



HAL
open science

Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif:Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale

Marjorie Le Bars

► **To cite this version:**

Marjorie Le Bars. Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif:Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale. Modélisation et simulation. Université Paris Dauphine - Paris IX, 2003. Français. NNT: . tel-00011210

HAL Id: tel-00011210

<https://theses.hal.science/tel-00011210>

Submitted on 15 Dec 2005

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.

UNIVERSITÉ PARIS IX-DAUPHINE
UFR SCIENCES DES ORGANISATIONS

Thèse

Pour l'obtention du titre de

Docteur en Sciences

Spécialité Informatique

(Arrêté du 25 avril 2002)

Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale

Présentée et soutenue par

Marjorie LE BARS

Le 27 mai 2003 devant le jury composé de :

Directeurs de Thèse : **Mme Suzanne PINSON**
Professeur, LAMSADE, Université Paris IX Dauphine
M. Jean-Marie ATTONATY
Directeur de Recherche, INRA

Rapporteurs : **M. Alexis DROGOUL**
Professeur, LIP6, Université Paris VI
M. Jean-Pierre MÜLLER
Directeur de Recherche, CIRAD

Examineurs : **M. Serge HADDAD**
Professeur, LAMSADE, Université Paris IX Dauphine
M. Bernard ESPINASSE
Professeur, LSIS, Université d'Aix-Marseille

L'Université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

RÉSUMÉ

Notre travail a porté sur le développement d'un instrument pour l'aide à la négociation des acteurs impliqués dans la gestion de l'eau, ressource posant actuellement de façon accrue le problème de la durabilité. Pour cette ressource des directives générales ont été édictées au niveau national et européen. La mise en œuvre concrète de ces réglementations passe au niveau régional et au niveau local par la création de règles résultant de négociations entre les différents acteurs concernés. Toutefois, l'émergence de ces règles de gestion et d'allocation de la ressource se fait bien souvent sans vision des conséquences résultant de l'adoption de celles-ci tant au niveau global qu'au niveau individuel. Le but de notre travail est de fournir méthodes et instruments pour faciliter une négociation dont l'enjeu est de déterminer les règles d'accès à cette ressource pour les différents utilisateurs. Nous avons, d'une part, mis à l'épreuve la conception agent BDI (*Beliefs, Desires and Intentions*) à un problème relevant des sciences sociales et de grande taille. D'autre part, nous avons conçu une architecture multi-agent appropriée au problème posé intégrant la dimension négociation. Enfin, nous avons initié une méthodologie de conception interactive avec les acteurs de terrain. La construction de l'instrument de simulation s'est faite en deux phases : Une première maquette (Manga) concerne une situation simple de gestion (type nappe). Manga a permis d'explorer différents corps de règles d'attribution de l'eau et attitudes des agriculteurs face au risque climatique. Toutefois passer à des situations de gestion plus réalistes mais plus complexes, nous a conduit à enrichir fortement la représentation des acteurs et à concevoir une deuxième maquette (MangaLère). En nous appuyant sur le cas concret de la gestion de la Lère, nous avons testé l'adéquation du formalisme BDI à la représentation des acteurs concernés et commencé à développer une ontologie propre au problème posé.

Mots-clés : Systèmes Multi-Agents (SMA), agents BDI, gestion collective, négociation, ressource eau.

A AGENT BASED SYSTEM TO HELP GROUP DECISION: APPLICATION TO ENVIRONMENTAL RESTRICTED RESOURCE MANAGEMENT

The present work was carrying on tool development to help negotiation between different actors involved into water management. Water distribution for large hydrographical areas is a real challenge in our modern societies. One of the objectives is to reduce the frequency and extent of water conflicts through the establishment of multilateral negotiations, where different public and private interests can be represented in a structured institutional environment. The aim of these negotiations is to reach a compromise that will improve the situation of some with the agreement of the others. But few are in a position to negotiate, notably because of the lack of tools and methods necessary to collectively assess the impact of the different scenarios and to organise the negotiation. The aim of our work is to supply methods and tools to help negotiation where the main skate is to establish water allocation rules for different users. On the one hand, we have put to the BDI (Beliefs, Desires, Intentions) agent conception to problem from social sciences. On the other hand, we have developed a multi-agent framework integrated negotiation guiding. Finally, we have started to develop an interactive methodology with real actors. The simulation tool development have been done toward two stages: First, we have developed a tool (Manga) for water table management. This tool allowed testing different water allocation rules and testing different farmer's behaviours facing climatic risks. Secondly, when we have tested to real situation with different water resources (dam, water table, lakes...) we have improved the actors behaviour representations based on BDI concepts.

Key-words: Multi Agent System (MAS), BDI agents, collective management, negotiation, water resource.

Remerciements

Je remercie chaleureusement Suzanne Pinson, professeur de réputation internationale de m'avoir tout d'abord enseigné les bases de mes connaissances dans le domaine multi-agent et de m'avoir ensuite acceptée en thèse à l'Université Paris-Dauphine. Elle m'a avec autorité et perspicacité conseillée. Elle a investi mon « mail » d'informations sans cesse renouvelées afin de faire progresser mon travail et maintenir un lien étroit avec les chercheurs du domaine.

Je remercie infiniment Jean-Marie Attonaty qui m'a distinguée, m'a accueillie et intégrée dans son équipe (Unité Economie Publique, INRA-INAPG) pour traiter le sujet de thèse qu'il m'a proposée. Il m'a guidée avec un grand dévouement, une attention de chaque jour, un suivi sans faille. Il m'a permis par son autorité respectueuse de progresser, de prendre conscience de mes responsabilités pour parvenir à réaliser ce travail en me communiquant sa passion au quotidien pour la recherche. Les mots sont faibles pour lui exprimer ma reconnaissance.

Je suis grandement honorée de la participation dans mon jury de thèse d'Alexis Drogoul et Jean-Pierre Müller, deux éminents spécialistes des systèmes multi-agents qui ont accepté d'en être les rapporteurs. Qu'ils en trouvent ici avec ma gratitude, mes remerciements. J'ai eu la chance de suivre les cours de planification de Serge Haddad qui m'a fait l'honneur d'être membre de mon jury de thèse. Je l'en remercie. Je remercie Bernard Espinasse d'avoir accepté d'être dans ce jury.

Je remercie chaleureusement Marie-Hélène Chatelin qui a partagé ses connaissances et son temps avec dévouement, et qui m'a soutenue d'une amitié précieuse, spécialement dans les moments difficiles de la rédaction de mon mémoire.

Je remercie Philippe Le Grusse de l'IAMM, infatigable professeur, passionné autant par la théorie que par sa connaissance du « terrain » et d'un grand charisme avec ses étudiants. Ce fut un plaisir de le côtoyer et de progresser dans la connaissance.

Je remercie Alain Leplaideur pour m'avoir accueillie au sein de son équipe au CIRAD-CP et initié la poursuite de mon cursus universitaire. Il m'a fait entrevoir avec subtilité et délicatesse le monde réel de la recherche appliquée au développement durable. Merci infiniment pour la confiance qu'il m'a témoignée.

Je remercie l'ensemble de l'équipe Economie Publique de l'INRA-Grignon pour m'avoir acceptée avec gentillesse et soutenue avec efficacité durant mes années de thèse. Je remercie particulièrement l'équipe administrative qui a su donner des ailes au « pigeon voyageur » !

Je remercie toute l'équipe AQUAE pour leurs conseils et leurs critiques avisés.

Je n'oublie pas dans ces remerciements les Agriculteurs et les membres des Services Publics qui m'ont acceptée dans leur groupe de travail et m'ont enrichie de leurs connaissances pratiques.

Je remercie affectueusement Nicolas de son inlassable et tendre patience durement mise à l'épreuve pendant ces années.

Je remercie tous mes amis pour leur dévouement et leur amitié sans faille accompagnés de bonnes soiréessans travail !

*« ...C'que j'ai appris, ça tient en 3, 4 mots
Le jour où quelqu'un vous aime, il fait très beau
J' peux pas mieux dire, il fait très beau... »
(Gabin, Maintenant je sais)*

A mes parents...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	12
PREMIERE PARTIE.....	18
<i>AIDE A LA DECISION, SIMULATION MULTI-AGENT ET NEGOCIATION</i>	18
CHAPITRE 1	19
AIDE A LA DECISION	19
1 L'AIDE A LA DECISION.....	19
2 DES MODELES POUR L'AIDE A LA DECISION	22
2.1 Des approches fondées sur la rationalité complète	23
2.2 Les modèles multicritères	26
3 LES SYSTEMES INTERACTIFS D'AIDE A LA DECISION (SIAD).....	27
4 CONCLUSION	30
CHAPITRE 2	32
MODELISATION ET SIMULATION	32
1 DU PROBLEME A LA SIMULATION.....	33
2 SIMULATION ET PRISE EN COMPTE DU TEMPS	36
2.1 La simulation continue	37
2.2 La simulation à événements discrets	37
2.3 La simulation distribuée	38
3 LA QUESTION DE VALIDATION DES SYSTEMES COMPLEXES	39
CHAPITRE 3	46
LES SYSTEMES MULTI-AGENTS	46

1 INTRODUCTION.....	46
1.1 Définitions des Systèmes Multi-Agents	47
1.2 Les avantages	48
1.3 L'environnement	49
1.4 Conclusion	51
2 LES AGENTS	52
2.1 Structure conceptuelle des agents	53
2.2 Les agents réactifs	56
2.3 Les agents cognitifs ou délibératifs	57
2.4 Les agents hybrides	58
2.5 En quête d'une méthodologie de conception multi-agent	60
2.6 Les agents BDI	63
2.6.1 Structure générale	63
2.6.2 Un exemple d'implémentation : l'architecture PRS	67
3 LES PLATEFORMES SMA.....	71
4 DES PLATEFORMES CARACTERISTIQUES.....	75
CHAPITRE 4	81
LA NEGOCIATION DANS LES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....	81
1 LA NEGOCIATION : DEFINITIONS	81
2 DEUX TYPES DE NEGOCIATION : INTEGRATIVE VS DISTRIBUTIVE.....	84
3 DIFFERENTES METHODES DE RESOLUTION DE CONFLITS	87
3.1 Les méthodes centralisées	88
3.2 Les méthodes décentralisées	90
4 CONCLUSION	94
CHAPITRE 5	97
DEMARCHE METHODOLOGIQUE	97
1 LE CONTEXTE	97

1.1 Une ressource collective en accès libre	98
1.2 Caractéristiques de la loi sur l'eau	98
1.2.1 Les différents acteurs de la gestion de l'eau	99
1.2.2 Les outils d'intervention sur la gestion de l'eau en agriculture	101
1.2.3 Des outils non économiques	101
1.2.4 Des outils économiques	101
2 LES MODELES EXISTANTS	104
2.1 Méthodes multicritères	104
2.2 Programmation linéaire	105
2.3 Théorie des jeux	108
2.4 IRMA : une approche mono-agent	112
2.5 Les approches fondées sur les agents	115
3 LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	118
3.1 Du terrain au modèle	119
3.2 Le système MANGA	122
3.2.1 Le contexte	122
3.2.2 Objectifs du modèle	123
3.3 Le système MangaLère	124
3.3.1 Le contexte	124
3.3.2 Objectifs du modèle	125
4 CONCLUSIONS.....	126
DEUXIEME PARTIE.....	129
LES SYSTEMES MANGA ET MANGALERE.....	129
CHAPITRE 6	130
LE SYSTEME MANGA	130
1 LE MODELE MANGA.....	130
1.1 Le modèle statique	130
1.1.1 Les acteurs en jeu	130
1.1.2 Le système multi-agent Manga	131
1.1.2.1 Les Agents (A)	132
1.1.2.2 L'Environnement (E)	134
1.1.2.3 Les Interactions (I)	134

1.1.2.4 L'Organisation (O)	136
1.1.3 Représentation UML	137
2 LES AGENTS DANS LE SYSTEME	138
2.1 Les agents cognitifs du modèle	138
2.1.1 Les agents Agriculteurs	138
2.1.2 L'agent Fournisseur d'eau :	143
2.2. Les agents réactifs	146
2.2.1 L'agent culture	146
2.2.2 L'agent Climat	147
2.2.3 L'agent Centre d'information	147
3. PROTOCOLE DE NEGOCIATION ENTRE AGENTS.....	147
3. CONSTRUCTION INTERACTIVE DES REGLES DE DECISION.....	152
3.1. Données de la simulation	154
3.2. Les interfaces utilisateurs	155
3.3. La simulation	156
3.4. Les messages échangés entre agents	158
3.5. Analyse des résultats de la simulation	159
3.5.1. Règle d'allocation au prorata de la demande en eau	162
3.5.2. Règle d'allocation d'eau en fonction de la surface en maïs irrigué	168
3.5.3. Règle basée sur l'évolution des comportements	169
4. CONCLUSION	170
CHAPITRE 7	172
LE SYSTEME MANGALERE.....	172
1 LE MODELE MANGALERE.....	172
1.1 Caractéristiques générales	173
1.2 L'architecture d'agent	174
1.3 Le contrôle des agents BDI	176
1.4 Les interactions entre agents	177
1.5 Ontologies	178
1.6 Représentation générale de MangaLère	179
1.7 Les données de la simulation	181
2 UN EXEMPLE D'APPLICATION DU SYSTEME : L'AGENT FOURNISSEUR D'EAU	181

2.1 Base de croyances	182
2.2 Un exemple de plan	183
3 DYNAMIQUE DU SYSTEME.....	187
4 LES DONNEES AGROCLIMATIQUES.....	187
4.1 Les données climatiques	187
4.2 Modèle agronomique : besoin en eau des cultures	187
5 IMPLEMENTATION.....	189
6 CONCLUSION.....	190
CHAPITRE 8 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	191
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	197
ANNEXES	216

'A l'échelle cosmique, l'eau est plus rare que l'or'
Hubert Reeves

Introduction

Le contexte général

Le développement durable est devenu un élément majeur de préoccupation mondiale. Le respect de l'environnement fait l'objet de directives aux niveaux national et européen. Parmi les ressources renouvelables, celle de l'eau est particulièrement concernée. Concernant cette ressource des directives générales ont été édictées au niveau national et européen en 1992 et 2001 dont la mise en œuvre concrète passe au niveau régional et au niveau local par la création de règles résultant de négociations entre les différents acteurs concernés.

Toutefois, l'émergence de ces règles de gestion et d'allocation de la ressource se fait bien souvent sans vision des conséquences en résultant tant au niveau global qu'individuel. Or, on constate dans nombre de cas qu'elles sont principalement tributaires des rapports de force entre les partenaires.

Le recours à des instruments de calcul économique n'est généralement utilisé que dans des instances élevées disposant de moyens d'expertise important. Ainsi, les négociations du GATT (*General Agreement on Tariffs and Trade*) font appel à de nombreux modèles, par contre, les négociations au niveau local se font sans que soit envisager les multiples conséquences. Le plus souvent, les résultats de ces négociations traduisent les rapports de force entre négociateurs.

Dans de très nombreux contextes qui impliquent une prise de décision, les principaux responsables parlent fréquemment de « solution optimale ». Or, les instruments de calcul économiques utilisés ont largement évolué et la volonté de trouver la solution optimale en maximisant l'utilité collective a laissé la place à des approches moins ambitieuses fondées sur des techniques de simulation plus ou moins sophistiquées.

La simulation, et plus particulièrement, la simulation multi-agent, permet de représenter la multiplicité des acteurs, la diversité de leur comportement et les interactions entre ceux-ci. Pour un scénario de règles d'application donné concernant la régulation sur l'eau, elle permet d'en envisager les conséquences selon différents critères : économique, environnemental, durabilité, ... La

multiplication des scénarios conduit alors à avoir un ensemble de scénarios-conséquences parmi lesquels les négociateurs feraient un choix. L'analyse multicritère s'avèrerait donc une aide appréciable.

Contribution

Dans le cadre du problème posé, un certain nombre de caractéristiques se dégagent : (i) Un grand nombre d'acteurs est concerné (agriculteurs éventuellement regroupés en Association Syndicale Autorisée (ASA), fournisseurs d'eau autres que l'ASA, Associations de Protections de la Nature (APN), pêcheurs, puissance publique, industriels (EDF par exemple), communes, ...). (ii) Le comportement et les objectifs de ces protagonistes présentent une grande hétérogénéité. En particulier, différentes formes de rationalité peuvent intervenir dans la prise de décision (complète, limitée, procédurale, adaptative, ...). (iii) Les décisions de ces acteurs ne s'inscrivent pas dans une dynamique hiérarchique. On s'attachera donc à respecter la dimension autonome de chacun d'entre eux.

Ces différents aspects nous ont conduit à adopter les concepts multi-agents pour modéliser le système. L'utilisation d'un simulateur fondé sur les multi-agents permettrait d'envisager les conséquences d'une réglementation en tenant compte des réactions et comportements des acteurs impliqués.

L'utilisation de modèles pour représenter la dynamique de systèmes conduit à se poser la question de la place de la négociation vis-à-vis du modèle ou du modèle par rapport à la négociation. Deux types d'approches sont possibles, (i) tout d'abord l'utilisation de modèles endogènes qui font émerger des protocoles de négociation (théorie des jeux, modèles à base d'apprentissage automatique par exemple), (ii) ensuite l'utilisation de modèles exogènes où le processus de négociation est externe.

Nous proposons une alternative possible fondée sur le paradigme multi-agent dans laquelle on simule un ensemble de règles de négociation. C'est à travers la simulation du processus de négociation qu'émergeront des solutions plus ou moins satisfaisantes. L'objectif est de fournir aux négociateurs, dans le cadre de la gestion collective de l'eau, un instrument permettant de tester les conséquences d'une réglementation. Ces négociateurs ont alors toute liberté pour modifier cette réglementation, en tester les conséquences, afin d'aboutir à un compromis acceptable. Les conséquences dépendent des contraintes agricoles, des différents comportements des acteurs en particulier, de la confrontation de leurs règles de décision.

La construction de l'instrument de simulation s'est faite en deux phases.

- Une première phase : un prototype de simulateur multi-agent est élaboré (intitulé Manga). Il a comme double objectif : d'une part de préciser et formaliser, d'autre part d'instaurer le dialogue avec les acteurs. Il répond à un problème simple : une région avec différents acteurs (agriculteurs, fournisseur(s) d'eau, ...) qui prélèvent de l'eau sur une nappe (stock limité). Ce modèle s'appuie sur l'expertise de spécialistes (Agronomes, Economistes, Hydrologues, Techniciens agricoles...) que nous avons consultés pour le concevoir.
- Seconde phase : ce premier système a été généralisé pour prendre en compte le processus de planification des acteurs (Système intitulé MangaLère).

Organisation du document

Notre document est organisé en sept chapitres :

Chapitre 1 : Aide à la décision.

Chapitre 2 : Modélisation et simulation.

Chapitre 3 : Les Systèmes Multi-Agents.

Chapitre 4 : La négociation dans les Systèmes Multi-Agents.

Chapitre 5 : Démarche méthodologique.

Chapitre 6 : Le système Manga

Chapitre 7 : Le système MangaLère

Chapitre 8 : Conclusions et perspectives.

Le premier chapitre présente différentes approches d'aide à la décision et les limites dans celles-ci dans le cadre de notre problématique. Le second pose le problème de la modélisation et de la simulation. Le troisième chapitre permet de donner au lecteur une vue d'ensemble sur les Systèmes Multi-Agents avec une attention plus particulière sur les concepts d'agents BDI (*Beliefs, Desires, Intentions*). Le quatrième chapitre permet de définir les différentes approches possibles pour résoudre le problème de la négociation entre acteurs. Le chapitre 5 contient la description de notre démarche et les choix effectués sur la modélisation du modèle d'agent. Nos travaux se sont déroulés en deux temps. Dans un premier temps nous avons développé et testé un prototype sur un problème réduit (Chapitre 6). Dans un deuxième temps, nous avons conçu un simulateur permettant de couvrir les différents contextes possibles de déploiement des directives nationales à un niveau local. La

conception de ce simulateur a bénéficié de l'interaction avec des acteurs confrontés concrètement à ce problème (Chapitre 7).

Chapitre 1 : Aide à la décision.

Ce chapitre constitue une description de l'état de l'art sur les instruments d'aide à la décision. Derrière les instruments d'aide à la décision, l'hypothèse la plus importante concerne la rationalité supposée des acteurs. Parmi les nombreuses rationalités qui ont été proposées, dans ce chapitre, nous mettons l'accent sur (i) la rationalité complète (qui constitue une hypothèse souvent mise en avant et qui a hérité de la théorie économique (ii) sur les rationalités limitée et procédurale qui paraissent cohérentes avec les connaissances que nous avons du monde agricole.

Nous présentons ensuite quelques approches pour l'aide à la décision qui reposent sur des hypothèses quant à la rationalité des décideurs (le plus souvent, la rationalité complète).

Dans une dernière partie nous décrivons les systèmes interactifs d'aide à la décision, leurs limites.

La simulation de règles de négociation par une approche multi-agent dans laquelle les protagonistes seraient représentés en tant qu'agent informatique présente une alternative dans l'aide à la décision collective.

Chapitre 2 : Modélisation et simulation.

