie l'Accusé de Réception et l'AP, sachant que l'acteur destinataire est inactif change en conséquence l'état du message. Dès que l'acteur se réactive, l'AP, informé de cette modification, renvoie un signal de présentation aux AA émetteurs de tous les messages non encore présentés.

Ce système permet en particulier aux AA émetteurs de contrôler les temps de réponse aux messages, et d'informer leur acteur que soit un message a été présenté et reste sans réponse, soit que ce message n'a pas été présenté et que donc il est normal qu'il reste sans réponse.

Certains message pourraient avoir un statut d'alerte, c'est à dire demander à l'AA destinataire de signaler explicitement une urgence à son acteur qu'il soit actif ou non (changement éventuel de l'icône AA avec un drapeau rouge).

Deux types d'assistance concernent les messages : priorité et hiérarchie, et composition.

2.2. Hiérarchisation des messages par l'AA

Le calcul de priorité ou hiérarchisation fait appel à différents critères, chaque critère reçoit une valeur normalisée :

- Date du message : le dernier arrivé est le dernier traité (à la queue... : FIFO)
- Emetteur : La priorité des agents émetteurs est fonction de différents sous-critères (sous forme d'une valeur entre 0 (agent refusé) et 100 (agent prioritaire absolu)
 - l'agent émetteur agit-il pour lui même ou comme représentant d'un acteur ?
 - si l'agent est autonome : le message est présenté à part, et peut être masqué (cas des Accusés de réception).
 - si l'agent est assistant :
 - l'état des protocoles en cours avec l'acteur
 - une priorité explicite associée à l'acteur (décision prise par l'acteur propriétaire)
 - les refus de communiquer avec certains agents
 - une hiérarchie organisationnelle de l'acteur émetteur
 - son pouvoir relatif selon les différents termes descriptifs du modèle d'acteur (charisme, aire d'influence, ressources connues)
- Destinataire : message privé ou 'broadcast^a. Un message privé mérite souvent de réagir plus vite (par opposition à une lettre ouverte)
- Sujet : hiérarchie des sujets donnée par l'acteur sujet, ou liste de sujets préférés connus *a priori*.
- Référence : la priorité des messages est liée avant tout aux protocoles en cours. Un message en référence "nil" est forcément un message "intro". Toute autre référence inscrit le message de fait dans un contexte.
- Type : lié à référence, le calcul de priorité est ici lié aux différentes injonctions : une question attend plus vite une réponse, qu'une affirmation une dénégation, par exemple

- Force : non utilisé, maintenu par compatibilité avec ILAPI.
- Contenu : Ici on utilise les mots clés cachés derrière les champs spécifiques, et on peut jouer avec ces mots clés. Le principe est détaillé plus loin.

Chacun des critères de hiérarchisation a une valeur pour chaque message. A partir de ces valeurs il faut déterminer la priorité finale du message. Pour ce faire on doit appliquer à chaque critère une importance relative. Par exemple : 2 messages différents arrivent du même émetteur. A priori le plus ancien est traité en premier (Date). Mais en fait c'est beaucoup plus compliqué, car si le premier porte sur un nouveau sujet, alors que le deuxième est une demande d'accord sur un sujet jugé important, le deuxième passe en premier. Ainsi on a tout un jeu sur les critères. En général la date passe en dernier (critère le moins distinctif). Pour le reste il faut préciser un choix au début (apprentissage pour l'assistant)

Le choix retenu initialement consiste à effectuer un calcul de priorité essentiellement fondé sur les protocoles, c'est à dire sur l'urgence plus ou moins grande à suivre un protocole. Le critère 2 est l'émetteur. En 3 la date.

On peut envisager un apprentissage de l'AA relativement au sujet : par exemple, si l'acteur répond toujours vite aux messages portant sur la forêt alors le poids de la forêt doit être augmenté.

2.3. Texte des messages : principe des champs "pré-cablés"

Les textes des messages contiennent des champs prédéfinis correspondant à des classes d'objet particulières, et suscitant des actions ou des visualisations spécifiques. L'idée est de prolonger HTML dans un cadre dédié à cette application.

Considérons les textes suivants :

1. "La maison est trop près de la route"
2. "Voici une photo du paysage si la ligne passe au nord du terrain de Toto"
3. "Êtes-vous d'accord avec la proposition de Tata concernant le refus d'une construction dans la bande littorale ?"

Dans lesquels on a un ensemble de mots correspondant à des concepts “classiques” : maison, près de, route, photo, ligne, passe, au nord, terrain, Toto, accord, refus, construction, bande littorale.

Les classes d’objets correspondants sont :

- GeoObjet : maison, route, ligne
- GeoConcepts : paysage, littoral, montagne, vallée
- Zone : terrain, bande littorale
- Acteur : Toto, Tata
- Sujet : “le terrain de Toto”, “construction en zone littorale”
- Message : “la proposition de Tata etc...” = mess id.
- GeoAction : construction, passe
- GeoRelateur : au nord, pres de, dans
- Acte de Langage : accord, refus, proposer, affirmer, question
- Images : idem HTML
- SmaalaProjet : la route de 1, la ligne de 2, la construction de 3
- Adverbe comparatif : trop, plus, moins, assez
- Conjonct : si, quand, où

On a aussi toutes les classes HTML standard, y compris les applets, mais leur rôle est un peu différent dans la mesure où elles gèrent surtout le format d’affichage.

Si on reprend le codage réel (forme du texte enregistré), on a :

1. “**La** <GEOOBJ REF = “m001” TYPE = “maison” LOC = “(222,333)”> **maison** </GEOOBJ> **est** <GEOREL TYPE=“prox” VAL=“+”> <ADV> **trop** </ADV> **près de**</GEOREL> **la** <SMAALA REF = “projcourant” ID = “fuseau2”><GEOOBJ REF = “r001” TYPE = “route” > **route** </GEOOBJ> </SMAALA>.”
2. “**Voici une** <IMAGE src=“monhome/mondossier/paysage”> **photo du** <GEOCONC> **paysage** </GEOCONC> </IMAGE> <CONJ> **si** </CONJ> **la** <SMAALA REF = “projcourant” ID = “fuseau1”><GEOOBJ REF = “l001” TYPE = “ligne THT” > **ligne** </GEOOBJ> </SMAALA> <GEOACT > **passe** <GEOACT> **au** <GEOREL TYPE=“dir” VAL=“N”>**nord du**</GEOREL> <SUJET REF=“s003”> <ZONE

REF="a002" TYPE="aire"> **terrain de** <ACTEUR REF="Toto"> **Toto** </ACTEUR>
</ZONE> </SUJET>.”

3. “**Etes-vous** <LANGACT TYPE="accord"> **d'accord** </LANGACT> **avec**
<MESSAG ID = "mes004"> **la** <LANGACT TYPE="propose"> **proposition**
</LANGACT> **de** <ACTEUR REF="Tata"> **Tata** </ACTEUR> **concernant le**
<LANGACT TYPE="refus"> **refus** </LANGACT> **d'une** <SUJET REF="s006">
<GEOACT> **construction** </GEOACT> <GEOREL TYPE="pos" VAL="+">**dans**
</GEOREL> <ZONE REF="a005"> **la bande** <GEOCONC> **littorale**
</GEOCONC> </ZONE> </SUJET> </MESSAG> ?”