Lorsque l'on souhaite passer du problème identifié à la simulation, cela suppose de franchir un certain nombre d'étapes : l'analyse, la modélisation, l'implémentation informatique et la simulation. La simulation « *consiste à mettre en œuvre des modèles dans des conditions variées, pour tenter d'explorer leurs possibilités, leurs défaillances, et éventuellement découvrir telle ou telle trajectoire comportementale encore inconnue* » [Quéau, 1986]. Concernant la simulation, on s'attachera dans ce chapitre et par la suite plus particulièrement à la simulation multi-agent.

S'agissant du temps de la simulation, on distingue deux modes de gestion de la dynamique d'un système. Cette gestion dépend (i) soit d'une horloge, on parlera alors de simulation continue (ii) soit de l'occurrence d'évènements – on parlera alors de simulation à évènements discrets – Le système évolue alors par sauts successifs en différents points du temps.

Chapitre 3 : Les Systèmes Multi-Agents.

Ce chapitre se décompose en trois parties : une première partie introduit la notion de système multi-agent, concept central à notre travail. Une deuxième partie présente la notion d'agent. Celui-ci est

défini comme étant une entité logicielle d'un système informatique autonome, réactif à son environnement, capable d'interagir avec les autres agents et « dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents » [Ferber, 1995]. Il existe un grand nombre de typologies d'agents mais celle que nous retenons, compte tenu du problème à modéliser, est fondée sur le processus de prise de décision de l'agent. Elle distingue trois types d'agents : réactifs, cognitifs ou délibératifs et hybrides. Nous détaillerons plus précisément les agents cognitifs de type BDI (*Belief, Desire, Intention*), ceux-ci étant à la base de notre simulateur multi-agent.

Chapitre 4 : La négociation dans les Systèmes Multi-Agents.

La mise en œuvre concrète des réglementations pour l'allocation de l'eau passe au niveau régional et au niveau local par la création de règles résultant de négociations entre les différents acteurs concernés. En IAD, le terme de négociation est employé aussi bien dans le cadre de résolution de conflits [Lander et Lesser, 1993] [Sycara, 1988] que dans celui de la coordination entre agents [Davis et Smith, 1980] [Sycara, 1992]. Dans les SMA, la négociation donne lieu à deux approches différentes [Osborne et Rubinstein, 1994] [Lepperhoff, 2002] : (i) La première est une approche analytique et normative fondée sur la théorie des jeux. (ii) La seconde, d'inspiration plus sociologique se rapproche plus du comportement des acteurs dans le processus même de la négociation. Dans ce chapitre, différentes méthodes de résolutions de conflits sont présentés : (i) des méthodes centralisées (méthode hiérarchique de type *Contract Net Protocol*, négociation via un un médiateur) (ii) des méthodes décentralisées (la recherche négociée, une méthode heuristique, une méthode par argumentation)

Chapitre 5 : Démarche méthodologique.

Dans le cadre de la gestion de l'eau, domaine de notre problématique générale, différentes approches sont tentées pour aider au mieux les décideurs de l'allocation de la ressource entre les différents usagers. Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord l'étude du domaine, et donnons l'ensemble des outils d'intervention sur la gestion de l'eau en agriculture. Dans une deuxième partie, une description est faite des modèles existants (Modèles multicritères, Programmation linéaire, théorie des jeux, modèles mono et multi-agents) dans le cadre d'une ressource renouvelable telle que l'eau. La dernière partie présente notre démarche méthodologique, du recueil des données à la simulation de celles-ci.

Chapitre 6 : Le système Manga

Ce chapitre décrit le système MANGA. La première partie présente le modèle statique composé par l'ensemble des acteurs en jeu, les différentes familles d'agents et leurs organisations. La deuxième partie décrit les agents dans le système, leurs connaissances, leurs stratégies... La troisième partie présente l'ensemble des interactions, c'est-à-dire la communication entre agents, et le protocole de négociation utilisé pour les échanges entre agents agriculteurs et agent fournisseur d'eau. La quatrième partie explique le processus de construction interactive des règles de décision. La dernière partie du chapitre présente la simulation et les différents résultats obtenus en fonction des règles d'allocation d'eau testée.

Chapitre 7 : Le système MangaLère

Ce chapitre présente l'évolution du système décrit précédemment à partir d'un cas réel: le Contrat de Rivière Lère-Aveyron. Dans un premier temps nous décrivons le modèle statique (acteurs en jeu, architecture d'agents utilisée, les interactions entre eux et représentation UML simplifiée du modèle). Dans une deuxième partie nous donnons un exemple d'application de l'architecture BDI pour l'agent Fournisseur d'eau. Nous décrivons de façon détaillée l'utilisation de ces concepts utilisés et principalement les plans utilisés par les différentes classes d'agents. Un contrôleur général gère les événements de la simulation et réveille en temps voulu les agents pour qu'ils mettent en œuvre les tâches qui leur sont propres. Chaque agent possède des plans d'actions qui sont définis par les utilisateurs et contrôlés directement par le système.

Première partie

Aide à la Décision, Simulation Multi-Agent et Négociation

Chapitre 1

Aide à la décision

Au début des années soixante-dix sont apparus les systèmes d'aide à la décision. Morton [Scott Morton, 1971] les baptise Decision Support System (DSS), appellation qui se transformera au cours du temps en Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD). Derrière ces acronymes on trouve un nombre important de systèmes qui ont en commun le plus souvent leur fonction à savoir l'aide à la décision.

La première section est construite autour de la définition de l'aide à la décision. Le plus souvent derrière les instruments pour l'aide à la décision on retrouve une des hypothèses la plus important : la rationalité supposée des acteurs.

La deuxième section présente les différentes approches et instruments pour l'aide à la décision. On distingue deux types de modèles, (i) des modèles fondés sur la rationalité complète et la recherche de solutions optimales, (ii) et des modèles non fondés sur cette rationalité complète et ayant des solutions considérées comme appropriées.

1 L'aide à la décision

Une définition

La décision est souvent vue comme le fait d'un individu isolé (« le décideur ») exerçant un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné.

Comme le définit Roy [Roy, 2000] « *Aider à décider, c'est tout d'abord aider à clarifier la formulation, la transformation et l'argumentation des préférences. A ce niveau, le concept clé est celui du critère* ». Ainsi, lorsque l'ensemble des conséquences n'est pas trop complexe, on peut expliciter dès le départ un critère unique qui représentera toutes les conséquences pertinentes. Une telle approche monocritère suppose que l'on puisse évaluer chaque action selon ce critère unique.

Adopter un modèle monocritère ne signifie automatiquement que dans la réalité un seul critère est à l'œuvre, mais c'est vouloir aider à la décision en ne montrant explicitement qu'un seul critère.

Roy [Roy, 2000] définit l'aide à la décision comme étant « *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un acteur dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d'autre part* »

Ainsi pour Roy, la formulation du problème ne peut être engagée indépendamment des rapports entre un individu et la réalité. La perception qu'en a ce dernier interfère avec ce réel et le transforme [Roy, 1992]. Checkland et Scholes proposent une méthodologie (*Soft System Modeling*) avec émulation des acteurs impliqués dans un processus d'apprentissage qui est généralement sans fin. L'apprentissage prend place à travers un processus itératif d'utilisation de systèmes, de réflexion et de débat en prenant en compte le monde réel [Checkland et Scholes, 1993].

Différentes rationalités des acteurs

Derrière les instruments d'aide à la décision, l'hypothèse la plus importante concerne la rationalité supposée des acteurs. Parmi les nombreuses rationalités qui ont été proposées [Simon, 1947,1958, 1982] [Russel, 1999] nous mettrons l'accent sur (i) la rationalité complète, qui constitue une hypothèse souvent mise en avant et qui a hérité de la théorie économique, et sur les rationalités héritées de Simon (rationalités limitée et procédurale) [Simon, 1958, 1982] et de Cyert et March (rationalité adaptative) [Cyert et March, 1963]. Ces rationalités paraissent cohérentes avec les connaissances que nous avons du monde agricole [Petit, 1982] [Nitsch, 1991]

- La rationalité complète

La théorie de la décision définit un agent avec une rationalité complète [Russel, 1999] comme étant un agent qui maximise sa fonction d'utilité.

Ainsi, dans des hypothèses de rationalité complète des acteurs :

- Les objectifs du décideur sont clairement exprimés dès le départ et peuvent être rangés selon un ordre de préférence,
- L'ensemble des solutions possibles dans une situation de décision précise est connu et peut être évoqué,
- Les conséquences rattachées à chacune des solutions sont précisées,
- Le choix de la solution s'effectue en retenant la solution optimale en tenant compte des objectifs préétablis.

Dans ce courant, la solution existe en dehors des acteurs et généralement l'ensemble des préférences des acteurs contribue à la construction d'un critère unique de synthèse quantifiable. Que l'on soit en statique, en incertain, on se ramène à un critère unique de synthèse que l'on optimise.

- ***La rationalité limitée***

Ce concept a été introduit par Simon en 1947 [Simon, 1947]. Les hypothèses sont les suivantes :

- Le décideur perçoit un problème auquel il réagit, ce problème représente une version simplifiée de la réalité,
- Le décideur doit d'abord identifier les actions possibles (sans toutefois toutes les découvrir),
- Le décideur doit recueillir l'information nécessaire pour déterminer et évaluer les conséquences des actions,
- Les objectifs poursuivis par le décideur sont précisés tout au long du processus en termes de « niveaux d'aspiration » ou « de buts minima »,
- Le décideur arrête son choix sur la première option analysée qui satisfait chacun des buts fixés.

La rationalité limitée est aussi définie comme étant *la capacité de générer un comportement maximal en fonction des informations disponibles et des ressources de calcul* [Russel, 1999]. Le terme d'optimisation limitée a été défini par Horvitz [Horvitz, 1987] comme étant « *l'optimisation d'une utilité calculable donnée par un ensemble d'hypothèses sur des problèmes et des contraintes de ressources.* ».

- ***La rationalité procédurale***

A la suite de la rationalité limitée, Simon en 1982 [Simon, 1982] introduit le concept de rationalité procédurale qui met en avant le processus qui conduit l'acteur à prendre ses décisions.

- ***La rationalité adaptative***

La rationalité adaptative développée par Cyert et March [Cyert et March, 1963] possède les caractéristiques suivantes :

- L'adaptation de l'organisation à son environnement provient d'enseignements découlant d'expériences antérieures (*learning by doing*).
- L'apprentissage débouche sur :
 - La création d'indicateurs qui conditionnent la perception des situations rencontrées,
 - des règles d'action pour poursuivre des buts dédiés à des problèmes identifiés à travers des situations mémorisées.
 - Le développement de compétences particulières.

Cette dernière hypothèse pose un problème dans un environnement changeant, il peut y avoir un décalage entre les règles apprises dans un environnement donné par rapport à un environnement courant qui peut conduire à des comportements erronés [Hall, 1984] [Argyris et Schön, 1978].

2 Des modèles pour l'aide à la décision

Les modèles pour l'aide à la décision reposent généralement sur des hypothèses de rationalité des décideurs et de solutions possibles [Attonaty *et al.*, 1991]. On distingue deux types de modèles, (i) des modèles fondés sur la rationalité complète et la recherche de solutions optimales, (ii) et des modèles non fondés sur cette rationalité complète et ayant des solutions considérées comme appropriées. Dans cette seconde approche, le processus de conduite de raisonnement est au centre de l'aide à la décision, alors que dans les approches plus normatives, la solution optimale est au centre de l'aide à la décision [Bourguine et Lemoigne, 1990]. Pour un débat portant sur le sujet, voir l'article de Roy « *Sciences de la décision ou Science de l'aide à la décision ?* » [Roy, 1992].

2.1 Des approches fondées sur la rationalité complète

- *La programmation Linéaire (PL) emblématique de la recherche opérationnelle*

Les premiers programmes linéaires ont été utilisés en agriculture dans les années 60 et avaient pour objectif de définir le plan de production optimal pour un agriculteur. Leurs utilisations ont montré la nécessité de disposer d'une personne compétente, d'où un coût difficilement abordable pour une exploitation agricole.

En revanche, leurs utilisations ont été développées pour des problèmes régionaux notamment pour montrer les conséquences possibles de l'application de nouvelles mesures économiques décidées à Bruxelles (exemple de la nouvelle Politique Agricole Commune des années 92) ou de l'influence de nouveaux équipements (barrages par exemple). [Rieu, 1994]

Les principes de la programmation linéaire

Résoudre un programme linéaire, c'est résoudre le problème mathématique suivant :

$$\text{Max (c x)}$$

Sous les contraintes : $\mathbf{A x} \leq \mathbf{b}$ et $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$

Où :

A : une matrice à m lignes et n colonnes, dont les éléments sont réels.

b : un vecteur colonne à m éléments.

c : un vecteur ligne à n éléments.

- *La théorie de la décision*

La théorie de la décision est la théorie normative pour la prise de décision. Elle suppose que les agents soient dotés d'une rationalité complète et qu'ils maximisent une fonction d'utilité. Elle implique qu'il ne soit pas important de prédire les actions des autres pour faire un bon choix.

L'idée de base de cette théorie est qu'un agent face à un ensemble d'actions possibles choisira celle qui maximisera un critère construit en fonction du contexte de la décision. Dans un contexte certain, ce critère sera l'utilité de l'action α noté $U(\alpha)$. Les développements suivants correspondent aux modèles statistiques de l'aide à la décision. Dans un contexte aléatoire, le

critère sera l'espérance d'utilité noté $EU(\alpha)$. Dans un contexte incertain, le critère sera l'espérance d'une utilité fondée sur des probabilités subjectives. Dans un contexte multicritère, un critère unique de synthèse quantifiable sera construit à partir du poids relatif de ces différents critères (la somme pondérée est l'exemple le plus simple). Au préalable, une correspondance aura été établie entre les performances de chaque critère (quantitatif ou qualitatif) et une valeur dans une unité commune (par exemple, une unité monétaire). On parlera alors de la théorie de l'utilité multi-attribut.

Toutefois, comme le souligne Roy et Bouyssou [Roy et Bouyssou, 1993] pour parler d'optimum il faut pouvoir modéliser la situation de telle sorte que :

- Chaque solution envisagée soit exclusive de toutes les autres,
- L'ensemble des solutions considérées soit fixé une fois pour toutes,
- Les solutions puissent être ordonnées de façon incontestable de la plus mauvaise à la meilleure.

- **La théorie des jeux**

Principes

La théorie des jeux se propose « *d'étudier toute situation dans laquelle les agents rationnels interagissent, son champ d'application est extrêmement vaste ; il englobe, en particulier toute la micro-économie traditionnelle, y compris le modèle de concurrence pure et parfaite, à laquelle les concepts de théorie des jeux peuvent être appliqués* » [Choumette et Colard, 1997]. Elle a « *pour objet de formaliser le processus de décision d'agents dans un contexte où chaque agent cherche à optimiser une utilité retirée de ses décisions, alors que les actions d'autres agents ont une influence sur cette utilité. Les résultats principaux de la théorie portent sur les équilibres, qui sont des situations dont aucun agent n'a intérêt à s'écarter* » [Querou et al., 2000]. Dans cette situation, contrairement à celle rencontrée dans la théorie de la décision, il est nécessaire de prédire les actions des autres pour effectuer un choix.

La théorie des jeux *étudie la manière dont les individus rationnels règlent des situations conflictuelles. Elle analyse donc la signification de l'hypothèse de rationalité lorsque la satisfaction d'un individu est directement affectée par les décisions d'autres agents, et elle définit des concepts de solution afin de prédire les situations auxquelles aboutissent les différentes configurations conflictuelles.* [Cahuc, 1988]

Cette approche mobilise classiquement une matrice de gain.

La théorie des jeux se distingue de la théorie de la décision que l'on retrouve en économie et où, les actions d'autres acteurs sont considérées comme paramètres de l'environnement, et les conséquences des actions de ces acteurs ne sont pas pris en considération [Kraus *et al.*, 1998] [Jennings *et al.*, 2000]. Les modèles de théorie des jeux fournissent des modèles valides au niveau économique et dans différentes situations sociales avec peu d'acteurs.

Quelques définitions

Jeux coopératifs et non coopératifs. On peut obtenir différentes situations selon que les différents individus sont coopératifs ou non. D'après [Osborne, 1994] :

Un modèle « **non coopératif** » définit un ensemble de joueurs ayant chacun leurs propres stratégies et leur propre fonction de gain. Durant le jeu, cet ensemble de joueurs reste identique, il n'y a donc pas formation de coalition.

Dans un jeu dit **coopératif l'ensemble** des joueurs est défini comme précédemment à cette différence près que les joueurs peuvent former des coalitions pour parvenir à un but commun. Ces coalitions ne sont pas fixées pour toute la durée du jeu mais peuvent évoluer.

Jeu stratégique et jeu extensif : Un jeu stratégique (**Strategic Games**) est un jeu dans lequel chaque joueur choisit son plan d'action une fois pour toute, et les décisions de chaque joueur sont prises de façon simultanée. Au contraire, dans un modèle de jeu extensif (**Extensive Games**) chaque joueur considère son plan d'action non seulement au début du jeu mais à chaque moment où il prend sa décision.

Equilibre de Nash. En théorie des jeux coopératifs le concept principal est celui d'équilibre de Nash [Nash, 1953]. Sa définition est la suivante :

Un point d'équilibre de Nash est le couple $(x_1^N, x_2^N) \in R$ tel que :

$$\Pi_1(x_1^N, x_2^N) \geq \Pi_1(x_1, x_2^N) \quad \forall x_1, (x_1, x_2^N) \in R$$

et $\Pi_2(x_1^N, x_2^N) \geq \Pi_2(x_1^N, x_2) \quad \forall x_2, (x_1^N, x_2) \in R$

Où : Π_i désigne la fonction critère du joueur i, les fonctions Π sont dérivables

X_i désigne la stratégie du joueur i

R l'ensemble des stratégies (x_1, x_2) admissibles

Une forme de stratégie correspond à un équilibre de Nash si la stratégie de chacun des joueurs est optimale en réponse aux stratégies des autres joueurs. Dans une solution avec équilibre de Nash, les joueurs prennent les stratégies des autres joueurs car on est en information complète. Cet équilibre peut ne pas exister ou il peut en exister plusieurs.

La caractéristique principale de l'équilibre de Nash est de considérer que chaque joueur se comporte comme s'il connaissait la stratégie de chacun pour aboutir à un équilibre optimum collectif. Par contre, dans un jeu dynamique où le jeu a une histoire, l'équilibre de Nash semble limité [Querou *et al.*, 2000] car il est difficile de concevoir que l'ensemble des joueurs n'utilisent pas les informations qu'ils acquièrent au cours du jeu pour modifier et déterminer leurs stratégies.

Toutes ces méthodes reposent sur une axiomatique à savoir sur l'hypothèse de rationalité complète ce qui constitue une hypothèse forte et que la réalité semble parfois mettre en défaut [Hatchuel et Molet, 1986].

Une des grandes questions que l'on pourrait se poser est comment introduire un peu plus de réalité dans les modèles économiques sans perdre la notion de pertinence des modèles ?

Une solution possible est la simulation informatique. Ainsi, dans un système dynamique, la simulation est plus flexible et permet d'explicitier les différentes hypothèses des comportements des agents.

2.2 Les modèles multicritères

Lorsque l'hétérogénéité des conséquences devient trop complexe, Roy et Bouyssou [Roy et Bouyssou, 1993] proposent de procéder à une analyse multicritère (à distinguer de la théorie de l'utilité multi-attribut). Celle-ci consiste à expliciter un ensemble de plusieurs critères, chacun d'entre eux n'appréhendant qu'une catégorie relativement homogène de conséquences.

Dans la plupart des processus de décision, aussi complexes et conflictuels soient-ils, il est souvent possible de mettre à jour un certain nombre d'axes communs aux différents acteurs, selon lesquels ils justifient, modifient leurs préférences. Le choix d'utiliser différents critères autour de ces axes de signification est d'essayer de modéliser ce qui peut apparaître comme la partie stable de la perception du problème qu'ont les différents acteurs en jeu.

Les modèles multicritères se fondent sur différentes hypothèses dont nous retiendrons les suivantes [Roy, 1992, 2000] :

- L'ensemble des possibles n'est pas défini de façon stable dès le départ. Il peut varier au cours d'itérations successives. Les préférences ne sont pas révélées une fois pour toutes à l'observateur mais construites au cours de la phase de conception.
- Le fait que les critères soient multiples implique la recherche d'un compromis, d'une solution acceptable, par opposition à une solution optimale définie de façon rigide.
- Le fait que les algorithmes retenus soient suffisamment souples pour autoriser des itérations nombreuses et peu coûteuses permet également de résoudre la non-simultanéité des informations.

Dans leur approche Roy et Bouyssou [Roy et Bouyssou, 1993] insistent fortement sur l'aide à la décision vue comme un processus. Ainsi, dans les modèles de décision, les préférences d'un acteur impliqué dans un processus de décision ne sont pas nécessairement rigoureusement définies a priori et stables. Dans le domaine agricole, Chatelin *et al.*, [Chatelin *et al.*, 1993] considèrent que dans une démarche de conseil, il s'agit, dans la phase de conception de projets, d'amener l'agriculteur à élargir le champ de ses possibles.

Alors qu'en psychologie cognitive, l'objectif est de comprendre comment la décision s'opère chez l'individu, la finalité de l'Aide Multicritère à la Décision est d'apporter une aide méthodologique au décideur. On ne cherche plus à réfléchir sur la façon dont le décideur prend sa décision, on cherche au contraire à construire un modèle permettant de modéliser le problème à traiter et les préférences du décideur [Planeix, 1999].

3 Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD)

La définition fonctionnelle proposée par Keen et Morton [Keen et Morton, 1978] est la définition de référence pour le concept de SIAD : « *Un SIAD est un système ouvert qui augmente la qualité des processus de décision plutôt que leur productivité.* »

Comme pour Roy et Bouyssou [Roy et Bouyssou, 1993], les SIAD mettent l'accent sur le processus de recherche de solutions. Ces systèmes n'ont pas pour objectif d'identifier une décision optimale qu'il 'suffirait' ensuite de mettre en application [Chatelin *et al.*, 1993]. Leur

finalité consiste à « amplifier le raisonnement du décideur sur la base de ses propres représentations » [Courbon, 1993].

Ces systèmes ont une place privilégiée lorsque les problèmes sont peu, voire non structurés [Stabell, 1988] [Lévine et Pomerol, 1989] [Attonaty *et al.*, 1999]. Ils sont constitués par [Scott Morton, 1971] (i) des bases de connaissances (KS). Le cadre de représentation des connaissances permet de formaliser un modèle d'action sous forme de règles de décision. Ces cadres proposent une structuration et un langage dédiés au type de dispositif concerné. Le formalisme de ces langages doit être 'suffisamment proche' des représentations des acteurs et manipulables par des conseillers non spécialisés en informatique et, de façon générale, en modélisation [Chatelin *et al.*, 1993] (ii) des bases de modèles (PPS), (iii) des systèmes de langage (LS), (iv) une interface permettant de conduire le processus (Figure 1).

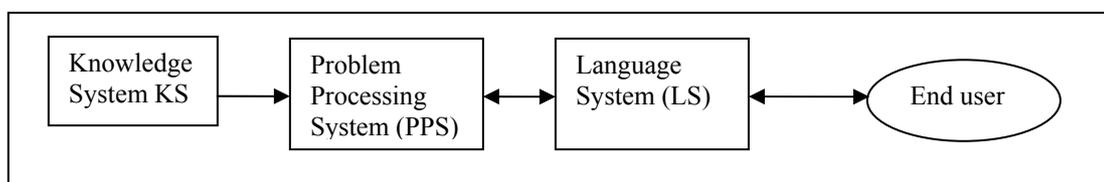


Figure 1 : Structure d'un système d'aide à la décision (DSS) [Chi *et al.*, 1992]

Sprague [Sprague, 1987] propose un principe de fonctionnement pour les SIAD. Dans cette approche, le dialogue apparaît au centre de la modélisation, la partie contrôle n'est pas représentée mais se situe implicitement au niveau de l'utilisateur qui utilise le module de dialogue pour accéder aux données et aux modèles [Planeix, 1999]. Sprague et Carlson [Sprague et Carlson, 1982] sont les premiers auteurs à définir le concept de bases de modèles et à concevoir le dialogue dans cette perspective.

- **Group Decision Support System**

Parallèlement au courant SIAD se sont développées des approches visant à aider des groupes, soit pour faire émerger une solution commune (*Group Decision Support System*) [Jelassi et Beauclair, 1987], soit dans le cadre de négociation (*Negotiation Decision Support System*) [Bui, 1994] [Bui et Shakun., 1995] [Chang *et al.*, 1995] [Espinasse *et al.*, 1997] [Espinasse *et al.*, 1999] [Hahn et Jarke, 1991] [Kersten, 1995] [Sebenius, 1992] .

Comme les SIAD pour l'aide à la décision individuelle, les *Group Decision Support System* (GDSS) sont conçus pour fournir des outils d'aide à la décision orientés systèmes d'informations, base de modèles et interface homme machine. Ces GDSS doivent modéliser :

- Des interactions entre les acteurs du groupe, ces interactions pouvant être aussi bien directes qu'indirectes.
- Avec participation synchrone ou asynchrone des décideurs.
- Un dispositif de réunion proche du mode de coordination courant (Figure 2). En particulier, si les acteurs sont situés dans même lieu, on privilégiera une salle de réunion. A l'inverse, si les acteurs sont situés en des lieux éloignés, on utilisera des approches de type Internet.

Ces approches sont donc fondées sur un dispositif particulier de réunion, le travail essentiel étant dans le partage d'informations brutes ou issues de modèles. La bonne conduite de ces réunions est assurée par un animateur. Ces dispositifs ont l'inconvénient d'être lourds et difficiles à mettre en œuvre dans le contexte de notre application. En effet, les acteurs sont nombreux, hétérogènes et difficile à mobiliser.

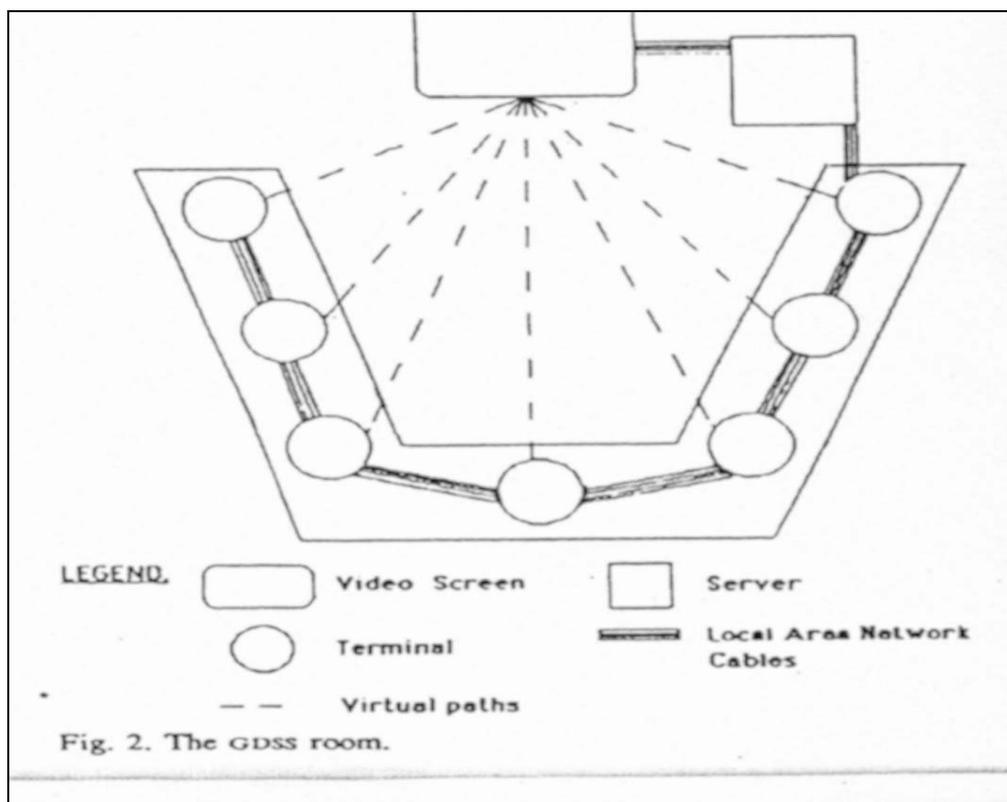


Figure 2 : Dispositif de réunion mettant en œuvre un GDSS [Jelassi et Beauclair, 1987].

4 Conclusion

Dans la communauté des agents artificiels, le comportement rationnel, notamment l'action vers l'accomplissement des buts, a été le sujet d'étude aussi bien en intelligence artificielle qu'en théorie de la décision. En intelligence artificielle, les chercheurs ont étudié ce comportement rationnel surtout du point de vue des modalités par lesquelles les agents atteignent leurs buts, et ils se sont particulièrement intéressés aux problèmes de planification : quelles sont les actions à effectuer pour arriver à un certain but ? Cette approche est aussi connue comme "raisonnement orienté modalité".

En théorie de la décision, le principal point d'intérêt a été un peu différent : lorsqu'un agent connaît les alternatives permettant de réaliser ses buts, comment doit-il les évaluer afin de choisir la meilleure voie à suivre ? Ce choix devrait être fait en fonction des utilités associées par l'agent aux divers états désirables.

Il est certain qu'un agent rationnel doit prendre en compte les deux aspects :

- les modalités ou actions pour atteindre ses buts
- le choix des actions qui peuvent lui apporter la plus grande utilité.

Il faut aussi tenir compte du fait que, dans une application réelle, l'agent a un temps limité pour réaliser ses buts. En effet, dans un modèle théorique, un agent peut passer autant de temps qu'il sera nécessaire à évaluer diverses actions possibles; mais en réalité le temps dont l'agent dispose pour choisir la meilleure action est fini (l'agent est limité du point de vue ressources c'est-à-dire en temps de calcul et/ou en capacité de la mémoire de l'ordinateur). Par conséquent, un agent artificiel conçu pour une application réelle doit trouver le juste équilibre entre le temps passé à décider entre actions compétitives et le temps mis à effectuer ces actions.

Même si on ignore le problème du choix des actions les plus désirables, si l'agent développe un plan dans un environnement, il est bien possible que les conditions de l'environnement au moment où le plan a été fait soient différentes de celles qui règneront au moment où le plan sera exécuté. Par exemple, l'environnement est non déterministe et comprend plusieurs agents ; chaque agent agit et modifie, d'une façon ou d'une autre, l'environnement. Ce problème est toujours lié aux ressources limitées de l'agent, car l'agent a besoin d'un certain temps pour établir son plan d'action et, pendant ce temps, l'environnement peut changer. Dans ce cas, est-ce que l'agent doit toujours vérifier, avant d'effectuer une action, si les conditions de l'environnement ont changé ? Et si oui, doit-il refaire son plan à chaque fois ? On rencontre

alors le même problème : trouver un juste équilibre entre planification et replanification, et faire des suppositions sur l'état de l'environnement.

L'architecture BDI (Beliefs, Desires, Intentions) qui sera décrite ultérieurement s'est d'ailleurs avérée comme une des architectures possibles pour résoudre ce type de problème.

Les différents modèles présentés et leurs hypothèses implicites renvoient à un débat explicité par Roy [Roy, 1992] sur l'objet de recherche dès lors que l'on s'intéresse à l'aide à la décision.

Dans une première approche (*Programmation linéaire, théorie de la décision et théorie des jeux*) où la quête de l'optimum existe indépendamment des acteurs, l'objet est la décision normative à élaborer.

Dans une seconde approche (*les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision*) où l'aide à la décision prend en compte explicitement le processus de décision, le processus de raisonnement devient l'objet de recherche.

S'agissant de l'aide à la décision de groupe et en particulier de l'aide à la résolution de conflits, il s'agit autant d'aider chaque individu dans la recherche d'une satisfaction que l'organisation collective. Actuellement, la tendance est à une forte demande d'outils pour l'aide à la négociation.

Chapitre 2

Modélisation et Simulation

Lorsque l'on souhaite passer du problème identifié à la simulation, cela suppose de franchir un certain nombre d'étapes : l'analyse, la modélisation, l'implémentation informatique et la simulation. Dans notre approche, nous nous intéresserons plus particulièrement à la phase de simulation.

Pour Quéau, « *la simulation consiste à mettre en œuvre des modèles dans des conditions variées, pour tenter d'explorer leurs possibilités, leurs défaillances, et éventuellement découvrir telle ou telle trajectoire comportementale encore inconnue* ». C'est « *un outil expérimental s'attachant à l'exploration non pas du réel mais des modèles qu'on s'en forme* », qui « *permet de modifier à petits risques, de jouer le stratège en chambre* » [Quéau, 1986].

L'aide à la décision est au cœur de la Recherche Opérationnelle (RO) et la simulation y occupe une place à part, à côté des techniques normatives telles que la programmation linéaire (mono et multipériodique, déterministe ou stochastique), des techniques issues de la théorie de la décision, des méthodes multicritères... En effet, ainsi que l'écrit Jacquet Lagrèze, « *la simulation ne permet pas de trouver une solution optimale, mais seulement une solution jugée satisfaisante pour illustrer la célèbre et importante distinction faite par Simon* » [Jacquet Lagrèze, 1989]. Enfin, à contrario de ces mêmes techniques, « *elle ne bénéficie ni d'axiomatiques établies ni d'algorithmes généraux. Aussi les méthodes de simulation nécessitent-elles une part importante de programmation dès lors que l'on souhaite implémenter le modèle sur ordinateur* » [Attonaty et al., 1990].

De son côté, Anderson [Anderson, 1989] définit la simulation comme une manipulation numérique d'un modèle symbolique conçu pour représenter l'évolution d'un système dans le temps. Ainsi qu'il le souligne par ailleurs, les processus mis en œuvre sont souvent de nature complexe et aléatoire, et les problèmes traités par cette approche sont typiquement peu structurés. Ces définitions nous paraissent bien préciser les contours d'une telle technique, la

référence unique à la manipulation numérique est toutefois à réenvisager. Si celle-ci est de mise traditionnellement en RO, l'Intelligence Artificielle a permis d'élargir cette « manipulation » à des concepts non numériques tels que la connaissance.

1 Du problème à la simulation

Passer du problème à la simulation suppose de franchir un certain nombre d'étapes. Pour Ricordel et Demazeau [Ricordel et Demazeau, 2000], celles-ci sont au nombre de quatre :

- 1 **L'analyse.** Elle correspond au processus de découverte, à la description du type de problème et à son domaine d'application.
- 2 **La modélisation.** Elle correspond au processus de définition d'une représentation structurée alors que les problèmes sont souvent à la base non structurés. Cette définition peut être donnée sous un mode déclaratif ou s'appuyer sur des langages spécifiques (UML, MERISE, réseaux de Petri...).
- 3 **L'implémentation informatique.** Elle correspond au processus de construction d'une solution fonctionnelle du problème. En pratique, cela consiste à coder la solution avec des langages particuliers de programmation.
- 4 **La simulation.** Elle correspond à la phase d'utilisation du modèle implémenté pour des problèmes concrets.

Soulignons toutefois que ces étapes ne se parcourent généralement pas de façon séquentielle mais plutôt itérative et incrémentale. La Figure suivante (Figure 3) résume le processus de conception de tout instrument d'aide à la décision. On pourra parler de « *problem finding* » plutôt que de « *problem solving* ».

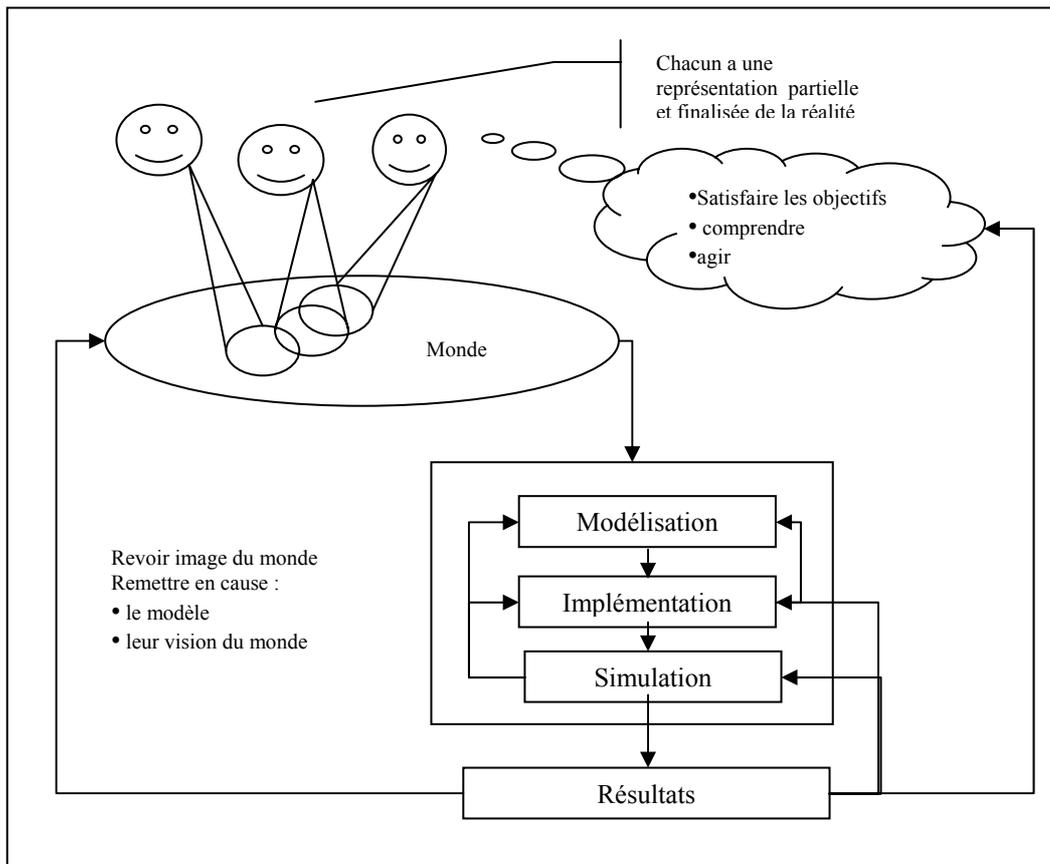


Figure 3 : Du modèle à la simulation : un processus non linéaire.

Par ailleurs, ainsi que le présente Drogoul [Drogoul, 1992] (Figure 4), tout modèle se réfère à une ou plusieurs théories souvent implicites. Par théorie, on entendra par exemple, les théories des rationalités des acteurs, la théorie de la décision vs la théorie de l'aide à la décision [Roy, 1992]...

S'agissant de la modélisation, Bousquet [Bousquet, 1994] et Paz Bétancourt [Paz Bétancourt, 1997] distinguent cinq familles de modèles :

1. les modèles statiques (modèles de régression) et les modèles dynamiques,
2. les modèles prédictifs ou empiriques qui résument un ensemble de relations et les modèles explicatifs qui s'appuient sur la compréhension de ces relations,
3. les modèles déterministes et les modèles stochastiques qui sont fondés principalement sur la notion de hasard dans le tirage de certaines valeurs de paramètres,
4. les modèles à résolution analytique et les modèles nécessitant des simulations,

5. les modèles dynamiques qui évoluent dans le temps.

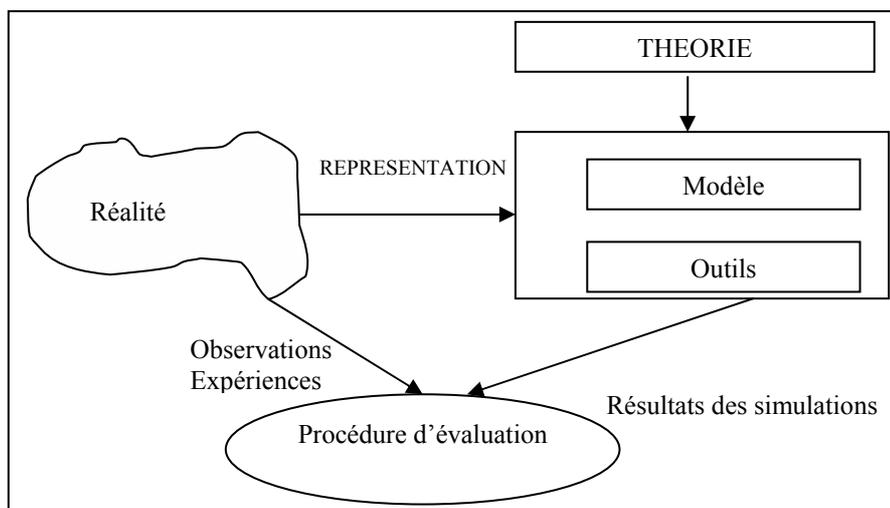


Figure 4: Processus de simulation [Drogoul, 1992]

Concernant la simulation, on s'attachera par la suite plus particulièrement à la simulation multi-agent. Elle propose de créer un monde artificiel dans lequel interagissent des agents évoluant dans un environnement. Les Systèmes Multi-Agents (SMA) apportent une solution nouvelle au concept même de modèle et de simulation dans les sciences de l'environnement ([Barreteau, 1998] [Bousquet et Le Page, 2001] [Doran, 2001] [Fiango, 2001]...) et les sciences socio-économiques ([Axelrod, 1997] [Conte, 2001] [Moss, 2001] [Terna, 1998] [Tesfatsion, 2001]). Axtel [Axtel, 2000] met en avant l'intérêt de cette approche qui autorise de faire appel à des rationalités autres que la rationalité complète. Il rappelle également que même si l'on souhaite utiliser des agents à rationalité complète, il est possible de représenter des agents hétérogènes. On peut par exemple instancier une population d'agents avec des préférences différentes ou des fonctions d'utilité faisant appel à des critères différents.

D'après Drogoul [Drogoul, 2000] les simulations Multi-Agents peuvent être utilisées pour (Figure 4) :

- *Tester des hypothèses* sur l'émergence de structures sociales selon le comportement et l'interaction de chaque individu.
- *Construire des théories* qui peuvent contribuer au développement général et à la compréhension de l'éthologie, de la sociologie, et de systèmes psycho-sociologiques en représentant le comportement organisationnel et structurel d'un agent.

- *Intégrer différentes théories* provenant de disciplines variées telles que la sociologie, l'éthologie, l'ethnologie....

2 Simulation et prise en compte du temps

S'agissant de la dynamique d'un système, Cassandras et Lafortune [Cassandras et Lafortune, 1999] proposent la classification présentée sur la Figure 5. On s'intéressera plus particulièrement aux modèles impliquant la notion de temps (horloge) ou d'évènements, et, dans ce dernier cas, en situation déterministe.