Et l’affichage fait alors appel à des menus déroulants (« popup ») qui apparaissent quand on clique sur un mot et donnent les champs englobants : ex : “construction” de 3 est un GEOACT inclus dans un SUJET, dans un MESSAGE, ou Toto est un ACTEUR dans une ZONE d’un SUJET

L’objectif des champs est :

- de gérer leur présentation dans le texte (cas des applets, des cartes, des images)
- de permettre l’appel d’actions attachés (URL, LANGACT)
- d’accéder à des enrichissements : appel des messages de référence, fenêtres ACTEUR, localisation des GEOOBJ, appel à SMAALA

2.3.1 Liste des champs et propriétés

Nom	Paramètres	Action	Syntaxe
<i>Champs HTML standard</i>	Variable	Variable (accès URL, applet)	Variable
GEOOBJ	REF : référence objet TYPE : type objet	Visualisation sur la carte	Liaison SMAALA
GEOCONC			
ZONE	REF : référence objet	Visualisation carte	Liaison SMAALA
ACTEUR	REF : id. acteur	Appel fenêtre acteur	
SUJET	REF : référence sujet	Appel historique sujet	

MESSAGE	REF : référence message	Appel visu. message	
GEOACT			<GEOACT> <GEO*>
GEOREL	TYPE : pos., dir., prox. VAL : +,-, N, S, D, etc.	Visu. Spatiale variable	<GEOACT> <GEOREL> <GEO*>
LANGACT	TYPE : cf. protocoles	Visu structure protocole	
SMAALA	REF : réf. Projet ID : réf. Objet	Visu. SMAALA	
ADV			<ADV><GEOREL> ou <ADV><LANGACT>
CONJ			

Figure 42 : Les types de champs des contenus de messages SANPA

2.3.2 Enrichissement du lexique

Dans le principe la liste des champs possibles (le langage) est fixée *a priori*. C'est à dire qu'à la construction du système on donne la liste ci-dessus (plus les champs HTML standard) et on ne la modifie plus. Par contre pour chaque champ il est possible d'enrichir le lexique en cours de processus. C'est à dire que si par exemple un acteur veut utiliser un nouvel objet géographique, il doit pouvoir le faire de façon efficace et cohérente avec le reste de SANPA. Pour ce faire on doit permettre l'ajout dans le lexique d'un nouveau terme. Comme le lexique est géré par l'AP, il faut que celui accepte la modification. Un ajout de concept suppose que soit connu ses propriétés en terme d'affichage et d'action engendrée. On détaille cela plus loin pour les différents champs.

En pratique l'utilisateur tape le mot puis quand il clique dessus le menu popup contient l'option <nouveau> ; il accède alors à un menu de choix de champs, puis à un détail pour préciser les propriétés spécifiques. Le lexique est directement mis à jour pour tous les utilisateurs. Eventuellement pour chaque mise à jour on peut prévoir un message d'annonce signifiant aux autres acteurs la modification. De tels messages peuvent être stockés individuellement et lus spécifiquement au besoin (ce ne sont pas des messages internes à la négociation).

2.4. Structuration du texte par l'AA

Lorsqu'un utilisateur novice utilise le système il peut taper directement le texte de son message sans passer par la structuration. Mais alors une des fonctions de l'AA doit être de parcourir le message et de rechercher les mots déjà connus dans un lexique. S'il s'en trouve, alors il peut proposer de structurer automatiquement le texte, soit interactivement, soit directement. De façon générale, tout texte est parcouru et comparé au lexique disponible, puis structuré en fonction. On peut imaginer que des ambiguïtés apparaissent, il faut donc prévoir une validation sur le mode des correcteurs orthographiques. Par ailleurs, le mode général de fonctionnement doit être paramétrable. On doit pouvoir choisir entre aucun parcours du texte, un parcours avec validation, un parcours automatique.

3. Spécifications relatives aux objets spatiaux et au SIG intégré

Le noyau SIG de SANPA doit conserver l'ensemble des fonctionnalités classiques d'un SIG, c'est à dire :

- gestion des données
- présentation des données
- analyse spatiale

Avec en complément le fait de travailler sur des bases de données distantes avec des acteurs distants.

On utilise un format de stockage très simple avec deux types de support :

- Image : (raster) fonds GIF ou JPEG (à choisir), avec un référencement géographique
- Objet : des objets géographiques qui peuvent être soit passifs soit « portés » en agents

Pour les objets, le principe est de dénoter des polygones ou polygones ou mêmes points. On a donc un format de base du type :

- ID : identifiant
- type : point, segment, polygone, polygone
- famille : type d'objet spatial
- coord : nombre de points, liste de points en coordonnées spatiales
- attribut : variable selon le type

Il faut donc disposer d'un fichier de standardisation avec les contenus des attributs pour chaque type. Ces attributs seront présentés lors des appels d'objets.

Par ailleurs, on a pour chaque utilisateur un style qui décrit comment les objets sont affichés en fonction de leur type et attributs éventuellement (feuille de style).

Enfin il faut prévoir les attributs agents qui doivent être partagés par une famille d'objets.

En résumé et par exemple, on a :

ID : 0001
type : 4
famille : bâtiment
coord : 3, 123 246, 135 246, 135 235
attribut : Proprio : toto
Couleur : blanche
Type : chalet

3.1. Fonction de bases

i. Affichage des objets

A partir de ce format de données, le premier problème est d'afficher les objets dans l'espace avec éventuellement un fond. On a les coordonnées, et à partir des fichiers de style on peut préciser comment choisir la forme et la couleur

ii. Sélection d'un objet

Il s'agit de pouvoir choisir un objet à la souris et d'afficher ses attributs en format texte dans un premier temps.

iii. Zooming

iv. Déplacement d'objets

v. ajout / retrait d'objets

vi. édition d'attributs

3.2. Fonctions agents

On transforme en agents certains objets selon le modèle SMARRPS en leur donnant en plus :

- une balistique

- des interactions avec l'environnement : le fond de carte, et les objets non actifs
- des interactions avec les autres agents : en fonction de leur type et d'autres paramètres
- un contrôle par l'utilisateur

Les agents « objets spatiaux » peuvent être utilisés dans le noyau SMAALA de résolution de problèmes.

3.3. Mécanismes partagés

Il s'agit que plusieurs utilisateurs ajoutent en commun des objets dans la base ou les manipulent. Dès lors il faut s'assurer du maintien de cohérence. A cet égard les agents peuvent assurer par eux-même la cohérence en notifiant qu'ils ne peuvent obéir à la demande. Par défaut les objets déplacés deviennent des agents réactifs spatiaux (ARS).

L'autre aspect du partage est lié à la multiplication des bases distantes utilisées. Ce problème n'est pas abordé, on suppose les bases locales.

3.4. Liens avec les contenus SANPA

Il faut que les objets appelés à partir des contenus de SANPA soient activables.