Comme souligné plus haut, la définition du temps est un problème central en simulation [Anderson, 1989]. Dans une simulation, plusieurs entités de temps peuvent coexister [Fianyo, 2001]. Une situation couramment rencontrée se réfère à deux types de temps : (i) Le temps de la simulation lui-même qui détermine le cycle d'exécution du simulateur. Ce cycle pourra être régulier ou le résultat de sauts dans le temps. (ii) Le temps de référence, qui correspond à un calendrier, permettra de recalculer les résultats de la simulation de façon systématique. A l'inverse, bien que dynamique un simulateur peut ne pas faire référence au temps. Le cas typique est celui rencontré dans la simulation fondée sur des équations différentielles pour le changement d'état.

S'agissant du temps de la simulation, on distingue deux modes de gestion de la dynamique d'un système. Cette gestion dépend (i) soit d'une horloge – on parlera alors de simulation continue - Dans cette situation on associe au temps une dimension dans laquelle un pas de temps est défini (exemple, heure, jour, mois,...). (ii) soit de l'occurrence d'évènements – on parlera alors de simulation à évènements discrets – Le système évolue alors par sauts successifs en différents points du temps. Par exemple, le contexte agricole est marqué par l'existence naturelle d'une succession d'évènements ou de périodes que l'on peut assimiler à des évènements ponctuels [Pasquier, 1995].

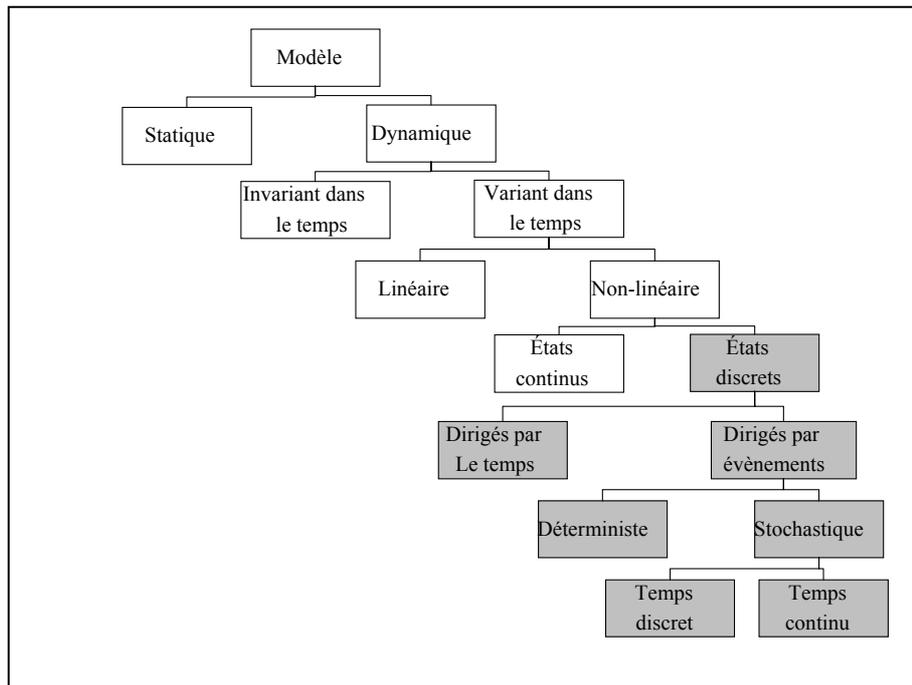


Figure 5 : Classification des systèmes de simulation [Cassandras et Lafortune, 1999]

2.1 La simulation continue

Dans ce type de simulation, un cycle est effectué à chaque incrémentation d'une unité de temps. Au cours de ce cycle, seules les actions concernées par cette date seront exécutées. L'ensemble des actions potentielles peut alors être vide.

Ce type de simulation est particulièrement adapté aux systèmes évoluant de façon systématique et régulière. Il en est ainsi de systèmes biologiques et environnementaux [Barreteau, 1998] [Drogoul, 1992] [Feuillette, 2001] et de gestion de flux [Rao et Georgeff, 1995] [Zeng et Sycara, 1999].

La détermination du meilleur pas de temps possible n'est pas toujours évidente, d'autant plus que des processus avec des pas de temps différents peuvent interagir [Fianyo, 2001]. Ceci pose le problème de couplage et prendre le pas de temps le plus fin n'est pas forcément la solution la plus pertinente.

Par contre, pour des systèmes évoluant par sauts, la simulation à évènements discrets peut s'avérer plus intéressante.

2.2 La simulation à évènements discrets

Traditionnellement, les systèmes à événements discrets sont gérés de façon séquentielle [Misra, 1986] [Fianyo et Boivin, 2000]. A chaque cycle de simulation un seul événement est déclenché et la liste est reclassée si de nouveaux événements apparaissent. L'événement exécuté est supprimé et le cycle suivant prendra le premier élément de la liste (FIFO).

L'exemple le plus dépouillé de ce type de simulation est celui de modèles de changement d'état fondé sur des modèles mathématiques tels que les équations différentielles [Drogoul, 1993]. Dans ce type de modèle, la notion de temps disparaît. Il en est de même de nombreux modèles appliqués à la robotique qui prennent en compte une séquence d'actions à entreprendre sans leur attribuer une durée [Lee *et al.*, 1994].

2.3 La simulation distribuée

Dans la simulation discrète plusieurs processus peuvent être simulés en même temps. Ce faisant, chaque processus ayant son propre cycle de simulation, leur gestion simultanée par le simulateur suppose la référence à une horloge commune. La forme la plus achevée de ce type de simulation fait appel à des machines multi-processeurs voire à plusieurs machines fonctionnant en parallèle. Ce type d'implémentation, ainsi que le souligne Misra [Misra, 1986], est particulièrement adapté aux problèmes nécessitant la mise en œuvre de nombreux processus en parallèle et qui entraînerait, une durée de simulation inacceptable dans une approche classique. Par ailleurs, les applications liées à Internet sont tout à fait redevables de ce type d'approche. Cette gestion des processus en parallèle pose de façon singulière le problème du temps. De nombreux travaux sont conduits pour maîtriser la chronologie des événements [Jefferson, 1985] [Misra, 1986]. Ainsi, des algorithmes sont proposés pour garantir la règle de causalité, à savoir, qu'un événement E' dépendant d'un événement E ne doit en aucun cas être exécuté avant E dont il dépend [Misra, 1986].

Nous ne mobiliserons pas ce type de simulation n'ayant pas une application nécessitant obligatoirement une gestion de processus en parallèle. Par contre, notre problème nous amènera particulièrement à traiter la gestion de processus mixtes redevables, soit de l'approche en continu, soit de l'approche à événements discrets.

En dehors des approches citées précédemment pour lesquelles on peut faire abstraction du temps, qu'ils s'agissent des simulations dirigées par une horloge ou dirigées par des

événements, le temps reste l'élément moteur de la simulation et détermine le cycle du système simulé.

3 La question de validation des systèmes complexes

La modélisation implique de prendre en compte la question de validation dans les modèles proposés. La validation de modèles multi-agents ainsi que de tout modèle pose un réel problème du fait de la complexité des différents processus représentés.

Pendant de nombreuses années le fait selon lequel un modèle pouvait être envisagé comme une hypothèse scientifique a été débattu sans pouvoir être résolu.

Dans ce débat, Levins [Levins, 1966] écrit : « *un modèle mathématique n'est ni une hypothèse, ni une théorie. Contrairement à des hypothèses scientifiques, un modèle n'est pas vérifiable directement par des expériences. Les modèles sont à la fois vrais et faux... beaucoup est oublié et dans ce cas les modèles sont faux, incomplets ou inadéquats. La validation d'un modèle n'est pas ce qui est vrai mais ce qui est généré de façon bonne et pouvant tester le niveau des hypothèses, elle révèle des problèmes importants.* »

Ici le terme validation n'est pas utilisé dans un sens quantitatif ou technique mais comme valeur de jugement fondée à partir des expériences faites avec un modèle.

Goodall [Goodall, 1972] compare la validation à un test qui permet de déterminer le degré de satisfaction entre un modèle et un système réel. Il suggère qu'une question importante est de savoir comment évaluer si les prédictions faites par un modèle sont acceptables ou réfutables (en tenant compte des hypothèses testées). Cet auteur considère que la validation n'est pas absolue car il n'y a aucune validation standard.

La validation n'est pas uniquement une procédure qui permet de tester une théorie scientifique ou de certifier la pensée scientifique mais elle peut être un moyen (i) de décider si un modèle est acceptable en fonction de son utilisation possible, (ii) de démontrer qu'un modèle (dans son domaine d'application) est satisfaisant en observant les résultats du modèle avec ceux attendus (*data validation, face validation, ...*).

Mais comment pouvons nous décider si un modèle est acceptable pour une utilisation future ? Comment pouvons nous décider si un système est correct ou non à la lumière de ces résultats ?

La plupart des techniques de validation présentées dans la littérature proviennent des domaines de la modélisation et simulation [Cordier, 1999]. La description de ces techniques peut être trouvée dans la littérature faisant référence à la simulation. La taxonomie présentée par Balci [Balci, 1997] se décompose en quatre catégories [Balci, 1997] :

1. Les techniques informelles sont les techniques les plus utilisées. Elles sont appelées informelles car les outils et approches utilisées relèvent d'un raisonnement humain sans formalisme mathématique.
2. Les techniques statiques n'impliquent pas toujours une exécution machine pour les résoudre mais peut utiliser des compétences humaines. Ces techniques permettent d'obtenir une variété d'informations sur la structure du modèle par exemple, ou sur les techniques de modélisation, les pratiques employées, le flux des données ou encore le contrôle dans ce type de modèle.
3. Les techniques dynamiques impliquent l'exécution d'un modèle et permettent d'évaluer le modèle fondé sur son comportement d'exécution. La plupart des techniques de validation et vérifications dynamiques imposent l'instrumentation de modèle, c'est à dire l'introduction de code dans le modèle exécutable pour la collecte d'informations sur le comportement du modèle durant l'exécution. On peut diviser ce type d'approche en trois phases, la première où le modèle exécutable est instrumentalisé, la deuxième consiste à exécuter ce modèle et enfin la troisième où les sorties sont analysées et le modèle dynamique évalué.
4. Des techniques formelles fondées sur des preuves mathématiques.

Ce problème de la validation se pose d'autant plus dans les SMA que la communauté scientifique travaille beaucoup sur la conception d'instruments à vocation générale et réutilisable. Le paradigme multi-agent fournit un nombre important d'avantages mais il est de plus en plus difficile de conceptualiser les processus de vérification et validation. En effet, la dynamique et les divers modules en interactions, la représentation séquentielle, le niveau d'héritage et des relations d'agrégation ne facilitent pas le processus de validation.

Balci [Balci, 1997] a défini une taxonomie composée de 38 techniques de vérification et validation pour les modèles de simulation orientés objets. Ces techniques sont présentées sur la figure suivante (Figure 66).

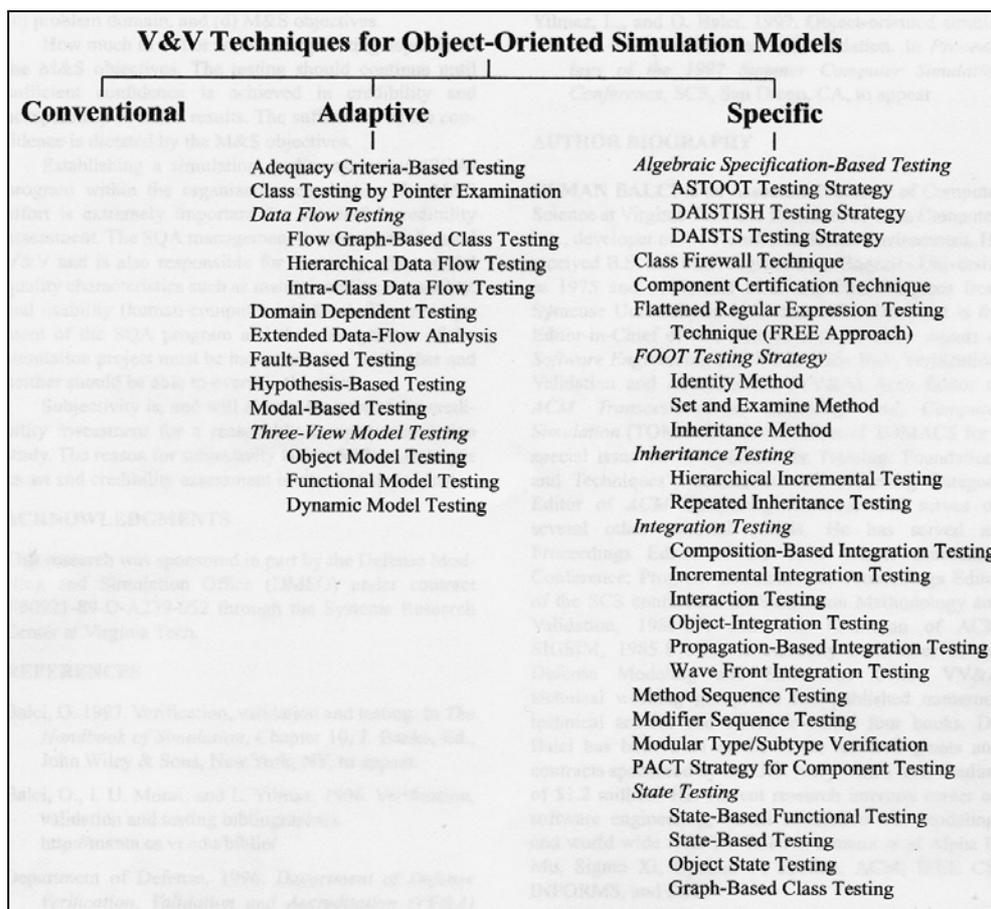


Figure 6 : Taxonomie de la vérification et validation pour les modèles de simulation orientés objet [Balci, 1997]

Cette taxonomie est divisée en plusieurs sous groupes [Balci, 1997] :

1. Des techniques conventionnelles.
2. Des techniques adaptatives qui font références aux techniques de vérification et validation qui peuvent être utiliser dans un contexte adaptatif en relation avec la conception objet.
3. Des techniques spécifiques qui sont des techniques nouvelles fondées sur le formalisme objet.

Dans un cycle d'analyse et modélisation, d'implémentation informatique du modèle et de simulation, la validation a lieu à différentes étapes [Donnelly et Moore, 1997] [Qureshi *et al.*, 1999] [Meurisse et Vanbergue, 2001] [Moss, 2001] [Rykiel, 1996] [Pinson *et al.*, 1997]: Au niveau des données, au niveau conceptuel et au niveau opérationnel (Figure 7).

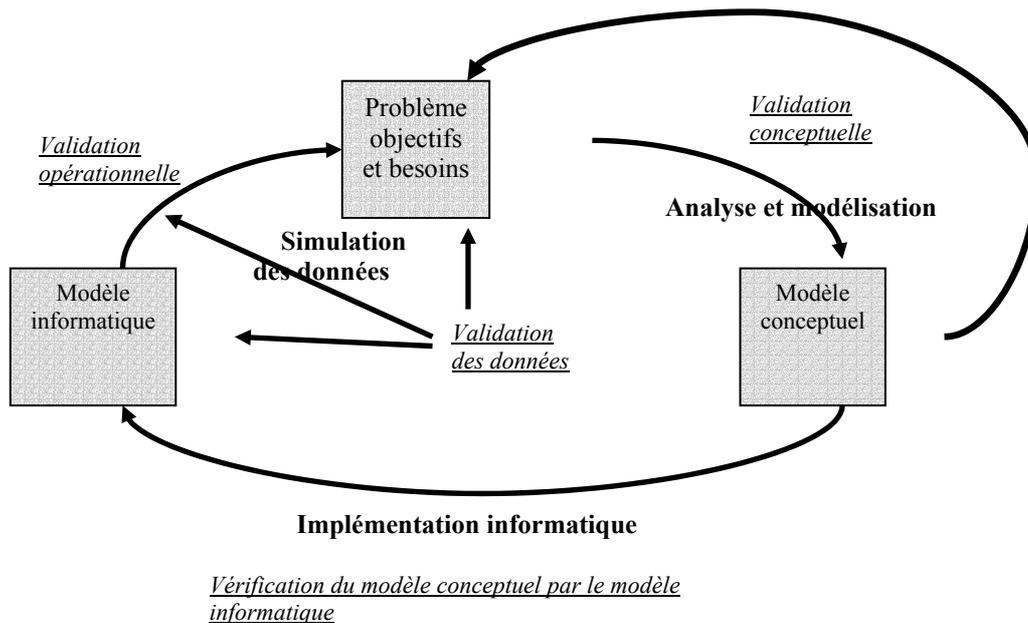


Figure 7: Diagramme représentant le cycle de modélisation et la position des différents processus de validation : opérationnelle, conceptuelle, des données [Rykiel, 1996].

La validation des données :

Elle permet de certifier selon Rykiel [Rykiel, 1996] que les données représentent le système réel et constituent le meilleur test pour le modèle.

- Une des validations que l'on utilisera dans notre approche est la validation « humaine » (*Face Validity*). Elle se fait à l'aide des connaissances de personnes concernées par le problème et familières de celui-ci. On valide par des tests d'entrée sortie pour vérifier les résultats du modèle avec ces personnes, souvent des experts du domaine.
- La validation par des données historiques permet de caler le modèle sur des résultats connus par des experts du domaine.
- La Validation par des tests dans des conditions extrêmes.

La validation conceptuelle :

Elle (ou adéquation analytique) signifie que les théories et les hypothèses qui sont à la base du modèle conceptuel sont correctes ou du moins justifiables et que le modèle de représentation du problème ou du système, sa structure, et ses relations logiques, mathématiques et causales sont corrects par rapport à l'utilisation attendue du modèle.

La validité conceptuelle est considérée comme une justification acceptable du contenu scientifique dans le modèle mais ne garantit pas que le modèle donnera des prédictions exactes.

La Figure 8 présente la portion de la démarche scientifique concernée par la validation conceptuelle.

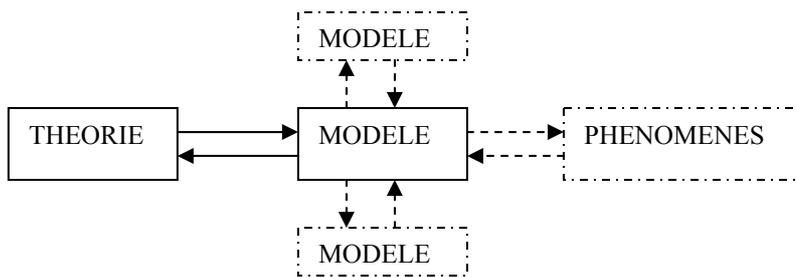


Figure 8 Validation conceptuelle ou adéquation analytique

Il est ainsi possible de valider un modèle à partir de théories ou plutôt de construire un modèle qui corresponde à un certain nombre de présupposés conceptuels. Ainsi, Lomi *et al.*(2001) développent un modèle d'évolution de la densité d'une population jusqu'à la reproduction par le modèle de situations d'équilibre, de résurgence, de fluctuation périodique, d'oscillation et d'extinction. Des ajouts sont faits (décalage temporel dans l'allocation des ressources, boucle de rétroaction entre ressources et nombre d'organisation,...) jusqu'à ce que le modèle se comporte de façon adéquate.

Pour Carley (2002), il convient tout d'abord d'utiliser « *des techniques simples pour voir si les résultats du modèle sont raisonnables, et de démontrer la validité en se demandant si le modèle peut générer des faits stéréotypés, tous les modèles de diffusion doivent par exemple générer des courbes d'adoption en S* ».

La logique de la réfutation poppérienne repose sur le principe qu'un seul fait observé peut contribuer à infirmer une théorie mais non à la vérifier [Popper, 1972]. Il ne s'agit pas d'une logique de preuve mais d'une logique de réfutation. La démarche ne consiste pas à tenter de réfuter une théorie à partir d'éléments observés, mais de confronter un modèle autonome à un jeu de théories admises, de résultats connus. La logique de réfutation poppérienne est donc utilisée dans une démarche réaliste, au sens épistémologique du terme. Si l'adéquation analytique u modèle est démontrée, ce dernier pourra être considéré comme un outil de corroboration d'hypothèses [Carley, 1995].

La validation opérationnelle :

La validation opérationnelle est une partie du processus de validation qui permet de démontrer que les capacités du modèle sont valables dès le départ c'est à dire au niveau du processus de construction et ceci jusqu'à ce que le niveau de performance souhaité soit atteint.

tel-00011210, version 1 - 15 Dec 2005

Pour une validation opérationnelle, la démonstration conduit à une comparaison entre les données simulées et celles attendues par observation et mesure sur le monde réel. Des tests statistiques de comparaison entre les données simulées et les données réelles sont classiquement utilisés pour évaluer le comportement du modèle. Des méthodes statistiques, inférences et descriptives sont parfois utilisées pour comparer le modèle et les sorties du système réel. L'inférence statistique introduit des tests d'hypothèses (*T Test*; *KS test*, *Turing test*) et des intervalles de confiance. La statistique descriptive (moyenne, variance, auto corrélation, graphes) est facilement utilisée pour comparer les sorties du modèle avec celles de la réalité. Par contre, les tests statistiques ne peuvent jamais prédire si le modèle est valide au un sens absolu du terme, car le modèle est simplifié. Si les sorties du modèle correspondent aux données réelles alors le modèle est en adéquation avec la représentation du monde modélisé. Cela ne garantit pas pour autant que les bases scientifiques du modèle et sa structure interne correspondent aux processus actuels ou aux relations de cause à effet dans le système réel. Enfin, de tels tests ne permettent pas de démontrer la validité logique du contenu du modèle scientifique. En effet, si le contexte change, le modèle doit être réévalué, ce qui ne remet pas en cause le contexte pour lequel le modèle est déjà valide.