3.5. Données géographiques partagées

Les données géographiques partagées dans un projet : les fonds de carte diffusés par les fournisseurs classiques, les cartes d'analyse produites par les experts (2 types essentiels : cartes d'enjeux (état du monde) et cartes de sensibilité (impact potentiel du projet sur les enjeux), les cartes d'analyse sont classées par critère ou thème.), des bases de données vectorielles (objets spatiaux) qui complètent les fonds, des collections d'objets "projet" manipulables : symboles mesures compensatoires (argent !), arbres à planter, aménagements divers à prévoir, contraintes fortes à respecter avec indication du propriétaire de la contrainte.

Quelques résultats pratiques

1. Résultat d'un modèle booléen à 5 agents

$I :$
 $0 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2$
 $1 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2$
 $2 \quad 0 \quad 2 \quad 0 \quad 0$
 $2 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \quad 0$
 $2 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 2$

$A : 0 / 0 / 0 / 0 / 0 /$
 $P : 1 / 0 / 0 / 1 / 1 /$

$$\Delta(x_i) = (p_i == e(x_i)) + \sum_{j \in I_i} (r_{ij} == x_j)$$

$E : 0 / 0 /$ 1 cycles [30 31] : 8 : 10 : 12 : 14 : : 1 : : 3 : : 5 : : 7 : : : 16 : : : 18 : : 21 : : 23 : : : 24 : : : 26 : 28 9 11 13 15 : 0 : 2 : 4 : 6 : : 17 : : 19 : 20 : 22 : : 25 : : 27 29	$E : 1 / 0 /$ 1 cycles [30 31] : 2 : 6 : 10 : 14 : : 17 : : 19 : : : 26 : : : 21 : : : 24 : : 23 1 3 5 7 9 11 13 : 16 : 20 15 : 18 : : 27 : 22 : : 25 29 : 0 : 4 : 8 : 12 : 28	$E : 0 / 1 /$ 1 cycles [27 31] : 8 : 9 : 10 : 11 : 12 : 13 : 14 : 15 : : 0 : : 1 : : 2 : : 3 : : 4 : : 5 : : 6 : : 7 : 20 : 21 : 22 : 23 : : 16 : : 17 : : 18 : : 19 : 24 : 25 : 26 : 28 : 29 30	$E : 1 / 1 /$ 1 cycles [27] 26 30 31 : 1 : 2 : 3 : 5 : 6 : 7 : 9 : 10 : 11 : 13 : 14 : 15 : 17 : 18 : 19 : 21 : 22 : 23 : 25 : 29 : : 0 : : 4 : : 8 : : 12 : : 16 : : 20 : : 24 : : 28
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\Delta(x_i) = (p_i == e(x_i)) + \sum_{j \in I_i} (x_i == x_j)(r_{ij} == x_j)$$

$E : 0 / 0 /$ 2 cycles [14 15] : 0 : 2 : 4 : 6 : : 9 : : 11 : : 17 : : 19 : : 21 : : 23	$E : 1 / 0 /$ 2 cycles [28 29] : 0 : 4 : 12 : : 17 : : 21 : : : 8 : : : 24 1 5 13	$E : 0 / 1 /$ 3 cycles [11 15] : 0 : 1 : 2 : 3 : 8 : 9 : 10 4 5 6	$E : 1 / 1 /$ 2 cycles [25 29] : 0 : 1 : 8 : 9 : 16 : 17 : 24 4 5 12
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> : : : 24 : : : 26 : 12 1 3 5 7 : 8 : 10 : 16 : 18 : 20 : 22 : : 25 : : 27 13 [30 31] : 28 29 </pre>	<pre> : 16 : 20 : : 9 : : 25 [30 31] : 2 : 6 : 14 : : 19 : : : 26 : : 23 : : : 10 3 7 15 : 18 : : 27 : 22 : : 11 </pre>	<pre> 7 12 13 14 [19 23] : 16 : 17 : 18 20 21 22 [27 31] : 24 : 25 : 26 28 29 30 </pre>	<pre> 13 20 21 28 [27] 6 7 14 15 22 23 26 30 31 : 2 : 3 : 10 : 11 : 18 : 19 </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

$$\Delta(x_i) = (p_i = e(x_i)) \times \prod_{j \in I_i} (x_i = x_j)(r_{ij} = x_j)$$

<pre> E : 0 0 1 cycles [0 4] : 1 2 : 3 : 7 : 11 : 15 : 19 : 23 : 27 : 31 5 6 8 9 10 12 13 14 16 17 18 20 21 22 24 25 26 28 29 30 </pre>	<pre> E : 1 0 1 cycles [0 1] : 2 : : 3 : : 7 : : 11 : : 15 : : 19 : : 23 : : 27 : : 31 : 4 : 6 : 8 : 10 : 12 : 14 : 16 : 18 : 20 : 22 : 24 : 26 : 28 : 30 5 9 13 17 21 25 29 </pre>	<pre> E : 0 1 1 cycles [0 4] : 1 2 3 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 : 24 : 25 : 26 : 27 : 28 : 29 : 30 : 31 17 18 19 20 21 22 23 </pre>	<pre> E : 1 1 1 cycles [0 1] : 2 : 4 : 6 : 8 : 10 : 12 : 14 : 16 : : 25 : : 27 : : 29 : : 31 : 18 : 20 : 22 3 5 7 9 11 13 15 17 : 24 : 26 : 28 : 30 19 21 23 </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\Delta(x_i) = \left(p_i = \sum_{j \in I_i} (x_i = x_j)(r_{ij} = x_j) \right) = e(x_i)$$

<pre> E : 0 0 4 cycles [0 20 24 12 16 28] : : : : : 8 4 [1 21 25 13 17 29] : : : : : 9 </pre>	<pre> E : 1 0 2 cycles [11] 0 1 2 3 : 12 </pre>	<pre> E : 0 1 1 cycles [28] 12 : 16 : : 26 : : 27 : 17 </pre>	<pre> E : 1 1 8 cycles [0 11] 19 : 24 [1 10] 18 </pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

5 [2 22 26 10 30] : : : : 18 : : : : : 6 : : : : : 14 [3 23 27 11 31] : : : : 19 : : : : : 7 : : : : : 15	: 13 : 14 : 15 : : 26 : : 27 : 28 : 29 : 30 : 31 4 5 6 7 8 9 10 24 25 [19] 16 17 18 20 21 22 23	: 18 : 19 : 20 : : 0 : : 1 : : 2 : : 3 : : 4 : : 5 : : 6 : : 7 : : 8 : : 9 : : 10 : : 11 : : 24 : : 25 : 21 : 22 : 23 13 14 15 29 30 31	: 25 [2 9] 17 [3 8] 16 [12 15] : 4 : : 23 7 : 20 : : 27 [13 14] : 5 : : 22 6 : 21 : : 26 [28 31] [29 30]
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\Delta(x_i) = \sum_{j \in I_i} (x_i = x_j) ((r_{ij} = (p_i = e(x_i))) = x_j)$$

<i>E</i> : 0 / 0 / 4 cycles [0 28 8 4 16 12] : : : : : 24 : : : : : 20 [1 29 9 5 17 13] : : : : : 25 : : : : : 21 [2 30 10 6 18 14] : : : : : 22 : : 26 [3 31 11 7 19 15] : : : : : 23 : : 27	<i>E</i> : 1 / 0 / 1 cycles [3 11] : 0 : 1 : 2 : 4 : 5 : 6 : 7 : 24 : 25 : 26 : 27 : 28 : 29 : 30 : 31 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23	<i>E</i> : 0 / 1 / 2 cycles [12] 13 14 15 16 : 4 : : 8 : : 9 : : 10 : : 11 : : 20 : : : 6 : : : 7 : : : 24 : : : 25 : : 21 : : 22 : : 23 : 5 : 26 : 27 17 18 19 [28] 0 1 2 3 29 30 31	<i>E</i> : 1 / 1 / 8 cycles [0 11] : 4 : : 23 19 : 24 [1 10] : 5 : : 22 18 : 25 [2 9] 17 : 26 [3 8] 16 : 27 [12 15] 7 : 20 [13 14] 6 : 21 [28 31] [29 30]
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliographie

- Agre, P.E. et Chapman, D., 1987, Pengi: an implementation of a theory of activity, *In Proceedings of the 6th National Conference on Artificial Intelligence*, Seattle: AAAI.
- Aida S., Allen P.M., Atlan H. et al., 1986- *Science et pratique de la complexité*. Documentation française, Paris.
- Aron, R., 1967, *Les étapes de la pensée sociologique*, Paris : Gallimard
- Aubin J.P., 1991 - *Viability theory*. Birkäuser.
- Aubin J.P., 1992- *Neural Networks & Qualitative physics : a viability approach*. Cours université Paris-Dauphine, Paris.
- Baeijs, C., Demazeau, Y., 1996, "Les organisations dans les systèmes multi-agents", *4èmes Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, PRC-IA, Toulouse, France, février 1996.
- Baeijs, C., Demazeau, Y. et Alvares, L., 1996, SIGMA: Application of Multi-Agent Systems to Cartographic Generalization, in LNAI 1038, "Agents Breaking Away", Proceedings of 7th European Workshop MAAMAW 96, edited by W. Van de Velde
- Barouch G., 1989 - *La décision en miettes. Systèmes de pensée et d'action à l'œuvre dans la gestion des milieux naturels*. L'Harmattan, Paris.
- Bastide, R., 1992. *Objets coopératifs : un formalisme pour la modélisation des systèmes concurrents*. Thèse de doctorat. Toulouse : Université Paul Sabatier.
- Bellenger, L., 1984, *La Négociation - Que Sais-Je ?* - Puf
- Bellman R.E., Zadeh L.A., 1970- *Decision making in a fuzzy environment*. in Management Science, 17, 4, 141-164.
- Bernoux, P., 1985, *La sociologie des organisations*, Paris : Points - Seuil
- Boissier, O., 1993, *Problème du contrôle dans un système intégré de vision - Utilisation d'un système multi-agents*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Bond, A., et Gasser, L., éditeurs, 1988, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann.
- Bonabeau, E., Theraulaz, G., 1994, *Intelligence Collective*. Paris : Hermès.
- Boudon, R., & Bourricaud, F., 1982, *Dictionnaire critique de la sociologie*, Paris : PUF
- Bourdieu, P., Chamboredon, J.-C., et Passeron, J.-C., 1968, *Le métier de sociologue*, Paris : Mouton-Bordas.
- Bourgine, P., ?, *Résolution de Problèmes*, CEFIAR-COGNITIVA.
- Bousquet, F., Cambier, C., et al., 1993, « Simulating the Interaction between a Society and a Renewable Ressource », *Journal of Biolog. Systems.* **1**(2), p.199-214.

- Brassac, C., & Sylvie Pesty, 1996, "La Pelouse Fourmilière. De la coaction à la coopération", dans *IA Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, 4^{èmes} Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, AFCET & AFIA, Le Grau du Roi, France, Müller & Quinqueton, eds, pp. 250-263, Hermes, France.
- Brooks, R. A., 1985, A Robust Layered Control System for a Mobile Robots, in *Journal of Robotics and Automation*, Vol RA-2, N°1.
- Brunet, R., 1974, « Espace, perception et comportement ». *L'espace géographique*. N° 3 - 74, pp. 189-204, Paris : Doin.
- Bura, S., Guérin-Pace, F., *et al*, 1993, « Multi-Agents Systems and the Dynamics of a Settlement System ». *Simulating Societies Symposium*. Sienna, C. Castelfranchi (Ed.).
- Carver, 1996, Collaborative Spatial Decision-Making, *NCGIA Initiative 17 First Specialist Meeting.*, Santa Barbara, California, National Center for Geographic Information and Analysis, NCGIA. *Http ://www.ncgia.ucsb.edu*
- Casti J.L., 1989- *Alternate Realities. Mathematical models of nature and man*. J. Wiley, New-York.
- Casti, J.L., 1994, *Complexification - Explaining a paradoxical world through the science of surprise*. New York : HarperCollins Pub.
- Chaib-Draa, B., Moulin, B., *et al.*, 1992, « Trends in Distributed Artificial Intelligence ». *Artificial Intelligence Review*, vol.6, pp. 35-66.
- Chatila, R., 1994, Control Architecture for Autonomous Mobile Robots, in *Proceedings of PERAC Conference*, Lausanne, IEEE Press.
- Chu-Carroll, J ; Carberry, S., 1995, *Response Generation in Collaborative Negotiation*. ACL95.
- Clément, F., Tjoelker, To, 1992, *Gestion stratégique des territoires*. Paris : L'Harmattan.
- Cohen De Lara M., 1992 - *Modélisation des systèmes biologiques*. cours ENGREF, Paris.
- Cohen, P. R., Greenberg, M. R., *et al*, 1989, « Trial by fire : understanding the design requirements for agents in complex environments ». *AI Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 34-48.
- Collins, H.M., 1990, *Artificial Experts - Social knowledge and intelligent machines*. Cambridge : MIT Press.
- Corkill, D.D., 1979, Hierarchical planning in distributed environment, in *Proceedings of IJCAI 79*, pp 168-175.
- Cottrell, M., Fort, J.C., Pagès, G., ?, Two or three things we know about the Kohonen algorithm. In ?.
- Crozier, M. & Friedberg,.,1977, *L'acteur et le système*. Paris : Seuil.
- D'andrea-Novel, B., Cohen De Lara, M., 1991, - *Cours d'automatique*. cours ENGREF, Paris.