La validation opérationnelle peut s'envisager par (i) une comparaison du modèle avec des modèles déjà validés, (ii) par une analyse de flexibilité du modèle c'est à dire comment le modèle évolue face aux modifications, (iii) une validation interne du modèle en utilisant un ensemble de données tests pour s'assurer si les sorties sont consistantes à chaque pas de la simulation.

A ces différentes validations, nous ajouterons celle de la validation par l'usage [Hemidy, 1992]. En effet, l'appropriation d'un instrument par les acteurs auxquels il est destiné est fondamentale dès lors que l'objet de la recherche est l'aide à la décision [Roy, 1992].

CONCLUSIONS

Le cycle de vie d'un outil de simulation peut donc s'envisager selon différentes phases : conception du modèle, conception de la solution opérationnelle, vérification interne par l'expert informatique, validation par l'expert du domaine.

Si le domaine est complexe, on observe souvent lors de la phase de validation une demande de modification du modèle de conception et donc du modèle opérationnel.

Quand les tests de validation échouent, différentes constatations sont possibles :

- le modèle peut être recalibré en modifiant les valeurs des paramètres

- Le modèle peut être modifié de façon structurelle et conceptuelle en révisant les hypothèses et en changeant la représentation des processus mathématiques ou logiques.
- L'application du modèle doit être réduite à un petit domaine où il est possible de faire des tests de validation.
- L'échec d'un test de validation peut être considéré comme invalidation du modèle.
L'invalidation signifie qu'un modèle ne peut pas être exécuté au niveau requis.

Chapitre 3

Les Systèmes Multi-Agents

1 Introduction

Initialement, le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA) cherche surtout à décrire et à résoudre des problèmes complexes identifiés par des experts. Dans ce domaine, il est possible de construire des programmes informatiques, capables d'exécuter un nombre important de tâches en centralisant « l'intelligence » au sein d'un système unique [Erceau et Ferber, 1991].

Il est cependant difficile d'entrer dans une même « base », les connaissances, les compétences d'individus totalement différents qui communiquent entre eux.

L'apport de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) permet de « distribuer l'intelligence » entre plusieurs agents¹. Comme le souligne Bond et Gasser [Bond et Gasser, 1988] l'intelligence Artificielle Distribuée présente les avantages suivants :

- L'IAD est bien adaptée à la distribution de problèmes spatiaux, logiques...
- L'héritage de modules permet aux différentes parties du système de développer de façon indépendante un système continu et extensible,
- Les processus distribués entre différents ordinateurs augmentent la vitesse de calcul et de raisonnement,
- Le contrôle du processus local peut être isolé ou séparé du système,
- Dans certain cas, les systèmes confèrent aux agents individuels des ressources limitées pour résoudre les problèmes et la coopération et la coordination sont essentielles à la résolution de ces problèmes. Bien que les agents soient relativement frustes, les problèmes auxquels ils sont confrontés peuvent être complexes.

¹ La distinction entre acteur et agent établie par Ferrand [Ferrand et Deffluent, 1998] est la suivante : « Un **acteur** est un individu ou un groupe d'individus intervenant au sein d'un processus social. Le terme se réfère ici à la réalité sociale. Un **agent** est une entité conceptuelle participant à un modèle ou un Système Multi-Agent. Le terme se réfère au modèle ou à son implémentation. »

Une des branches issue de ce domaine, les Systèmes Multi-Agents (SMA), permet d'introduire dans un système, un ensemble d'individus (ou agents) dotés de connaissances, d'intentions et de capacité d'évolution différente. Ces agents sont capables d'interagir entre eux.

« Dans le cadre général des sciences de la complexité, qui propose de reposer les questions scientifiques par l'étude des interactions entre entités élémentaires et de leurs organisations, les chercheurs en SMA vont participer à cette dynamique dans un double mouvement. D'une part, les SMA vont constituer une méthode pour catalyser la reformulation de certaines questions en sciences sociales et en sciences de la nature. D'autre part, les chercheurs informaticiens vont puiser dans cette interaction les éléments pour mieux préciser les questions et proposer de nouveaux concepts dans leur discipline. » [Bousquet et Le Page, 2001]

D'un point de vue informatique, l'approche multi-agent peut être considérée comme une évolution du paradigme orienté-objet. Du point de vue conceptuel, un objet est simplement une structure de données à laquelle sont associées des fonctions. Les agents sont des entités autonomes, ce qui signifie que leur comportement ne dépend pas d'une pression extérieure, contrairement aux objets. (Figure 9)

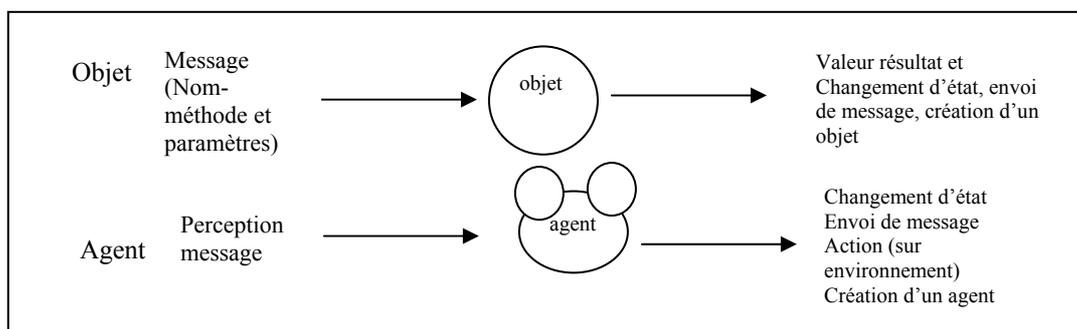


Figure 9 : Différences entre objets et agents [Briot, 2002]

D'un point de vue transdisciplinaire, le concept d'agent a fait l'objet d'études depuis plusieurs années dans des disciplines telles que : l'écologie, l'éthologie, la psychologie, la sociologie, l'économie...

1.1 Définitions des Systèmes Multi-Agents

Parmi les différentes définitions des systèmes multi-agents nous retiendrons celle de Ferber [Ferber, 1995] qui le définit comme un système composé des éléments suivants (Figure 10):

1. Un Environnement E , c'est-à-dire un espace disposant d'une métrique.

2. 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.
3. Un ensemble A d'agents qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O .
6. 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.

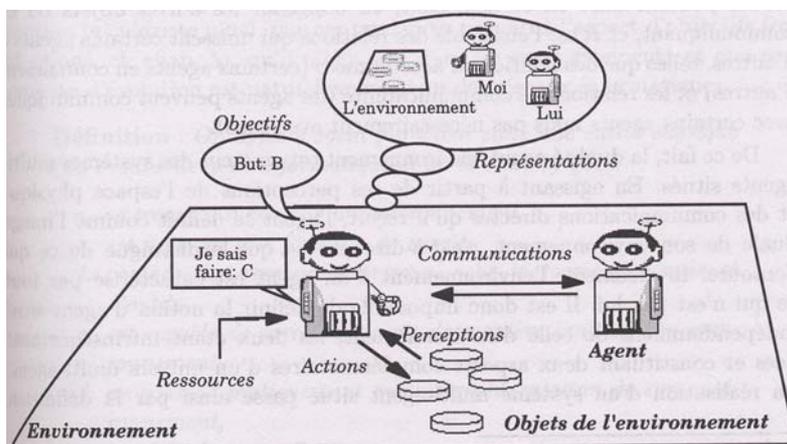


Figure 10 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents [Ferber, 1995]

1.2 Les avantages

L'utilisation des Systèmes Multi-Agents (SMA) présente une série d'avantages [Brandolese *et al.*, 2000] :

- *Système dynamique.* Les SMA héritent des bénéfices de l'IA au niveau du traitement symbolique (au niveau des connaissances). En revanche, contrairement aux approches traditionnelles de l'Intelligence Artificielle qui simulent, dans une certaine mesure, les capacités du comportement humain, les SMA permettent de modéliser un ensemble d'agents qui interagissent. Les agents sont structurés afin d'exercer une influence sur chacun pour faire évoluer le système dans son ensemble (système dynamique). On rencontre

de nombreuses interactions entre agents telles que la coordination (organiser la résolution d'un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées, ou que les interactions bénéfiques soient exploitées), la négociation (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées), la coopération (travailler ensemble à la résolution d'un but commun) [Chaib-Draa *et al.*, 2001]. Cette approche est particulièrement bien adaptée à la simulation des systèmes complexes dont le fonctionnement global émerge des actions des individus. Les SMA permettent de faire vivre virtuellement des agents autonomes sur ordinateur et d'y effectuer des expériences difficiles, voire impossible à mener dans la réalité, d'où la qualification de laboratoires virtuels [Treuil et Mullon, 1997].

- *Nombre important d'agents.* Un grand nombre d'agents est au cœur du problème dans ce type de modélisation contrairement à la théorie des jeux où rarement plus de trois acteurs sont représentés [Moss, 2001].
- *Souplesse de l'outil informatique* qui permet de modifier le comportement des agents, ajouter ou supprimer des actions possibles, étendre les informations disponibles à l'ensemble des agents à la différence des modèles traditionnellement utilisés en science économique. Le modèle Multi-Agent est rendu opérationnel grâce à une implémentation informatique qui n'impose alors aucune exigence analytique spécifique mais l'emploi des langages informatiques évolués (Langage Orienté Objet (LOO)) qui permet de développer le programme de façon modulaire. La programmation des processus au niveau local dans différents modules et l'utilisation d'entités individualisées apportent alors une grande flexibilité. Les modifications ne nécessitent pas de large restructuration du programme.
- *Une résolution distribuée de problèmes.* Il est possible de décomposer un problème en sous-parties et de résoudre chacune de façon indépendante pour aboutir à une solution stable. Cette solution n'est pas forcément optimale au sens de la rationalité complète mais elle peut être « satisfaisante » au sens de Simon [Simon, 1969].
- Les SMA peuvent « répondre » de l'échec individuel d'un des éléments, sans dégrader le système dans son ensemble.

1.3 L'environnement

Un agent est situé dans un **environnement**. Pour modéliser la structure de l'agent il faut avoir un modèle de l'environnement. L'environnement peut être vu comme étant dans un état e parmi

un ensemble d'états $E = \{e_1, \dots, e, \dots\}$ L'environnement peut changer son état soit d'une manière spontanée soit comme résultat des actions de l'agent.

L'évolution de l'environnement se modélise différemment selon les caractéristiques que l'on prend en compte, et les simplifications que l'on s'autorise. Les principales distinctions à faire sur les types d'environnements sont [Ferber, 1995] [Russel et Norvig, 1995]:

- **Accessible vs inaccessible** : un environnement accessible est un environnement dans lequel l'agent peut obtenir une information complète sur l'état de cet environnement. Le plus accessible des environnements est celui construit pour que les agents puissent y agir.
- **Déterministe vs non-déterministe** : un environnement déterministe est un environnement dans lequel les actions ont un effet. Il n'y a pas d'incertitude sur l'état qui résultera de l'action en cours.
- **Épisodique vs non-épisodique** : dans un environnement épisodique, la performance d'un agent est dépendante du nombre d'épisodes discrets, et sans aucun lien avec la performance d'un agent dans différents scénarios, par exemple, un courrier sortant du système.
- **Statique vs dynamique** : un environnement dynamique est un environnement dans lequel aucun autre processus n'agit sur lui.
- **Discret vs continu** : un environnement est discret s'il y a un nombre fini d'actions possibles. L'échiquier d'un jeu de dame est l'exemple d'un environnement discret. Par contre un chauffeur de taxi évolue dans un environnement continu.

Les caractéristiques de l'environnement influencent la façon dont on conçoit un agent car il faut tenir compte de l'évolution de l'environnement, de la capacité de l'agent de saisir cette évolution et de sa capacité à décider en conséquence. Par exemple, si on a plusieurs agents qui agissent dans un même environnement, chaque agent va percevoir l'environnement comme dynamique et non déterministe, car l'état de l'environnement changera en raison des actions des autres agents, et une même action exécutée dans un certain état aura des résultats différents en fonction des actions de ces autres agents.

L'environnement peut être utilisé implicitement par les agents pour interagir. Dans [Le Strugeon, 1995], le système multi-agent gère une équipe de robots devant explorer une planète. Dans cette application « *le SMA perçoit et agit sur son environnement* » mais l'environnement lui ne peut agir sur cette application : « *l'environnement est conçu comme une entité globale statique, ce qui signifie qu'il n'évolue pas lui-même mais en fonction des actions effectuées sur*

lui ». Dans cet exemple, l'interaction est implicite puisqu'un agent peut constater une modification de l'environnement sans en connaître nécessairement la cause (un autre agent, évolution normale de l'environnement...) [Balbo, 2001]. L'interaction entre les agents par perception de l'environnement est souvent utilisée pour représenter les modèles biologiques comme les fourmis [Drogoul, 1993] [Nakamura *et al.*, 1995] ou les araignées [Bourjot *et al.*, 1999]. Pour les fourmis, la communication est explicite dans le sens où chaque agent décide de déposer un message dans l'environnement et c'est la proximité d'un agent avec le message qui transforme ce dernier en récepteur [Drogoul, 1993] [Nakamura *et al.*, 1995].

Le concept de blackboard [Carver *et al.*, 1992] est souvent utilisé comme environnement commun d'interaction. Dans ce cas, le tableau noir constitue une mémoire partagée entre les agents [Corkill *et al.*, 1986] [Chaib-Draa, 1987] [Maitre *et al.*, 1990] [Moraitis, 1994], où chacun peut écrire et lire des messages, des plans partiels. Dans [Pinson *et al.*, 1997], le système multi-agent comporte quatre tableaux noirs qui sont utilisés par les agents pour échanger leurs propositions quant à la résolution du problème.

Dans notre modèle multi-agent nous utilisons cette dernière représentation de l'environnement pour permettre aux agents d'interagir.

1.4 Conclusion

Dans le cadre du problème posé, un certain nombre de caractéristiques se dégagent :

- Un grand nombre d'acteurs est concerné (agriculteurs éventuellement regroupés en Association Syndicale Autorisée (ASA), des fournisseurs d'eau autres que l'ASA, des Associations de Protections de la Nature (APN), des pêcheurs, la puissance publique, des industriels (EDF par exemple), des communes, ...).
- Le comportement et les objectifs de ces protagonistes présentent une grande hétérogénéité. En particulier différentes formes de rationalité peuvent intervenir dans la prise de décision (rationalité complète, rationalité limitée, rationalité procédurale, rationalité adaptative, ...).
- Les décisions de ces acteurs ne s'inscrivent pas dans une dynamique hiérarchique. On s'attachera donc à respecter la dimension autonome de chacun d'entre eux.
- Enfin, ces acteurs interagissent dans le cadre de comportements sociaux.

Ces différents aspects nous ont conduit à adopter les concepts multi-agents pour modéliser le système et en simuler l'évolution en fonction des différentes règles d'allocation d'eau testée. A notre sens, l'approche multi-agent offre un cadre structurant pour notre approche :

- Elle réserve une place privilégiée à la confrontation : d'une part, de processus décisionnels individuels (autonomie), d'autre part, de comportements sociaux (interactions, accointances, échanges d'informations et de services, négociation, coordination, coalition,...). Au cœur de cette dualité on trouve le concept d'émergence². La rationalité collective est ainsi vue comme une propriété émergente de l'interaction entre les différents acteurs et non pas comme la simple combinaison de rationalités individuelles prises une à une. Ainsi « l'intelligence du système » émerge du système composé d'agents et de leurs interactions les uns avec les autres.
- Elle met en avant l'étude de systèmes complexes dont le fonctionnement est typiquement non redevable d'un processus décisionnel centralisé et non réductible à une architecture hiérarchique. C'est donc une approche « *bottom-up* » (versus « *top-down* ») qu'elle met en avant.
- Elle repose sur une distinction nette entre environnement et agents [Ferber, 1995].

2 Les agents

Il existe un grand nombre de typologies d'agents [Ferber, 1995] [Chaib-Draa, 1996] [Huget, 1999] [Wooldridge et Jennings, 1994] mais celle que nous retenons, compte tenu du problème à modéliser, est fondée sur le processus de prise de décision de l'agent. Elle distingue trois types d'agents : réactifs, cognitifs ou délibératifs et hybrides.

Pour un certain nombre d'auteurs [Maes, 1994] [O'Hare et Jennings, 1996] [Weiss, 1999] un agent est défini comme étant une entité logicielle d'un système informatique qui possède les caractéristiques suivantes :

- **Autonomie** : les agents contrôlent leurs actions et leurs états internes. Le système dans son ensemble est capable de réagir sans l'intervention d'un humain ou d'un autre agent. Il n'y a pas de définition unique du terme agent, par contre, il y a un consensus général pour considérer l'autonomie comme notion centrale de l'agent.
- **Flexibilité** : le système doit être un système dans lequel (i) les agents perçoivent l'environnement et peuvent répondre dans le temps requis aux changements que celui-ci peut entraîner sur les agents (ii) les agents prennent en considération leur comportement

² Un système sera dit doté de propriétés émergentes s'il exhibe un comportement intelligible bien que non

général pour permettre de prendre les initiatives appropriées aux changements de l'environnement (iii) les agents interagissent avec les autres agents afin d'accomplir le but souhaité. Pour cela les agents ont donc les caractéristiques suivantes :

- *Réactivité* : ils perçoivent leur environnement et réagissent aux changements qui s'y produisent dans le temps requis ;
- *Proactivité* : ils exhibent un comportement proactif et opportuniste pour ne pas agir uniquement par réaction à leur environnement mais prendre des initiatives selon leurs buts individuels ;
- *Sociabilité* : ils sont capables d'interagir les uns avec les autres quand la situation l'exige afin d'accomplir leurs tâches ou d'aider les autres agents à accomplir leurs buts.

Cette définition d'agent est toutefois remise en question par certains auteurs. Pour Wooldridge et Ciancarini [Wooldridge et Ciancarini, 2000] «*elle est porteuse de problème car on peut tout y mettre*» et d'après Ferber [Ferber, 1995] elle est «*un peu limitée pour fonder scientifiquement quelque chose* ». Il propose la définition suivante :

«Une entité physique ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de son environnement, et qui, dans un Système Multi-Agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents ».

Pour Ferber [Ferber, 1995], la distinction cognitif/réactif «*définit un axe pratique d'évaluation de la capacité des agents à accomplir individuellement des tâches complexes et à planifier leurs actions.* »

2.1 Structure conceptuelle des agents

Les agents avec états

Les agents avec états, comme leur nom l'indique, maintiennent un état interne qui mémorise la séquence des perceptions de l'agent et, dans certains cas, les actions effectuées par l'agent. L'agent a besoin de maintenir cet état interne pour faire la distinction entre des états de l'environnement qui lui semblent identiques selon la perception qu'il en a, mais qui sont néanmoins différents. Soit $S = \{s_1, s_2, \dots\}$ l'ensemble des états internes de l'agent. Dans ce cas, les fonctions de l'agent se modifient de la manière suivante :

prévisible *a priori*.

- **action** : $S \rightarrow A$ est maintenant définie sur l'ensemble des états internes de l'agent, ce qui revient à dire que l'agent décide de l'action à effectuer en fonction de son état interne ;
- **suiv** : $S \times P \rightarrow S$ est une nouvelle fonction qui modélise le changement de l'état interne de l'agent en fonction de ses perceptions et de l'état interne courant ;
- **inter** : $S \times P \rightarrow I$ et **rinter** : $S \times I \rightarrow A$ sont modifiées pour montrer que la décision sur les interactions avec d'autres agents dépend aussi de l'état interne ;
- **voir** : $E \rightarrow P$ et **env** : $E \times A \rightarrow P(E)$ ne sont pas modifiées.

Les agents avec buts

Connaître l'état de l'environnement et la séquence des perceptions mémorisées dans l'état interne n'est pas toujours suffisant pour décider quelle est la meilleure action à effectuer à un moment donné. Pour fonctionner d'une manière efficace, l'agent doit essayer d'obtenir le maximum de performance et il doit donc choisir ses actions en conséquence.

Il existe plusieurs façons de définir la mesure de performance. Une première solution est d'indiquer à l'agent ce qu'il doit faire en toute circonstance pour avoir du succès. C'est le cas des agents réactifs, où le concepteur définit les règles condition-action dans chaque cas de perception sur l'environnement. Toutefois, puisque les agents intelligents sont autonomes et proactifs, il serait intéressant de dire à l'agent que ce qu'il faut faire, sans avoir à lui dire exactement comment le faire dans chacune des situations. Dans ce cas, il est possible de définir la mesure de performance de l'agent en fixant des **états-buts** ou états désirables :

but : $E \rightarrow \{0, 1\}$ est une fonction qui a la valeur 1 pour les états-but et 0 pour les autres.