- DATAR, 1993, *Débat National pour l'Aménagement du Territoire, Document Introductif*, Documentation Française.
- Davis, R., Smith, R., 1981, Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. Memo 624, MIT AI Lab., Cambridge.
- De Montgolfier, J.-M., Natali, J.-M., 1987, *Le patrimoine du futur - Approches pour une gestion patrimoniale des ressources naturelles*. Paris : Economica.
- Demazeau, Y., 1991, « Coordination patterns in Multi-Agent Worlds : Application to robotics and computer vision », in *proceedings of the IEEE colloquium on intelligent agents*, London : IEEE.
- Demazeau, Y., 1993, "La Plate-forme PACO et ses Applications", *2èmes Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, PRC-IA, Montpellier, France, décembre.
- Demazeau, Y., 1995, "From Cognitive Interactions to Collective Behaviour in Agent-Based Systems", 1st European Conference on Cognitive Science, Saint-Malo, France, avril 1995.
- Demazeau, Y., 1997, *Systèmes Multi-Agents*, Recueil de tutoriaux. Grenoble : Leibniz.
- Demazeau, Y., Collinot, A., eds, 1994, Actes de la 3^{ème} Journée Nationale sur les Systèmes Multi-Agents, PRC-GDR IA, MARCIA, LAMSADE, Paris, France, LIFIA Publ., Grenoble, décembre, France.
- Demazeau, Y. et Müller J.P., 1991, from reactive to intentional agents, in *Decentralized Artificial Intelligence 2*, edited by Y. Demazeau et J.-P. Müller, pp 3-10, Amsterdam : North-Holland.
- Dreyfus, L. H., 1984, *Intelligence Artificielle - Mythes et limites*, Flammarion.
- Drogoul, A., 1993, De La Simulation Multi-Agents A La Résolution Collective de Problèmes, Thèse de Doctorat en Informatique de l'Université Paris VI, Paris: LAFORIA.
- Drogoul, A., et Dubreuil, C., 1992, Eco-Problem-Solving Model : Results of the N-Puzzle, in *Decentralized Artificial Intelligence 2*, edited by Y. Demazeau et J.-P. Müller, Amsterdam : North-Holland
- Drogoul, A., Ferber, J., 1994, « Multi-Agent simulation as a tool for modeling societies : application to social differentiation in ant colonies ». *Artificial social systems*, vol. 830, C. Castelfranchi & E. Werner (Eds.), pp. 3-23, Berlin : Springer-Verlag.
- Dupont, C., 1994, - *La Négociation - Conduite, Théorie, Applications*, Dalloz.
- EasterBrook, S., ed., 1992, *CSCW : Cooperation or Conflict ?* Springer Verlag.
- Erceau, J., Ferber, J., 1993, Introduction aux premières journées francophones d'intelligence artificielle distribuée et systèmes multi-agents. *Actes des Ières JFIADSM*. IRIT : Toulouse.
- Ferber, J., 1987, « Des objets aux agents : une architecture stratifiée ». In *Sixième congrès RFIA*, Antibes : AFCET.
- Ferber, J., 1989, Eco Problem Solving: How to Solve a problem by interactions. Proc. Int. Workshop Distributed Artif. Intell., 9th. Seattle, WA.

- Ferber, J., 1994, *Reactive Multi-Agent Systems: Principles and applications*, In *Fundamentals of Distributed Artificial intelligence*, edited by N. Jennings, Amsterdam: North Holland.
- Ferber, J., 1995, *Systèmes Multi-Agents*. Paris : InterEditions.
- Ferber, J., 1995b, *Modélisation multi-agent : un outil d'aide à la simulation de phénomènes complexes*, in *Lettre de l'Environnement, Revue du CNRS*, Paris :CNRS.
- Ferber, J. Drogoul, A., 1992, *Using reactive multi-agent systems in simulation and problem solving*. In *Distributed Artificial Intelligence: theory and practice*. edited by L. Gasser and N. Avouris, Kluwer Academic Publishers,.
- Ferber, J., Jacopin, E., 1991, *The framework of Eco-Problem Solving*, in *DECENTRALIZED A.I. 2*, pp. 181-193, Y. Demazeau & J.-P. Müller, eds, North-Holland, Amsterdam: Elsevier.
- Ferber, J., Müller, J.-P., 1996, *Influences and Reaction : a Model of Situated Multiagent System*. ICMAS 1996.
- Ferrand, N., 1991- *Aperçu sur l'état des recherches en sciences cognitives*. Rapport interne Dassault Aviation, Paris.
- Ferrand, N., 1992a- *Surveillance et Monitoring des Incendies de forêts. Situation actuelle. perspectives d'ingénierie et de technologies aérospatiales*. Rapport interne Dassault Aviation, Paris.
- Ferrand, N., 1992b, *Théories et modèles pour les systèmes complexes - Application aux systèmes d'aide à la décision dédiés à l'aménagement et la gestion du territoire*. Projet de recherches. [Http ://leibniz.imag.fr/MAGMA/ferrand/](http://leibniz.imag.fr/MAGMA/ferrand/)
- Ferrand, N., 1995a, *Système Multi-Agent Réactifs d'aide à la localisation de fuseaux de moindre impact pour des aménagements linéaires*, draft report, Grenoble : LIFIA-UJF.
- Ferrand, N., 1995b, *Multi-Reactive-Agent Paradigm for spatial modelling*, contribution au *GISDATA - ESF specialist meeting on « Spatial Models and GIS »*, Stockholm, juin.
- Ferrand, N., 1996, "Modelling and Supporting Multi-Actor Spatial Planning Using Multi-Agent Systems", 3rd NCGIA conference on GIS and Environmental Modelling, Santa Fe, USA, January 1996.
- Ferrand, N., 1997, *Systèmes d'Information pour la Gestion de l'Environnement et du Territoire*, in *Revue de Géographie Alpine*, A paraître.
- Ferrand, N., Baeijs, C., Demazeau, Y., 1997, *Systèmes Multi-Agents Réactifs et Résolution de Problèmes Spatialisés*. *Revue d'Intelligence Artificielle* (A paraître), Paris : Hermès.
- Ferrand, N., et Demazeau, Y., 1994, *Multi-agents et multi-décisions en aménagement du territoire*, in *Actes des journées environnement du CNRS*, Montpellier, Paris : CNRS.
- Ferrand, N., Ferrent, P., 1997, *SANPA : un Système d'Aide à la Négociation de Projets en Aménagement*. A paraître dans : *actes de la Conférence « Informatique et Environnement »*. Strasbourg : INRIA.

- Ferrand, N., Labbi, A., Giacometti, A., Amy, B., Demazeau, Y., 1994, "Entre Systèmes Multi-Agents Réactifs et Réseaux d'Automates", *3^{ème} Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents*, PRC-IA, Paris, France, décembre.
- Ferrand, N., Michelland, D., 1995, "Intégration expertise/décision dans l'analyse spatiale des projets d'infrastructures : instrumentation multi-agents", *2^{èmes} Journées du GDR Cassini*, marseille, France.
- Ferrent, P., 1996, Rapport de probatoire CNAM, Grenoble : Leibniz.
- Fezzani, C., Gerbe, A., Long, G., 1996, Le réseau des observatoires de l'environnement en Afrique, in *L'Information Géographique en Environnement, Aménagement et Nature* n°119.
- Fisher R., Ury W., 1982- *Comment réussir une négociation*. Seuil, Paris.
- Fonseca, A., Câmara, A., 1996, « Environmental analysis and communication using spatial multimedia ». *Proceedings of UDMS 96*. Prague.
- Forrest, S., ed., 1991, *Emergent Computation*, MIT Press, Cambridge : Elsevier.
- Franchesquin, N., 1995, *Modélisation des négociations aboutissant à une prise de décision collective au sein d'une assemblée communautaire*. Rapport de stage de DEA Université Paris Dauphine.
- French, S. (1992) Strategic Decision Analysis and Group Decision Support in; P. Dewilde & J. Vandewalle, (Eds.) *Computer Systems and Software Engineering*, Kluwer, Dordrecht, 217-230.
- Freud, S., 1930, *Malaise dans la civilisation*, Paris : PUF.
- Frontier S., Pichod-Vialle D., 1990- *Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution*. Masson, Paris.
- Frontier, S. - *Réflexions pour une théorie des écosystèmes*. in Bull. Ecol, 8, 4, 445-464.
- Gasser, L., 1991, Social conceptions of knowledge and action : DAI foundations and open systems semantics. *Artif. Intell.* **47**, 107-138.
- GEOMED-F Consortium, 1995, *GEOMED-F Project Reports*, Sankt Augustin : GMD.
- Goicoechea A., Hansen Don R., Duckstein L. -, 1982 *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. J. Wiley, New-York.
- Golay, F. (1995) *System Design Methodologies to Support Collaborative Spatial Decision-Making*, Collaborative Spatial Decision-Making, NCGIA Initiative 17 First Specialist Meeting., Santa Barbara, California, National Center for Geographic Information and Analysis, NCGIA.
- Golay, F. and Nyerges, T.L. (1994) Understanding Collaborative Use of GIS through Social Cognition: "Do You See what I See ?", in Nyerges, T.L., Mark, D.M., et al. (eds), *Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction for Geographic Information Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp.
- Hao, J.-K., Galinier, P., Habib, M., 1997, *Méthodes heuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes*. Actes des journées du PRCIA. Grenoble : CNRS.

- Hassoun, M., Demazeau, Y., et Laugier, C., 1992, Motion control for a car-like robot : potential field and multi-agent approaches, in *5th IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh: IEEE.
- Heiwood, I., Streit, U., Strobl, J., Wegener, M., 1995, Spatial Models and GIS : New potential for new models ? in *Spatial Models and GIS - GISDATA Specialist Meeting - GISDATA series*. Taylor & Francis (in press).
- Heudin, J.-C., 1994, *La Vie Artificielle*. Paris : Hermès.
- Hewitt, C., 1985, The challenge of open systems. *BYTE* (Avril 1985), 223-242.
- Hewitt, C.E., Bishop, P., et Steiger, R., 1973, A universal modular ACTOR formalism for artificial intelligence, in *Proceedings of IJCAI 1973*, pp 189-198, Stanford.
- Hiltz, S.R., Dufner, D., *et al.*, 1991, Distributed Group Support Systems : Social Dynamics and Design Dilemmas. In *J. of Organizational Computing*. (2)1, 135-159.
- Huhns, M., 1987, *Distributed Artificial Intelligence*. Pitman.
- Ishida, T., 1992, The tower of Babel: towards organization-centered problem solving, in *Proceedings of the 11th workshop on Distributed Artificial Intelligence*, Glen Arbor.
- Jean, M. R., 1997, Emergence et SMA, in *Actes des 5èmes journées francophones JFIADSMA « Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-agents »*. J. Quinqueton et al., eds., La Colle sur Loup, Paris : Hermès.
- Joerin, F., 1995, in *GIS and Decision Making*, UNITAR, EGIS vol. 4, Genève.
- Kass, M., Witkin, A., et Terzopoulos, D., 1987, *Snakes : Active Contour Models*, in 1st International Conference on Computer Vision, pp. 259-268, London: IEEE.
- Koning, J.-L., M. Ocelllo, N. Ferrand, Demazeau, Y., , F. Van Aeken & C. Baeijs, "A Multi-Agent Approach for Mediation Support on the Net", *1st International Workshop on Decentralized Intelligent and Multi-Agent Systems*, Krakow, Ploand, November 1995.
- Korf, R., 1992, A simple solution to pursuit games, in *Proceedings of the 11th workshop on Distributed Artificial Intelligence*, Glen Arbor, February.
- Krcevinac S., ed., 1981- *Global Modelling*. in *Lecture notes in Control and Information Sciences*, 35, Springer, Berlin.
- Labbi, A., 1995, *Sur l'approximation et les systèmes dynamiques dans les réseaux neuronaux*. Thèse de doctorat INPG. Grenoble.
- Lashkari, Y., Metral, M., *et al.*, 1994, « Collaborative Interface Agents ». *Pr. 12th Nat. Conf. on A.I.*, pp. 444-449. Vol. 1. Seattle : AAAI Press.
- Latombe, J.-C., 1991, *Robot motion planning*, Norwell: Kluwer
- Laurière, J.-L., 1987, *L'intelligence artificielle. Résolution de problèmes par l'Homme et la machine*. Paris : Eyrolles.
- Laurini, R., Milleret-Raffort, F., 1993, *Les bases de données en géomatique*. Paris : Hermès.
- Laurini, R., Thompson, D., (1992) *Fundamentals of Spatial Information Systems*; Academic Press.

- Le Gallou F., Bouchon-Meunier B., eds., 1992- *Systémique, théorie et applications*. TEC&DOC, Paris.
- Le Moigne J.L., 1990- *La modélisation des systèmes complexes*. AFCET Systèmes, Dunod, Paris.
- Le Strugeon, E., 1995, Une Méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs, Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- Lebreton J.D., Millier C. et al., 1982- *Modèles dynamiques déterministes en biologie*. Masson, Paris.
- Legendre L., Legendre P., 1979- *Ecologie Numérique*. 2 vol., Masson, Paris.
- Lenat, D.B., 1975, *BEINGS: Knowledge as interacting expert*, in Readings in Distributed Artificial Intelligence, edited by A.H. Bond et L. Gasser, pp 161-168, San Mateo: Morgan Kaufmann,.
- Levine P., Pomerol J.C., 1989- *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts*. Hermes, Paris.
- Madiot, Y., 1993, *L'aménagement du territoire*. Paris : Masson.
- Major, W. and Golay, F. (1996) *Une approche systémique du territoire et de sa dynamique*, 3ème congrès européen de systémique, Rome, à paraître.
- March, J.-G., Simon, H.-A., 1991, *Les organisations - problèmes psycho-sociologiques*. Paris : Dunod.
- MARCIA, "Auto-organisation := évolution de structure(s)", 4^{ème} Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents, PRC-IA, Toulouse, France, février 1996.
- McClelland J.L., Rumelhart D.E., 1988- *Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition*. 3 vol., MIT Press, Cambridge.
- Meehan, J. R., 1980, *Everything you always wanted to know about authority structures but were unable to represent*, in Proceedings of the First National Conference on Artificial Intelligence, pp. 212-214, Stanford: AAAI,.
- Mendras, H., 1979, *Eléments de Sociologie*, Paris : Colin
- Mermet L., 1987- *La négociation*. in Cahiers du Germes, 12, 349-355.
- Mermet L., 1991- *Dans quel sens pouvons-nous gérer l'environnement ?* in Annales des Mines, mars 1991, 68-81.
- Mermet, L., 1992. *Stratégies pour la gestion de l'environnement*, Paris : L'Harmattan.
- Mermet L., Barouch G., 1987- *Résoudre les problèmes d'environnement à travers conflits et négociations*. in Cahiers du Germes, 12, 357-375.
- Millonas M.M., 1992- *Swarms, phase transitions, and collective intelligence*. Colloque Artificial Life IV, Santa Fe.
- Minsky, M., 1979, *The society theory of thinking*, in Artificial Intelligence: an MIT perspective, vol. 1, pp 423-450, Cambridge: MIT Press,.
- Morin, E., 1977, *La Methode - 1. La Nature de la Nature* - Paris : Seuil