Si les états-buts sont connus d'avance, on peut définir l'ensemble **B** des buts de l'agent, $B \subseteq E$. Par exemple, un robot qui ramasse des objets sur une surface pour les transporter à la base sait que l'état-but est l'état "parvenir à la base avec le maximum d'objets". Si les états-buts ne sont pas connus mais que l'on connaît uniquement certaines propriétés désirables de ces états, alors la fonction **but** fait l'évaluation de chaque état pour voir si l'état possède ou non ces propriétés.

Par exemple, si le robot ne connaît pas d'avance la position de la base mais qu'il peut la percevoir une fois arrivé près d'elle, le robot doit tester dans chaque position s'il est près de la base ou pas.

Une troisième solution pour définir la mesure de performance de l'agent est décrite dans ce qui suit.

Agents avec utilité

La mesure de performance d'un agent peut être définie d'une manière plus fine en associant à chaque état de l'ensemble E une valeur réelle, l'utilité, qui mesure la désirabilité de cet état pour l'agent. On peut voir les états-buts comme un cas particulier des états avec utilité, puisque cela correspond au cas où l'utilité ne peut prendre que les valeurs 1 et 0. Pour associer une utilité aux états, on introduit une nouvelle fonction :

Utilité : $E \rightarrow R$, où R est l'ensemble des nombres réels.

La fonction **utilité** est mieux adaptée que la fonction **but** dans deux situations. Premièrement, si l'agent a des buts contradictoires, par exemple l'agent Pierre veut aller au cinéma et étudier pour son prochain examen, la fonction **utilité** indique le but à choisir. Deuxièmement, si l'agent agit dans un environnement non déterministe, il n'est pas toujours certain de pouvoir atteindre ses buts. Dans ce cas, l'utilité des buts offre un moyen de rapporter la probabilité de succès à l'importance des buts. En général, dans un environnement non déterministe, l'agent va souvent avoir besoin de la fonction **utilité** pour prendre des décisions sur les diverses actions à effectuer tout en sachant que les résultats de ces actions ne sont pas certains.

Dans un environnement non déterministe, $env : E \times A \rightarrow P(E)$, le résultat de l'action a , notamment l'état suivant est un élément du sous-ensemble $env(e,a)$ qui contient les états suivants possibles après l'exécution de l'action a dans l'état e de l'environnement. L'utilité d'un état peut être combinée avec le résultat probable d'une action pour déterminer l'utilité attendue d'une action. Avant l'exécution d'une action a , l'agent associe une probabilité à chaque résultat possible de cette action, et nous noterons $prob(ex(a,e) = e')$ la probabilité estimée par l'agent que le résultat de l'exécution de l'action a dans l'état e sera l'état e' . On a bien évidemment :

$$\sum_{e' \in env(e,a)} prob(ex(a,e) = e') = 1$$

L'**utilité attendue d'une action** dans l'état e du point de vue de l'agent est alors calculée avec la formule :

$UA(a,e) =$

$$\sum_{e' \in env(e,a)} prob(ex(a,e) = e') * utilité(e')$$

2.2 Les agents réactifs

Ces agents dits réactifs ont hérité de la vie artificielle. Ils ont un cycle de type *Perception / Action* [Wooldridge, 1999]. Un agent de type réactif est constitué d'un ensemble de comportements permettant d'accomplir une tâche donnée. Chaque comportement est une machine à états finis qui établit une relation entre une entrée sensorielle et une action en sortie. L'ensemble des comportements est représenté sous la forme d'une hiérarchie dans laquelle les couches de niveaux inférieurs représentent des comportements moins abstraits, et les couches de niveaux supérieurs des comportements plus abstraits [Chaib-Draa *et al.*, 2001].

Cette approche repose sur le concept d'émergence. Elle avance par ailleurs, l'idée qu'il n'est pas nécessaire que chaque agent soit personnellement « intelligent » pour parvenir à un comportement intelligent de l'ensemble [Wooldridge, 1999].

Un exemple d'agents réactifs est celui du système MANTA (Modeling an ANThill Activity) de Drogoul [Drogoul, 1993] pour simuler une communauté de fourmis. « *Dans ce système, l'architecture d'un agent comporte les opérateurs de perception, de sélection et d'activation qui manipulent un ensemble de tâches.* » [Boissier, 2001].

Ce système a mis en évidence que l'organisation du travail dans une colonie de fourmis peut résulter d'un ensemble d'interactions et de contrôles locaux, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une quelconque entité centrale de régulation. Les performances adaptatives de la société se présentent comme issue de la confrontation des comportements élémentaires de chacun de ses membres [Ferber, 1995].

Les hypothèses principales pour le développement d'agents réactifs sont :

- La manipulation syntaxique prévaut à la représentation symbolique pour modéliser la prise de décision,
- Les idées d'intelligence et de comportement rationnel sont liés à l'environnement de l'agent et non aux agents eux-mêmes,
- Les agents n'ont pas de représentation de leur environnement et des autres agents et se faisant, ils sont incapables de prévoir et d'anticiper les actions à accomplir.
- Individuellement, ils sont très faibles, mais leur force vient de leur capacité à constituer des colonies capables de s'adapter à leur environnement. Ils peuvent faire face à des tâches

complexes et peuvent rivaliser en terme de performance avec des agents plus sophistiqués [Ferber, 1995].

Cette conception fait toutefois l'objet de critiques que Chaib-Draa *et al.* [Chaib-Draa *et al.*, 2001] formulent ainsi:

- Si les agents ne possèdent pas de modèle de leur environnement, ils doivent posséder suffisamment d'informations locales leur permettant de choisir une action acceptable ;
- Les agents basent leurs décisions sur des informations locales, il est donc difficile de savoir comment ils peuvent tenir compte d'informations non locales ;
- Les agents réactifs offrent peu de mécanismes d'explications et ils ont des difficultés avec les tâches qui nécessitent une connaissance du monde qui ne peut être obtenue que par la mémoire ou le raisonnement et non par la perception.

2.3 Les agents cognitifs ou délibératifs

D'une manière générale, ce type d'agents appelés cognitifs ou délibératifs selon les communautés suit un cycle Perception /*Délibération*/Action comme le montre la Figure 11. On dit aussi que ces agents sont intentionnels car ils possèdent des buts et des plans explicites leurs permettant d'accomplir leurs buts. Pomerol [Pomerol, 1997] définit *un but comme le résultat de ce qu'un décideur souhaiterait obtenir*. La résultat de la planification est défini alors comme suit ; *étant donné un but et un état courant, il s'agit de trouver une séquence d'actions qui permettent d'aller de l'état courant au but. Cette séquence d'actions est appelée plan*.

Du fait de la vision partielle de ces agents sur le monde, il est nécessaire de concevoir des liens entre la « réalité » du monde et les bases de connaissances de chacun. Ainsi, l'agent cognitif peut mettre à jour ses connaissances, en fonction, d'une part de l'interaction avec les autres agents et d'autre part à l'environnement. Ceci suppose des communications inter-agents. Il est donc nécessaire de développer des théories dans le domaine de la communication mais aussi des protocoles de coopération entre les agents.

Contrairement aux agents réactifs, ce type d'agents a la capacité de raisonner sur des représentations du monde, de mémoriser des situations, de les analyser, de prévoir des réactions possibles à toute action, d'en tirer des conduites pour les événements futurs et donc de planifier son propre comportement [Ferber, 1995].

Une approche emblématique est celle initiée dans les années 80 [Bratman *et al.*, 1988] qui propose une architecture basée sur trois attitudes : *Belief*, *Desire*, *Intention* (BDI). Elle fait depuis l'objet de nombreux travaux [Kumar et Shapiro, 1994] [Rao et Georgeff, 1995] [Busetta et Ramamohanarao, 1998] [d'Inverno *et al.*, 1998]. Le concept *Belief* correspond à la représentation de l'état interne de l'agent. Il est actualisé à chaque instant en fonction de l'état de l'environnement. *Desire*, correspond aux objectifs fixés par l'état interne de l'agent. *Intention*, correspond aux buts en cours d'achèvement.

Le concept d'agent BDI a été conçu avec le souci de conjuguer temps réel et temps du raisonnement. Il met en particulier en avant la notion d'engagement [Bratman *et al.*, 1988] qui garantit une certaine stabilité à la poursuite d'un but. Sa remise en cause est en effet envisagée sous certaines conditions.

Cette architecture qui a fortement orienté notre approche fera l'objet d'une présentation plus détaillée dans un paragraphe ultérieur.

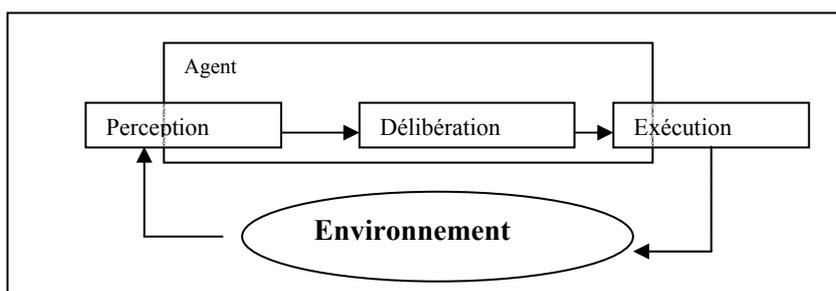


Figure 11 : Cycle Perception / Délibération/ Action d'un agent cognitif [Wooldridge, 1999]

2.4 Les agents hybrides

Certains auteurs [Chaib-Draa, 1996] [Chaib-Draa *et al.*, 2001] [Fischer *et al.*, 1995] [Georgeff *et al.*, 1999] ont été amenés à proposer des architectures d'agents hybrides pour améliorer en particulier les temps de la décision et temps de l'action. L'agent hybride est alors conçu comme alliant comportement réactif et comportement cognitif.

Dans ce type d'architecture, les agents sont conçus comme étant composés de niveaux hiérarchiques qui interagissent entre eux. Chaque niveau gère un aspect du comportement de l'agent [O'Hare et Jennings, 1994] :

- Au plus bas niveau de l'architecture, on retrouve habituellement une couche purement réactive qui prend ses décisions en se basant sur des données brutes en provenance de l'environnement.
- La couche intermédiaire fait abstraction des données brutes et travaille plutôt avec une vision qui se situe au niveau des connaissances de l'environnement.
- La couche supérieure se charge des aspects sociaux de l'environnement, c'est-à-dire du raisonnement tenant compte des autres agents [Chaib-Draa, 1996] [Chaib-Draa *et al.*, 2001].

L'architecture InteRRaP (*INTEgration of Reactive Behavior And Rational Planning*) [Fischer *et al.*, 1995a] qui s'inspire des concepts BDI est un exemple de ce type d'agent. Elle a été utilisée dans des applications telles que le transport routier [Fischer *et al.*, 1995a,b] et la robotique [d'Inverno *et al.*, 1998].

Un agent InteRRaP est constitué (Figure 12) (i) d'une base de connaissances, (ii) d'une interface avec le monde extérieur qui lui permet de percevoir et d'agir, (iii) d'une unité de contrôle hiérarchique organisée en trois couches interagissant les unes avec les autres. Ces trois niveaux correspondent à trois niveaux d'abstraction de la base de connaissances de l'agent : le modèle du monde, le modèle mental et le modèle social.

Chaque couche possède des fonctions qui permettent de gérer la reconnaissance d'une situation, activer un but, planifier et ordonnancer [Boissier, 2001] :

- La couche C (comportementale) réagit à l'évolution de l'environnement (condition-action). La reconnaissance des situations et l'activation des buts correspondent aux croyances sur l'état de l'environnement.
- La couche PL (planification locale) sélectionne des plans pouvant faire appel à des sous-plans ou capacité de la couche C. La reconnaissance des situations et l'activation des buts correspondent ici aux croyances que l'agent a sur lui-même
- La couche PC (planification coopérative) élargit les capacités de développement de planification à un univers multi-agent qui manipule des plans communs aux autres agents. A ce niveau l'agent utilise des protocoles et de stratégies d'interaction. La reconnaissance des situations et l'activation des buts correspondent aux croyances que l'agent possède sur les autres agents du système.

Cette architecture utilise des plans hiérarchiques dans une librairie de plans. Les plans sont formés à partir d'opérations primitives (procédures), de joncteurs (composition séquentielle), de

structures de contrôle (si-alors-sinon, tant-que-faire). La notion de plan est rendue opérationnelle en y rajoutant des informations temporelles pour former des plans ordonnés. Lorsque la couche de planification locale ne peut pas résoudre la situation, elle délègue à la couche de planification coopérative. Cette dernière couche permet aux agents de coordonner leurs actions en négociant et en exécutant des plans joints. Le contrôle de cette couche est activé par des requêtes de la couche de planification locale lorsqu'un conflit apparaît qui ne peut être résolu localement ou lorsqu'une tâche est explicitement coopérative.

L'architecture InteRRap présente différents avantages :

- La base de connaissances de l'agent est gérée selon trois niveaux hiérarchiques ce qui permet à l'agent d'avoir différents comportements,
- le même agent peut être utilisé dans des domaines d'applications différents,
- ce système exploite le parallélisme, ce qui permet par exemple à un agent de mener simultanément un plan local et un processus coopératif à un niveau social.

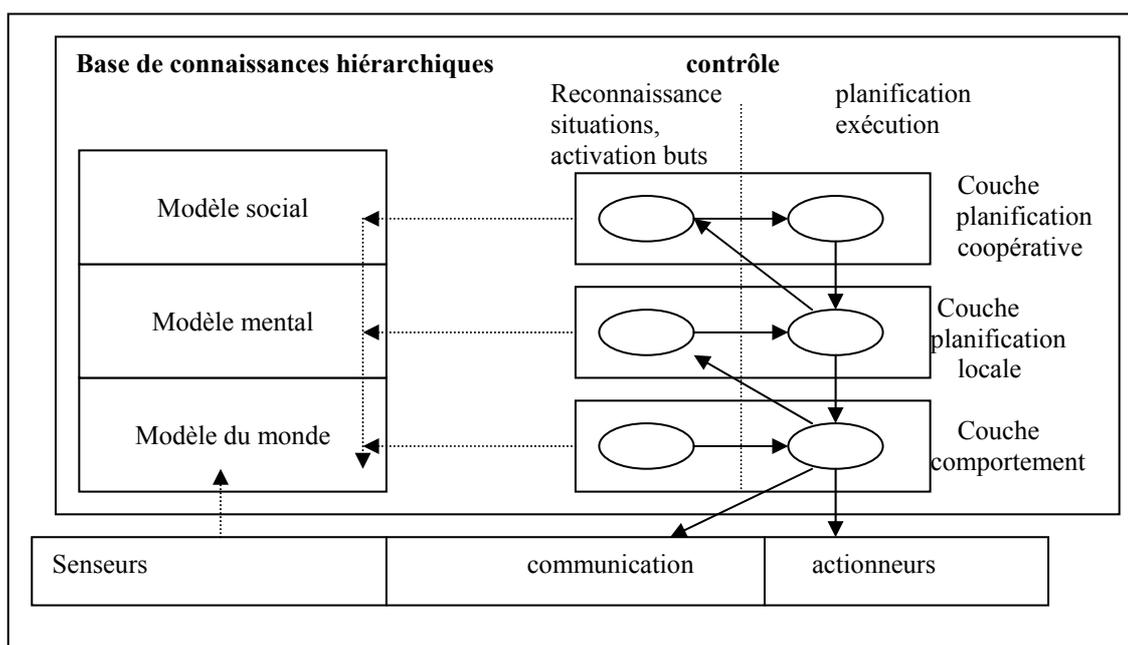


Figure 12 : Architecture InteRRap [Fischer *et al.*, 1995a]

2.5 En quête d'une méthodologie de conception multi-agent

Le paradigme multi-agent connaît ces dernières années une nouvelle étape dans son évolution. Des travaux récents montrent le besoin de normaliser le processus d'analyse et de modélisation

multi-agent. Pour preuve, de nombreux travaux proposent de faire le point sur l'activité du domaine [Balbo, 2001], un état de l'art peut être trouvé dans [Mandiau *et al.*, 2002] [Quenum, 2002]. Une première approche consiste à définir un état de l'existant en proposant des critères permettant soit une typologie [Huget *et al.*, 1998] [Ferber, 1995] [Wooldridge *et al.*, 2000] [Padgham et Winikoff, 2002], soit une comparaison des plateformes existantes [Asa, 1999]. Une seconde approche consiste à définir une méthodologie dans la conception d'un système multi-agent [Collinot *et al.*, 1996][Demazeau, 1995]. C'est cette dernière approche que nous retenons afin d'orienter la conception de notre modèle multi-agent.

- **Cassiopée**

Dans Collinot [Collinot *et al.*, 1996], les auteurs présentent la méthode *Cassiopée* comme « *une façon d'appréhender un type de résolution de problèmes qui suppose la mise en œuvre de comportements collectifs par un ensemble d'agents logiciels* ». Afin d'aider le concepteur, cette méthode propose une analyse de l'approche d'un problème par le paradigme multi-agent. Les auteurs modélisent ce cadre méthodologique suivant trois étapes :

- *Définition des Agents* : le concepteur répartit les connaissances et les compétences nécessaires aux systèmes entre les agents.
- *Définition des Interactions* : le concepteur définit le mode de communication entre les agents, la nature de leurs échanges.
- *Définition de l'Organisation* : le concepteur définit les liens entre les agents qu'il a conçus, comment travailleront-ils en commun afin d'atteindre l'objectif global que le système dans son ensemble doit atteindre.

- **GAIA**

Gaia est une méthodologie permettant la modélisation de l'agent et de son système [Wooldridge *et al.*, 2000]. Elle suppose que les actions des agents concourent toutes à un but global. Les relations entre les agents d'un système construit à l'aide de Gaia sont statiques (elles ne varient pas au cours de la vie du système). Comme la plupart des méthodologies de modélisation, Gaia découpe la construction du système en trois phases : spécification des besoins, analyse et conception. Elle ne prend en compte que les deux dernières phases.

Cette méthodologie peut être : (i) abstraite (qui n'a aucune représentation directe dans le système final). Les entités abstraites sont le modèle de rôles et le modèle d'interactions. (ii) Concrète (qui se retrouve dans le système construit). Les entités concrètes quant à elles sont le modèle d'agents, le modèle de services et le modèle d'accointances.

- **PROMETHEUS**

Prometheus [Padgham et Winikoff, 2002] est une méthodologie complète de spécification, conception et implémentation de systèmes d'agent intelligents. Elle est adaptée à la conception des systèmes clos contenant des agents contrôlés et fiables, par contre, ne l'est pas pour la conception de systèmes ouverts.

A la spécification des besoins, les actions, perceptions et fonctionnalités du système sont définies. (i) les actions et les perceptions définissent l'interface entre les agents et leur environnement. (ii) les fonctionnalités décrivent en un sens plus large ce que devrait faire le système. (iii) Des scénarii de cas d'utilisation sont créés pour fournir une vue plus globale de l'interconnexion entre actions, perceptions, et fonctionnalités.

La phase de conception se décompose en deux sous phases :

- La première appelée conception architecturale consiste à définir les agents du système et leur fonctionnalités. Au cours de cette sous-phase, on définit également les événements auxquels les agents réagissent, les messages qu'ils peuvent recevoir ou émettre. Les protocoles d'interaction sont donc spécifiés sur la base des diagrammes d'interaction. Enfin, les données partagées sont identifiées à cette étape.
- La deuxième sous-phase est la conception détaillée. Elle se préoccupe de la structure interne des agents et de la façon dont ils exécutent leur tâche.

- **VOYELLES**

La méthodologie voyelles (AEIO) [Demazeau, 1995] (Figure 13) se décompose en quatre parties :

La facette A permet de représenter l'ensemble des fonctionnalités du raisonnement interne (planification par exemple) de l'agent.

La facette E permet de définir l'ensemble des capacités de perception et d'action d'un agent sur son environnement.

La facette I permet de définir l'ensemble des interactions avec les autres agents (protocoles de communication par exemple).

La facette O est liée aux capacités de structuration et de gestion des relations des agents entre eux.