- Munier, B., 1995, « Décision », in *Encyclopaedia Universalis*, CD-ROM édition 1995.
- NCGIA I17 committee, 1996, *NCGIA Initiative 17 report*, Santa Barbara, CA : NCGIA
- Newell, A., et Simon, H.A., 1971, *Human problem solving*, Englewood: Prentice Hall,..
- Nilsson, N., 1971, *Problem-solving methods in artificial intelligence*, Mc-Graw Hill.
- Nilsson, N., 1982, *Principles of artificial intelligence*, Berlin: Springer Verlag.
- Nuttall, C., 1996, La démarche de l'OSS et de l'UNITAR, in *L'Information Géographique en Environnement, Aménagement et Nature* n°119.
- O'Hare, G. M. P., Jennings, N. R., eds., 1996, *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, New-York : Wiley.
- Occello, M., Demazeau, Y., 1997, *Une approche structurelle et comportementale du temps réel dans la conception d'agents*. Article soumis. Grenoble : Leibniz.
- Orgogozo, I., 1988, *Les paradoxes de la communication - A l'écoute des différences*. Paris : Les Editions d'Organisation.
- Palmer JD, Fields NA (1994), Computer-Supported Cooperative Work, *Computer*, May 1994, pp 15-17.
- Paradeise C., 1990, "Les théories de l'acteur" pp 31-37, *Cahiers Français*, n° spécial "Découverte de la sociologie"
- Parent E., Cohen De Lara M., 1991 - *Elements de commande optimale*. cours ENGREF, Paris.
- Perram J., Müller Jean-Pierre & Demazeau Yves, eds, 1994, Proceedings of the 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Odense Universiteit, Odense, Denmark.
- Pôle PLEIAD, 1992, "Vers une Taxinomie du Vocabulaire pour les Systèmes Multi-Agents", 1^{ère} Journée Nationale du PRC-IA sur les Systèmes Multi-Agents, PRC-IA, Nancy, France, décembre.
- Polya, G., 1957, *How to solve it*, New York: Doubleday Actors,.
- Populaire, P., Demazeau, Y., Olivier Boissier & Sichman, J., 1993, "Description et Implémentation de Protocoles de Communication en Univers Multi-Agents", 1^{ères} Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, AFCET & AFIA, Toulouse, France, IRIT, avril.
- Pornon, H. (1995), Structure des organisations et trajectoires de mise en œuvre des SIRS, *Revue de géomatique (à paraître)* 5(1),
- Rheingold, J., 1993, *Virtual Communities*. Cambridge : MIT Press.
- Robert, F., 1995, *Les Systèmes Dynamiques Discrets*, Springer-Verlag.
- Rocher, G., 1968, *Introduction à la sociologie générale*, 3 vols., Paris : Points - Seuil
- Rodrigues, A., Raper, J., 1995, *Defining Spatial Agents*. Proc. 1st Int. Conf. on Spatial Multimedia and Virtual Reality. Lisbonne.

- Rodriguez, M., 1994, *Modélisation d'un agent autonome ; architecture et représentations*.
Thèse de doctorat de l'Université de Neuchâtel.
- Rojot, J., 1994, *La Négociation* - Vuibert.
- Rosenschein, J.S., Zlotkin, G., 1994, *Rules of Encounter - Designing conventions for automated negotiation among computers*. Cambridge : MIT Press.
- Ruegg, J., Mettan, N., Vodoz, L., eds., 1992, *La négociation - Son rôle, sa place dans l'aménagement du territoire et la protection de l'environnement*. Lausanne : PPUR.
- Ruelle, D., 1991, *Hasard et Chaos*, Paris : Ed. Odile Jacob
- Sanson C., 1991- *Administration de l'environnement*. Jurisclasseur, 150, Paris.
- Searle, J.R., 1969, *Speech Acts*, Cambridge University Press.
- Sichman, J., 1995, *Du raisonnement social chez les agents. Une approche basée sur la théorie de la dépendance*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Sichman, J., Rosaria Conte, Demazeau, Y., & Cristiano Castelfranchi, 1993, "Reasoning about Others Using Dependence Networks", 3rd Italian Workshop on Distributed Artificial Intelligence, AI*IA, Rome, Italy, October.
- Sichman, J., Demazeau, Y., & Olivier Boissier, 1992, "When can knowledge-based systems be called agents ?", 9th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence, Rio de Janeiro, Brazil, September.
- Simon, H. A., 1977, *The new science of management decision*. Prentice-Hall.
- Simos, J., 1990. *Evaluer l'impact sur l'environnement*. META. Lausanne : PPUR.
- Suchman, L.A., 1987, *Plans and situated actions - The problem of human machine communication*. Cambridge : Cambridge University Press.
- SUN Corp., 1997, <http://java.sun.com>.
- Teclé A., Duckstein L., 1991- *Concepts of multicriterion decision making*. in IPGC "Decision support techniques for integrated resources management". Wageningen.
- Theys J., Kalaora B., 1992- *Les experts sont formels*. Autrement, Paris.
- Van Aeken F. & Demazeau, Y., 1996, "Le Salon, où des agents rencontrent des acteurs ", *4^{èmes} Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents*, AFCET & AFIA, Le Grau du Roi, France, LIRMM, avril.
- Van Aeken, F., et Demazeau, Y., 1990, Processing Elastic Patterns the Massively Parallel Way, in IAPR Workshop on Machine Vision Applications, MVA '90, pages 409-412, Tokyo: IAPR.
- Vanderveken, D., 1990, *Meaning and Speech Acts, 2 vols.*, Cambridge : Cambridge University press
- Verhulst F., 1990- *Nonlinear differential equations and dynamical systems*. Springer, Berlin.
- Vincke, Ph., 1989, *L'aide multicritère à la décision*, Editions de l'ULB, Paris : Ellipses.

Walliser B., 1977- *Systèmes et modèles*. Seuil, Paris.

Watzlawick P., Helmick Beavin J., Jackson Don D., 1979- *Une logique de la communication*. Seuil, Paris,.

Weisbuch, G., 1989, *Dynamique des systèmes complexes*, Editions du CNRS.

Wiener, N., 1949, *Cybernétique et Société*. Deux Rives.