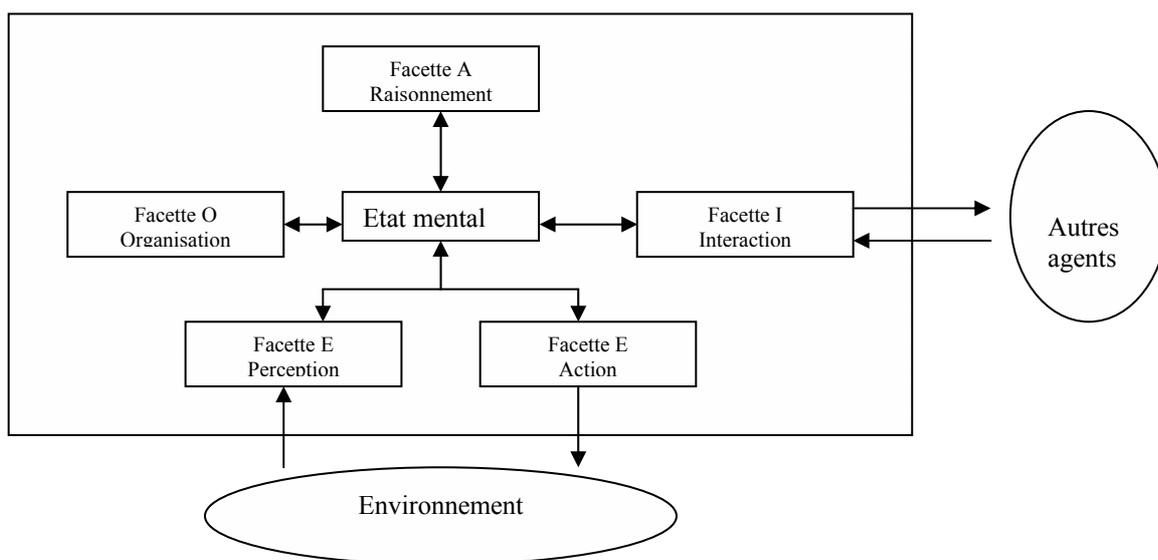


Figure 13 : Facette AEIO au sein d'un agent [Boissier, 2001]

2.6 Les agents BDI

Ainsi que nous l'avons annoncé précédemment, les approches basées sur le concept BDI nous intéressent tout particulièrement. Nous lui avons donc réservé une place privilégiée.

2.6.1 Structure générale

Nous commencerons par donner un exemple pour clarifier les concepts développés par la suite : l'agent Pierre a la croyance que, si quelqu'un passe son temps à étudier, cette personne peut faire une thèse de doctorat. De plus, Pierre a le désir de voyager beaucoup, de faire une thèse de doctorat et d'obtenir un poste d'assistant à l'université. Le désir de voyager beaucoup n'est pas consistant avec les deux autres et Pierre, après réflexion, décide de choisir, parmi ces désirs inconsistants, les deux derniers. Comme il se rend compte qu'il ne peut pas réaliser ses deux désirs à la fois, il décide de faire d'abord une thèse de doctorat. En ce moment Pierre a l'intention de faire une thèse et, normalement, il va utiliser tous ses moyens pour y parvenir. Il serait irrationnel de la part de Pierre, une fois sa décision prise, d'utiliser son temps et son énergie, notamment ses moyens, pour voyager autour du monde. En fixant ces intentions, Pierre a moins de choix à considérer car il a renoncé à faire le tour des agences de voyage pour trouver l'offre de voyage qui le satisferait au mieux.

C'est cette idée même qui est au cœur de la théorie BDI de l'action rationnelle, proposée pour la première fois par Bratman ([Bratman *et al.*, 1988]). C'est une théorie du raisonnement pratique

qui essaie de surprendre comment les gens raisonnent dans la vie de tous les jours, en décidant, à chaque moment, ce qu'ils ont à faire. En développant sa théorie, Bratman ([Bratman *et al.*, 1988]) montre que les intentions jouent un rôle fondamental dans le raisonnement pratique, car elles limitent les choix possibles qu'un humain (ou un agent artificiel) peut faire à un certain moment.

Cette approche est fondée sur une bonne connaissance et un grand respect de la théorie d'action rationnel chez l'humain en rapport avec des processus de raisonnement. Cette approche met en avant trois points qui nous paraissent justifiés dans le cadre de notre problématique : (i) un concept de planification au sens Intelligence Artificielle du terme, c'est à dire le processus de formulation d'un programme d'actions pour atteindre certains buts visés [Pollack, 1992], (ii) la prise en compte d'une vision partielle et imparfaite de l'agent sur son environnement, (iii) une modélisation applicable à des agents évoluant dans un environnement changeant. Actuellement ainsi que le souligne Pollack [Pollack, 1992] peu de travaux font le lien entre la théorie, les systèmes et les applications.

Rao et Georgeff [Rao et Georgeff, 1995] ont contribué au développement du modèle BDI en proposant une structure logique s'appuyant sur les trois modalités primitives : les croyances, les désirs et les intentions. Leur formalisme est fondé sur un modèle relié au temps au cours duquel croyance, désir et intention sont interconnectés. Ils ont cherché à ajouter des plans sociaux à leur formalisme et ont développé une application réelle de la théorie.

Les applications les plus fréquentes sont essentiellement des développements liés à la robotique (dMARS [d'Inverno *et al.*, 1998]), à la circulation de flux physiques (gestion d'aéroport par exemple). A notre connaissance, il existe peu d'applications mettant en œuvre une population d'agents hétérogènes et de grande taille.

Un agent BDI est défini par Rao et Georgeff [Rao et Georgeff, 1995] par un ensemble $\langle E, B, P, I, A, SE, S_0, S_1 \rangle$ où :

E, est l'ensemble des évènements,

B, un ensemble de croyances,

P, un ensemble de plans,

I, un ensemble d'intentions,

A, un ensemble d'actions,

S_E , une fonction qui sélectionne un évènement dans l'ensemble des évènements E,

S_o , une fonction qui sélectionne une option ou un plan applicable dans la bibliothèque des plans applicables P ,

S_i , une fonction qui sélectionne une intention dans l'ensemble des intentions I .

La figure suivante (Figure 14) présente les composantes principales d'une architecture BDI.

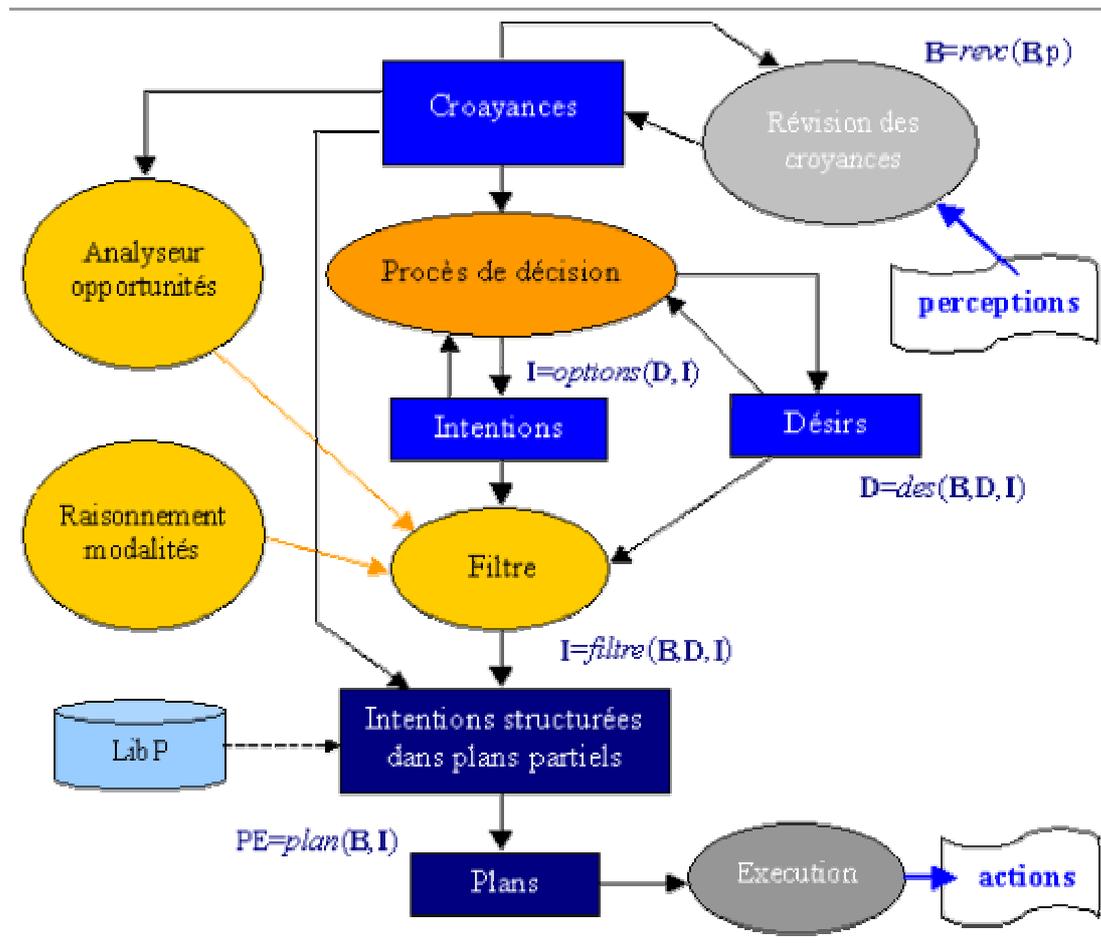


Figure 14 Architecture BDI d'un agent

L'agent a une représentation explicite de ses croyances, désirs et intentions. On dénote par B l'ensemble des croyances de l'agent, par D l'ensemble de ses désirs, et par I l'ensemble de ses intentions, et par \mathbf{B} , \mathbf{D} et \mathbf{I} les croyances, désirs et intentions courantes de l'agent. Les ensembles B , D et I peuvent être représentés au moyen de divers modèles de représentation de connaissances, par exemple en utilisant la logique des prédicats du premier ordre, une logique d'ordre supérieur, le modèle des règles de production, ou bien comme de simples structures de données.

Les croyances (**B**) correspondent à une base de connaissances propre à chaque agent portant sur l'environnement et sur son propre état.

La bibliothèque de plans d'action regroupe des plans qui répondent à des objectifs déterminés. Ces plans peuvent être partiels et pourront, en cours de simulation, être complétés par d'autres plans. Ils sont définis par :

- Leur nom,
- La documentation qui permet de les décrire,
- L'objectif qu'ils permettent d'atteindre,
- Le contexte (ensemble de croyances) qui les rendent activables,
- Le déclencheur (c'est à dire les croyances complémentaires) qui déclenchent leur exécution,
- Leurs règles d'exécution. Ces règles peuvent faire appel à la satisfaction d'un sous-but dont la réponse sera à rechercher dans la bibliothèque.

Leurs objectifs (**D**) correspondent à la représentation de l'état attendu du système de façon fonctionnelle. Ils sont destinés à évoluer en cours de simulation. Ils peuvent être multiples, se décliner en sous-objectifs et entrer en conflits.

Les intentions (**I**) forment le sous-ensemble de plans en attente d'exécution. Ils correspondent aux engagements de l'agent et répondent aux objectifs courants. Ces derniers sont poursuivis jusqu'à ce qu'ils soient atteints. Ils sont abandonnés prématurément si l'agent les juge hors d'atteinte ou incompatibles avec un objectif supérieur.

Les concepts de plans sont centraux dans l'architecture BDI, ils ont alimenté de nombreuses recherches selon trois points de vue différents [Winikoff *et al.*, 2001] : (i) un point de vue philosophique dont Bratman et Pollack sont les principaux auteurs ([Bratman *et al.*, 1988][Pollack, 1992] [Pollack et Horty, 1999]), (ii) un point de vue théorique (Rao et Georgeff [Rao et Georgeff, 1995][Georgeff *et al.*, 1999]) (iii) un point de vue implémentation ([d'Inverno *et al.*, 1998]).

Ce type d'approche implique de définir de façon exhaustive l'ensemble des buts et sous-buts susceptibles d'être activés et les moyens de parvenir à leur satisfaction (les plans). Plusieurs plans peuvent conduire à la réalisation d'un même objectif, ce qui peut entraîner des conflits [Boussetta *et al.*, 1998]. Un module de délibération permet de choisir le plan à réaliser.

Par la suite, nous considérerons les fonctions suivantes :

- **revc** : $B \times P \rightarrow B$ est la fonction de révision des croyances de l'agent lorsqu'il reçoit de nouvelles perceptions sur l'environnement, où **P** représente l'ensemble des perceptions de l'agent ; elle est réalisée par la composante **Révision des croyances** ;
- **options** : $D \times I \rightarrow I$ est la fonction qui représente le processus de décision de l'agent prenant en compte ses désirs et ses intentions courantes ; cette fonction est réalisée par la composante **Processus de décision** ;
- **des** : $B \times D \times I \rightarrow D$ est la fonction qui peut changer les désirs d'un agent si ses croyances ou intentions changent, pour maintenir la consistance des désirs de l'agent (on suppose dans notre modèle que l'agent a toujours des désirs consistants) ; cette fonction est également réalisée par la composante **Processus de décision** ;
- **filtre** : $B \times D \times I \rightarrow I$ est la fonction la plus importante car elle décide des intentions à poursuivre ; elle est réalisée par la composante **Filtre**.

La composante **Filtre** est la partie de l'architecture qui a la responsabilité de bâtir des plans partiels pour réaliser les intentions de l'agent, tout en tenant compte des nouvelles opportunités. En conséquence de ce qu'il perçoit de son environnement et de sa révision des croyances, l'agent peut détecter des nouvelles opportunités qui favorisent la réalisation de ses intentions ou qui peuvent même empêcher cette réalisation. Cette analyse est effectuée par la composante **Analyseur opportunités**. Ces nouvelles opportunités sont communiquées au **Filtre**. Le **Filtre** construit des plans partiels pour aboutir aux intentions de l'agent avec l'aide de la composante **Raisonnement modalités** ; cette dernière a la responsabilité d'effectuer le raisonnement orienté action et la modalité de réalisation des plans.

- **plan** : $B \times I \rightarrow PE$ est la fonction qui transforme les plans partiels en plans exécutables, **PE** étant l'ensemble de ces plans ; elle peut utiliser, par exemple, une bibliothèque de plans, représentée par le module **LibP** dans la figure 15.

2.6.2 Un exemple d'implémentation : l'architecture PRS

L'implémentation la plus connue est PRS (*Procedure Reasoning System*) [Georgeff *et al.*, 1999] [d'Inverno *et al.*, 1998]. Cette architecture (Figure 15) a été utilisée dans des applications industrielles, dans la gestion du trafic aérien ou dans le contrôle de processus commerciaux. Les études sont le plus souvent restées à des stades de prototypes [Rao et Georgeff, 1995].

L'implémentation de l'architecture PRS la plus récente est dMARS [d'Inverno *et al.*, 1998]. Cette architecture est composée d'une bibliothèque de plans (aires de croyances), d'une base de

croyances représentant les états du monde (Base de données), d'une pile de buts (Buts), d'une structure d'intentions (Intentions) [Boissier, 2001] [Georgeff *et al.*, 1999].

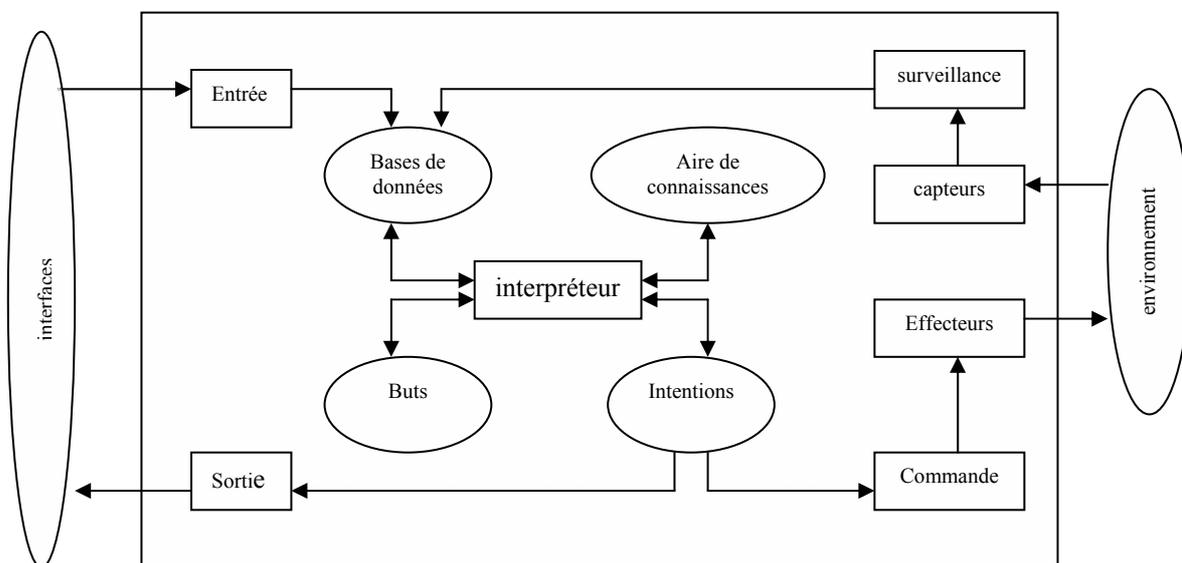


Figure 15: Architecture PRS [Georgeff *et al.*, 1999]

La Figure 15 présente l'architecture originale de PRS. Elle est généralement représentée de façon simplifiée (Figure 16).

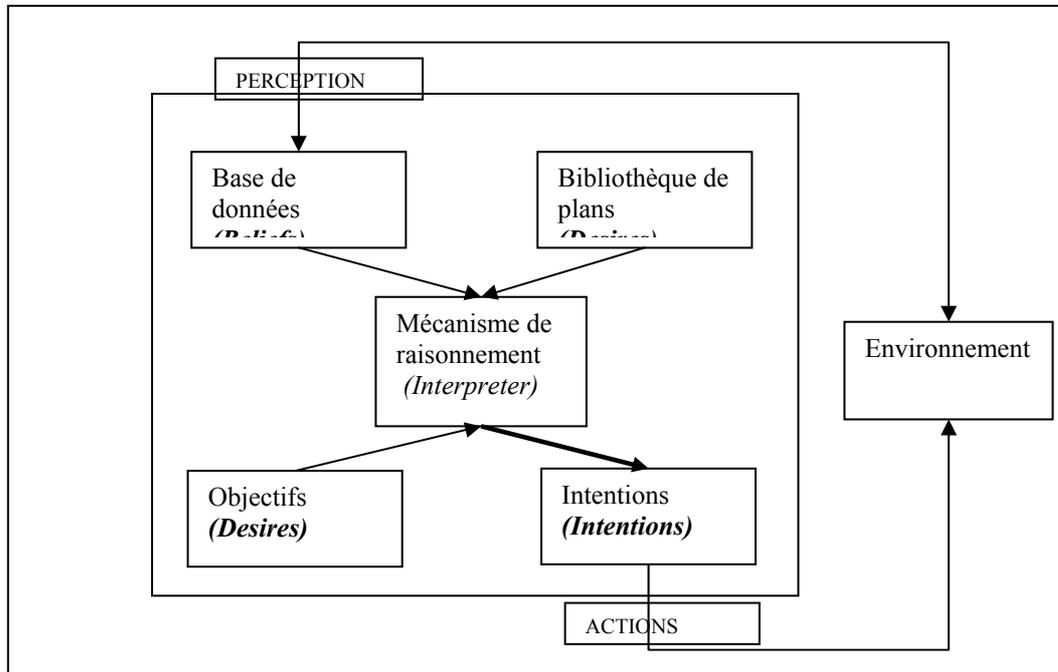


Figure 16 : Architecture BDI [Rao et Georgeff, 1995] [Bratman *et al.*, 1988] [d'Inverno *et al.*, 1998]

Les différents éléments représentés sont les suivants :

Une base de données (Beliefs)

Cette base de données contient les connaissances de l'agent qui sont mises à jour en permanence en fonction des changements de l'environnement et de l'état interne de l'agent. Rappelons que les autres agents sont partie intégrante de l'environnement. Ces changements peuvent être des informations factuelles ou une perception particulière. Cette base de données est représentée en logique des prédicats.

Des objectifs (Desires)

Au niveau de l'implémentation, les objectifs correspondent à un ensemble de buts à atteindre à long terme. Dans dMARS [d'Inverno *et al.*, 1998] le concept d'objectif est réduit à des événements (*events*) susceptibles de déclencher des plans. En effet, les buts y sont implicites.

Une bibliothèque de plans

Un agent peut se représenter un plan sous la forme d'une connaissance opératoire qui caractérise la séquence d'actions permettant de réaliser une tâche locale dans son domaine d'expertise. Il correspond à une construction mentale des comportements que l'agent devra suivre le moment venu pour mener à bien une tâche locale. Cela suppose que l'agent puisse se représenter mentalement le déroulement des activités permettant de réaliser une tâche locale [Chaib-Draa, 2002]. Cet ensemble de plans décrit comment accomplir une série d'actions, de tests, de demandes d'informations pour atteindre un objectif [Boussetta *et al.*, 1998].