Winston, P. H., 1979, *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley

Table des figures

Figure 1 : Les besoins en aide à la décision et la négociation en aménagement	39
Figure 2 : Schéma succinct de la zone du projet THT "BC"	41
Figure 3 : Fuseau de compromis vs. Fuseaux « polarisés »	47
Figure 4 : Organigramme d'évaluation de fuseaux	48
Figure 5 : Un agent méta-SMARRPS	113
Figure 6 : Un tableau noir spatial dynamique autour d'un SMARRPS	114
Figure 7 : les composants de la bibliothèque SMARRPS	139
Figure 8 : Adaptation des champs de SMARRPS en fonction de la situation	144
Figure 9 : un SMAR booléen à 3 agents (dynamique interne)	148
Figure 10 : un SMAR booléen à 3 agents	149
Figure 11 : Schéma de transition avec une observation non discriminante	155
Figure 12 : un environnement avec un « plateau » et une « vallée »	169
Figure 13 : un environnement avec deux points fixes stables	170
Figure 14 : Schéma fonctionnel d'un agent SMARRPS	179
Figure 15 : Schéma de principe de SMAALA	192
Figure 16 : Une utilisation de SMAALA-L v.0 (pds: 8/80/6/6)	197
Figure 17 : SMAALA (80/8/6/6)	199
Figure 18: SMAALA (8/80/6/6)	199
Figure 19: SMAALA (6/7/80/7)	199
Figure 20: SMAALA (6/7/7/80)	199
Figure 21: SMAALA (25/25/25/25)	199
Figure 22: SMAALA (20/25/20/35)	199
Figure 23 : SMAALA-L v.1 Copie d'écran	200
Figure 24 : Les fenêtres de SMAALA-L Mac	203
Figure 25 : Un résultat de SMAALA-L v.2 Mac	204
Figure 26 : Recherche des "zones blanches" dans SMAALA-L v.2	204
Figure 27: Décomposition d'une négociation	210
Figure 28 : Les phases de la négociation d'un projet de ligne THT	214
Figure 29 : Exemples de sujets abordés en fonction de la phase (1 → 5) d'une négociation de ligne THT	214
Figure 30 : Les fonctions projetées pour un système intégré d'aide à la négociation en aménagement	216
Figure 31 : Les fonctions dans SANPA	217
Figure 32 : L'organisation générale de SANPA	222
Figure 33 : Fenêtre de composition des messages dans SANPA	227
Figure 34 : Les performatifs retenus dans SANPA	229
Figure 35 : Les modules de l'Agent Projet dans SANPA	230
Figure 36 : Composants d'un Agent Assistant dans SANPA	233
Figure 37 : L'architecture matérielle de SANPA (d'après FERRENT, 1996)	237
Figure 38 : La fenêtre Acteur dans SANPA	239
Figure 39 : La fenêtre Projet dans SANPA	239
Figure 40 : Description de deux acteurs	273
Figure 41 : Les types de champs des contenus de messages SANPA	280

Liste des abréviations et sigles

A	Agent	
AA	Agent Assistant	
AP	Agent Projet	
APS		Avant Projet Sommaire
AS	Agent SMAALA	
CETE		Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
CSCW		Computer Supported Cooperative Work
CSDM		Collaborative Spatial Decision Making
DATAR	Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale	
DUP		Déclaration d'Utilité Publique
E	Environnement	
EDF		Electricité De France
EIE		Etude d'Impact en Environnement
GDSS		Group Decision Support System
I	Interaction	
IAD		Intelligence Artificielle Distribuée
LIFIA	Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle	
MAGMA		Modélisation d'Agents en univers Multi-Agents
O	Organisation	
POS		Plan d'Occupation des Sols
RDP		Résolution Distribuée de Problèmes
RP	Résolution de Problèmes	
SDS		Simulation Décentralisée de Systèmes
SANPA	Système d'Aide à la Négociation de Projets en Aménagement	
SMA		Système Multi-Agents
SMAALA	SMA pour l'Aide à la Localisation d'Aménagements	
SMAC		SMA Cognitifs
SMAR		SMA Réactifs
SMARRPS	SMAR pour la Résolution de Problèmes Spatialisés	
TCAO		Travail Coopératif Assisté par Ordinateur
TGV		Train à Grande Vitesse
THT		Très Haute Tension (ligne électrique)
VOYELLES		Modèle conceptuel de SMA de l'équipe MAGMA

Table des matières

SOMMAIRE	7
Résumé	8
INTRODUCTION	9
1. Aide à la décision, systèmes complexes et intelligence artificielle distribuée	9
1.1. Convergence des trois domaines	9
1.2. Motivation	11
1.3. Approche informatique et concrétisation de la recherche	12
2. Les directions de recherche	13
2.1. Problématique générale	13
2.2. La thèse défendue	14
2.3. Objectifs	14
3. Méthodologie	15
3.1. Une recherche soutenue par un partenariat de « terrain »	15
3.2. Orientation de la recherche	16
3.3. Déroulement des travaux	17
3.4. L'évolution du questionnement	17
4. Organisation du document	19
4.1. Première partie : éléments de définition	19
4.2. Deuxième partie : propositions	20
4.3. Troisième partie : applications	20
Eléments de définition	23
DECISION ET NEGOCIATION EN AMENAGEMENT DU TERRITOIRE	25
1. L'Aménagement du Territoire	25
1.1. Aperçu et définition	25
1.2. Les objectifs	27
1.3. Les orientations pratiques	28
1.4. Réalisations concrètes en aménagement du territoire	29
2. La décision en aménagement du territoire	31
2.1. Caractéristiques	31
2.2. Contraintes	32
2.3. Enjeux	33
2.4. Objectifs	33
2.5. Acteurs	34
2.6. Description du processus	36
2.6.1 Désignation, initiation	36
2.6.2 Expertise	36
2.6.3 Décision	37
2.6.4 Négociation	37
2.6.5 Concrétisation, Réalisation	38
3. L'aide à la Décision et à la Négociation	38
3.1. Origine des besoins	38
3.2. Nature des besoins	39
4. Cas particulier : l'analyse des projets spatiaux et les Etudes d'Impact en Aménagement	40
4.1. Situation de référence : le projet de ligne THT « BC »	41
4.2. Définition du problème	42
4.2.1 Les aménagements linéaires	42
4.2.2 Impact des aménagements et Cadre Légal	42
4.2.3 Etudes d'Impact	42
4.2.4 Données spécifiques aux aménagements linéaires considérés	43
4.3. Pratique Actuelle de l'Expert pour la Localisation des Fuseaux de Moindre Impact	43
4.3.1 Détermination de l'aire d'étude	43
4.3.2 Expertise et cartographie thématique des enjeux,	44
4.3.3 Cartographie des sensibilités par critère	45
4.3.4 Choix des fuseaux de moindre impact	46
4.3.5 Analyse des fuseaux avec comparaison "intracritères".	48
5. Orientation dans la conception d'un système d'aide à la décision : construction de représentations spatiales contingentes	49
6. Conclusion	50
SYSTEMES MULTI-AGENTS ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE	53
1. Eléments de définition	53
1.1. Intelligence Artificielle Distribuée	53
1.2. Quelques définitions classiques	57