Un mécanisme de raisonnement (interpret) :

Ce mécanisme de raisonnement est très important dans l'architecture BDI. Sa structure se décompose en différents éléments [Bratman *et al.*, 1988] [Pollack, 1992] [Pollack et Horty, 1999]

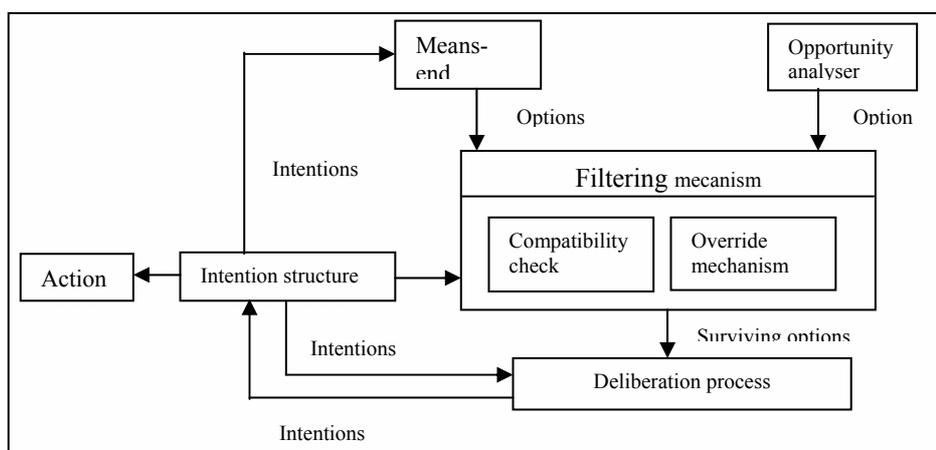


Figure 17: Structure générale du mécanisme de raisonnement. D'après [Pollack et Horty, 1999]

Le mécanisme de raisonnement suit le cycle suivant (Figure 17) :

- En fonction des modifications de l'environnement, *l'opportunity analyser* émet des options possibles.
- Dans le *means-end reasoner* on place le plan actuel, en cours d'exécution ou retenu pour exécution. A partir de ce plan initial et en fonction des informations sur le changement de l'environnement peuvent être générés d'autres plans possibles appelés options.
- Ces plans possibles ou options entrent dans le système de filtre au niveau du *compatibility check*.
 - Si cette nouvelle option est compatible avec le plan initial alors cette option passe directement dans le processus de délibération (*deliberation process*).
 - Sinon *l'override mechanism* résout le conflit en retenant le plan le plus favorable au système de préférence défini pour l'agent.

Les Intentions

Si le plan candidat est accepté, il passe alors dans la structure d'intention (*intention structure*). L'intention qui était en conflit avec celui-ci sort de la structure d'intention.

Le cycle d'exécution d'un agent se déroule en plusieurs étapes (Figure 18) :

1. Perception des changements de l'environnement par le senseur, interprétation pour les traduire en terme de croyances.
2. Mise à jour de la base de croyances en relation avec les informations fournies par le senseur.
3. Ces modifications sont traduites en actions réflexes ou en nouveaux objectifs à atteindre.
4. La liste d'objectifs est mise à jour et les objectifs à poursuivre sont sélectionnés.
5. S'il n'y a pas de plan sélectionné pour l'objectif en cours, si le plan a échoué, ou s'il y a reconsidération du plan actuel, alors, un autre plan est choisi.
6. Le nouveau plan choisi s'étend au champ d'actions à exécuter.
7. L(es) action(s) sont planifiées et exécutées.

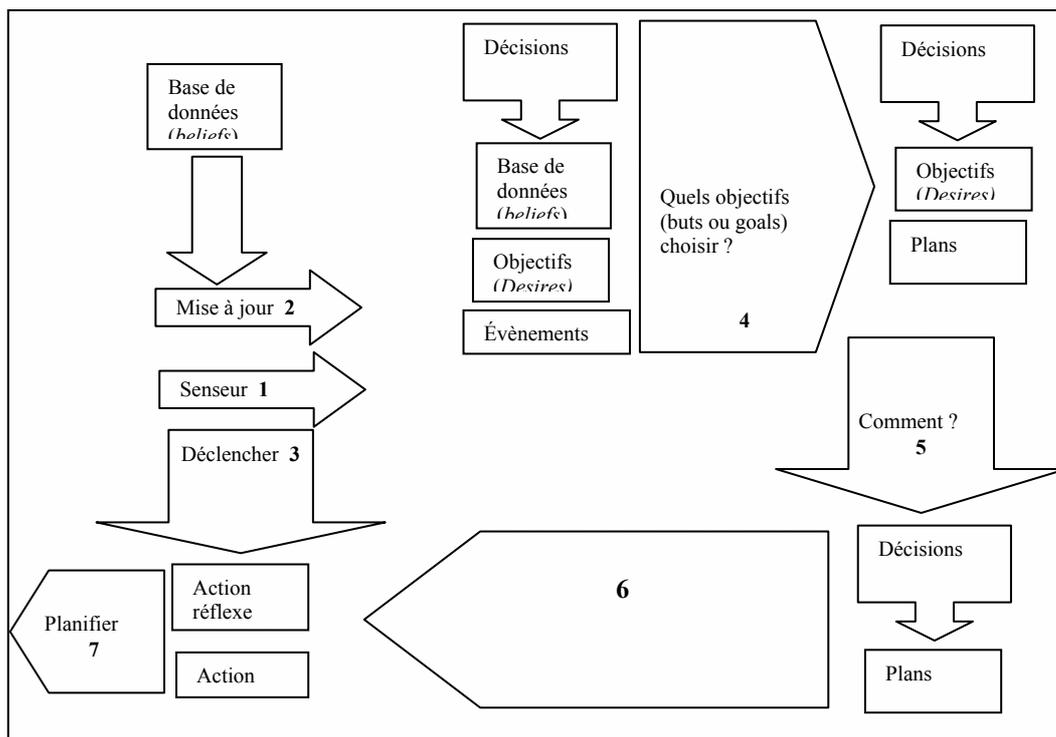


Figure 18 : Le cycle d'exécution d'un agent BDI [Winikoff *et al.*, 2001]

3 Les plateformes SMA

Comme nous l'avons indiqué, les SMA constituent un instrument conceptuel pour modéliser des domaines complexes [Müller, 1998] [Mandiau *et al.*, 2002] [Müller, 2002]. Cependant le processus de développement reste complexe [Wooldridge et Jennings, 1999] tant au niveau conception de la distribution et de la communication entre agents, qu'à celui des architectures et de l'implémentation [Boissier *et al.*, 1999].

De nombreuses propositions sont restées conceptuelles sans aboutir à des réalisations pratiques permettant de les valider. Certains modèles sont devenus des SMA opérationnels mais généralement les systèmes qui en résultent sont restés très dépendants de leurs applications d'origine [Wooldridge et Jennings, 1999]. Ce facteur limite beaucoup la diffusion des SMA.

Chaib-Draa et Gageut [Chaib-Draa et Gageut, 2002] suggèrent que des outils formels permettraient :

- L'analyse et le raisonnement des SMA,
- La description des SMA

- La spécification et la vérification des propriétés des SMA
- L'élaboration d'une base commune sur laquelle peuvent être construites des théories plus profondes sur l'action sociale, l'interaction et la coopération.

Ces mêmes auteurs [Chaib-Draa et Gageut, 2002] pensent que la logique présente des avantages certains :

- Une utilisation de la logique permet aux concepteurs de SMA de spécifier, de vérifier et de raisonner sur ces systèmes.
- Un langage défini qui identifie des classes d'objets syntaxiquement acceptables.
- Une sémantique bien définie qui attribue à chaque objet une signification formelle.
- Une théorie de la preuve et de la réfutabilité bien définie qui permet d'examiner de nouvelles inférences.

Les outils génériques relèvent de deux soucis principaux, d'une part la réalisation de classes de base traitant d'agents, d'interactions, d'organisations, ..., d'autre part des outils plus intégrés prenant en charge la coordination entre les différents éléments du système [Guessoum et Ocelllo, 2001]. Actuellement, on observe une prolifération de plates-formes (Tableau 2) cherchant à répondre à l'ensemble de ces problèmes. Ces plateformes sont conçues [Guessoum et Ocelllo, 2001]:

- Par rapport à un modèle d'agent particulier et orienté vers une communication entre systèmes distribués (par exemple : ZEUS, MadKit, JACK),
- Par rapport à un domaine d'application (CORMAS),
- Comme agents mobiles (exemple : AGLETS),
- Pour être orientées vers la construction de modèles de simulations (SWARM, CORMAS).

Actuellement, on peut regrouper ces environnements de développement en cinq catégories [Guessoum et Ocelllo, 2001] (Tableau 1) :

- 1 Les outils pour la simulation qui permettent de fournir un ensemble d'outils et de bibliothèques pour faciliter le développement de simulations multi-agents.
- 2 Les outils pour l'implémentation d'architectures d'agents.
- 3 Les outils pour la conception fondés sur un modèle componentiel.

- 4 Les outils pour la conception et l'implémentation offrant un ensemble d'utilitaires pour définir un groupe d'agents,
- 5 Les outils pour la conception, l'implémentation et la validation.

Catégorie	Environnements
Outils pour la simulation	Swarm, Cormas, geamas, Mice
Outils pour l'implémentation	Actalk, DECAF, JACK, MAGES IV, Magique, Mocah, OSAKA, Pandora II
Outils pour la conception	Alaadin, JAF, Maleva
Outils pour la conception et l'implémentation	AgentBuilder, DIMA, Mask, Mercure, MACE
Outils pour la conception, l'implémentation et la validation	Desire, dMars, MAST, Zeus

Tableau 1 : Les différents environnements de programmation. D'après[Guessoum et Ocello, 2001]

Certains critères d'analyses peuvent être à la base du choix d'une plateforme :

- **L'information fournie** : le degré de couverture qu'une plateforme produit à cette étape, principalement au niveau de la documentation et des outils disponibles.
- **L'application** : la plateforme est-elle utilisable par rapport à notre problématique ?
- **La complexité** : la compétence nécessaire pour le développeur et la qualité de travail que cette tâche impose.
- **La réutilisation** : la quantité de travail réutilisable pour de prochains travaux.
- **Le langage de programmation utilisé** : le plus souvent les langages de programmation diffèrent d'une plateforme à l'autre et cela pose le problème de compatibilité si l'on souhaite utiliser différentes plateformes.

On peut aussi envisager d'autres critères d'analyses de plateforme SMA tels que :

- La disponibilité : est ce une version stable ? Le code source est-il disponible ? Coût de l'outil ?
- Le support : il y a t il un futur développement de cette plate-forme ? Cette plate-forme est – elle largement utilisée ?

Produit	Compagnie	Langage	Description
AgentBuilder	Reticular Systems, Inc.	Java	Integrated Agent and Agency Development Environment
AgentTalk	NTT	LISP	Multi-agent Coordination Protocols
AgentX	International Knowledge Systems	Java	Agent Development Environment
Aglets	IBM Japan	Java	Mobile Agents
Concordia	Mistubishi	Java	Mobile Agents

DirectIA SDK	MASA Group	C++	Adaptive Agents
Gossip	Tryllian	Java	Mobile Agents
Grasshopper	IKV++	Java	Mobile Agents
iGEN	CHI Systems	C/C++	Cognitive Agent Toolkit
Intelligent Agent Factory	Bits & Pixels	Java	Agent Development Tool
Intelligent Agent Library	Bits & Pixels	Java	Agent Library
JACK Intelligent Agents	Agent Oriented Software Pty. Ltd.	JACK Agent Language	Agent development Environment
JAM	Intelligent Reasoning Systems	Java	Agent Architecture
Jumping Beans	Ad Astra Engineering, Inc	Java	Mobile Components
LiveAgent	Alcatel	Java	Internet Agent Construction
MadKit	Madkit Development Group	Java, Scheme, Jess	Multiagent Development tool
Microsoft Agent	Microsoft Corporation	Active X	Interface creatures
NetStepper	JW's Software Gems		Agent Development Environment
Network Query Language	NQL Solutions		Programming Language
Pathwalker	Futjitsu	Java	Agent-oriented programming library
Social Interaction Framework	DFKI (German research Institute for AI)	Java	Multi-agent System toolkit
Sodadot	MIT Artificial Intelligence Lab		Software Agent User-Environment and Construction System
SOMA (Secure and Open Mobile Agent)	Université de Bologne	Java	Agent Programming Environment
Swarm	Swarm development Group	Objective C, Java	MultiAgent Simulation
TeamBots	The Robotics Institute Carnegie Mellon University	Java	Multiagent Mobile Robotics
TuCSoN	Université de Bologne		Model for the coordination of internet agents
UMPRS	Intelligent Reasoning Systems	C++	Agent Architecture
Via : Versatile Intelligent Agents	Kitoscope	Java	Agent Builder Blocks
Voyager	Object Space	Java	Agent-Enhanced ORB
Zeus	British Telecommunications Labs	Java	Agent Building Environment

Tableau 2 : Liste de plates-formes disponibles et utilisables (www.multiagent.com)

On notera que ces plateformes présentent de grandes variabilités au niveau des langages d'implémentation, des formalismes de représentation des connaissances et des théories d'agents sous-jacentes. Elles sont de plus souvent très marquées par un type d'application visée.

4 Des plateformes caractéristiques

Le choix des plateformes que nous allons décrire a été guidé par leur rayonnement dans la communauté multi-agent et pour leur pertinence par rapport aux problèmes socio-économiques et agro-environnementaux : CORMAS, dans le domaine de la gestion des écosystèmes [Bousquet et Le Page, 2001], SWARM, souvent mobilisé en économie [Terna, 1998] et en gestion d'écosystème, JACK, comme implémentation de modèle BDI [Busetta et Ramamohanarao, 1998].

CORMAS

Si on considère l'agent comme une extension de l'objet, la plateforme CORMAS (*COmmon pool Ressources and Multi-Agents Systems*) est axée vers la construction de modèles de simulation mais plus particulièrement utilisée dans le domaine de la gestion de ressources renouvelables. Cette plateforme gratuite a été développée par le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et facilement téléchargeable à l'adresse : <http://cormas.cirad.fr/>

Cette plateforme de simulation est basée sur l'environnement de programmation VisualWorks ; qui permet de développer des applications en Smalltalk.

L'environnement de programmation Cormas permet le développement de modèles de simulation des modes de coordination entre des individus et des groupes qui exploitent des ressources en commun.

Ce système est structuré en trois modules :

- Un premier module qui permet de définir les différentes entités du système à modéliser, c'est ce qu'on appelle les agents informatiques et leurs interactions. Celles-ci s'expriment par des procédures de communication directes telles qu'envoi de messages ou contrôle de la dynamique globale.
- Un second module qui permet le contrôle de la dynamique globale. Le modélisateur doit définir la méthode qui lui permet de définir son pas de temps. Chaque entité peut avoir sa propre méthode d'évaluation du temps. Lors de la simulation, il est possible de définir le nombre de pas de temps voulu pour l'ensemble.
- Le troisième module qui permet de définir les différents points de vue.

Un des aspects attrayant de cette plateforme est la visualisation des processus dynamiques (propagation de feu de forêt par exemple) sur un support spatial correspondant à une grille, chaque cellule étant définie comme un automate cellulaire.

SWARM

Le simulateur Swarm (Figure 19) est un ensemble de bibliothèques portables que l'on peut utiliser dans des environnements variés. Ce simulateur est gratuit et facilement téléchargeable sur : <http://www.swarm.org>

Swarm est un ensemble de bibliothèques facilitant l'implémentation des modèles basés agents.

L'inspiration de Swarm provient du domaine de l'intelligence artificielle (IA). Deux stratégies caractérisent ces types d'approches :

- *Evaluation empirique des dynamiques*

La combinaison des entités autonomes dans un environnement distribué est typiquement un processus récursif qui ne peut être résolue de façon analytique. Or, dans de nombreux systèmes la seule façon de connaître quelle sera la dynamique globale d'un système est de le simuler sur un grand nombre de pas de temps et ceci un grand nombre de fois.

- *La deuxième idée est synthétique*

La vie artificielle semble extrapoler des connaissances biologiques au lieu de suggérer de nouvelles expériences. Swarm fournit des éléments permettant de faire des extrapolations pour réaliser la simulation.

Ainsi, Swarm est une machine virtuelle qui permet :

- De décrire des comportements d'agents, un par un, contexte par contexte, tout en gardant la notion de temps et de concurrence dans le modèle.
- De composer et de décomposer des hiérarchies d'agents.

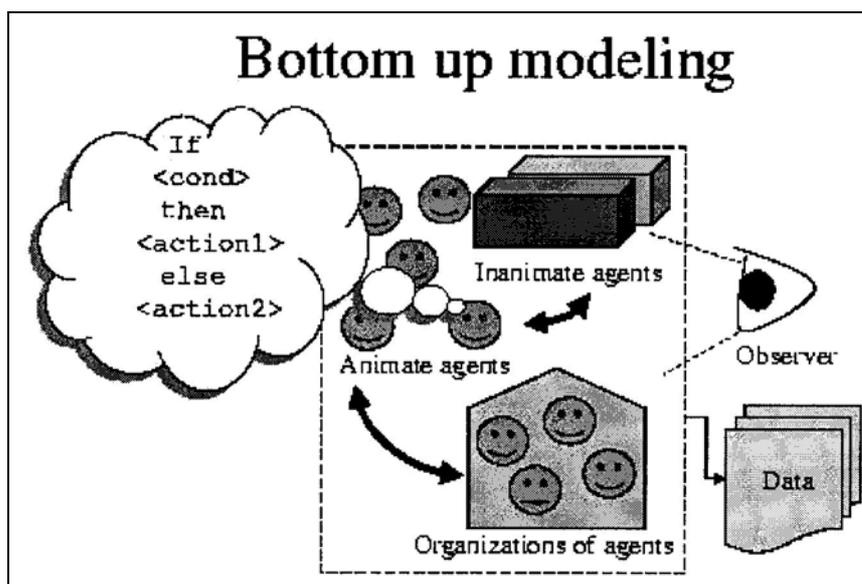


Figure 19: Structure générale de Swarm [SWARM, 2001]

L'environnement de développement est celui qu'utilise le modélisateur Swarm pour écrire son programme. Cela peut être de la simple ligne d'éditeur à un environnement programmable de type Emacs, ou un environnement de développement java comme JBuilder.

L'environnement Swarm contient des méthodes et objets pour la simulation. Pour l'essentiel tous les éléments accessibles en Objective C sont stockés dans cet environnement.

Une des caractéristiques principales de Swarm est l'absence d'une classe agent à la base de l'outil. Ceci permet à l'utilisateur de créer ses propres agents avec la sémantique qu'il souhaite. Dans Swarm, l'agent est vu comme une extension du processus. L'originalité de ce système provient de la notion d'activité associée à un swarm ou essaim qui permet un contrôle du déroulement des actions effectuées par les agents. Un swarm est le composant de base du système.

Dans une application de ce type, l'utilisateur spécifie le comportement d'un ensemble d'agents sous la forme d'un ensemble d'actions déclenchées selon un calendrier. Il est possible de créer plusieurs swarm liés entre eux par une hiérarchie.

JACK

JACK est une plateforme qui permet le développement de l'environnement des agents BDI. Cette plateforme est décrite comme étant un environnement pour construire, exécuter et intégrer des systèmes multi-agents commerciaux, écrits en Java et utilisant une approche orientée

composants. Cette plateforme payante a une utilisation limitée dans le temps. Une version d'évaluation est téléchargeable sur : <http://www.agent-software.com>

JACK inclut tous les éléments de développement dans un environnement Java et des extensions pour implémenter le comportement de l'agent. Les agents intelligents de JACK sont construits sur le modèle d'agent BDI. Cette plateforme s'intéresse principalement à l'étape de développement.

Les agents sont des éléments autonomes qui ont des objectifs explicites [Busetta et Ramamohanarao, 1998]. Chaque agent a :

- Un ensemble de données sur l'environnement,
- Un ensemble d'évènements auxquels il pourra répondre,
- Un ensemble d'objectifs (*goals*) qu'il peut souhaiter atteindre,
- Un ensemble de plans qui décrivent la façon d'atteindre ses différents objectifs.

Les outils logiciels sont le JDE (*Jack Development Environment*), un environnement de programmation classique, le compilateur du *Jack Agent Language* (JAL), qui traduit les programmes écrits en JAL en JAVA pur, et la librairie de classes permettant l'exécution des agents, appelée *Jack Agent Kernel*.

Le langage agent JACK est constitué de cinq grandes classes :

- **Agent.** L'agent construit est utilisé pour définir le comportement de l'agent logiciel. Cela introduit, le type de messages et les évènements qui correspondent, et les plans à utiliser pour accomplir ses objectifs.
- **Capacité.** Permet de définir les éléments réutilisables par l'agent. Ceci peut être des plans, des données....
- **Base de données.** Il s'agit d'une base de données relationnelles.
- **Evènements.** Décrivent une occurrence qu'un agent doit prendre en compte pour ses actions
- **Plan.** Les plans des agents sont analogues aux fonctions.

Conclusions sur ces plateformes :

Parmi les nombreuses plateformes multi-agents, certaines ont retenu notre attention, par leur fonctionnalité en terme de simulation (Swarm et Cormas sont les plus utilisées), ou par la bonne adéquation du modèle de représentation et des concepts sous jacents (Jack).

Cependant, l'importance de l'investissement nécessaire au repérage des plateformes les plus pertinentes compte tenu du problème posé, aggravée par des contraintes imposées par les modalités d'accès nous sont apparues comme un frein. Ces difficultés d'accès sont les suivantes :

- L'hétérogénéité de langage. Un des langages de programmation le plus employé est Java. Il présente l'avantage d'être portable sur différents systèmes, ceci par la richesse des bibliothèques où sont inclus des réseaux de communication. Par contre, la diversité des langages de programmation (Smalltalk, Java) rend difficile l'apprentissage approfondi et le couplage de plateformes.
- La bonne connaissance des hypothèses de modélisation sous-jacente,
- Ces plateformes sont téléchargeables. Cependant, le téléchargement de version d'évaluation comme Jack limite son utilisation future et restreint le développement complet d'une application.
- La qualité de la documentation,
- L'absence de problème de taille réaliste (versus *toy problem*) permettant de s'approprier rapidement les paradigmes véhiculés par la plateforme.

Ces outils de conception semblent parfois mal adaptés à des utilisateurs qui ne sont pas des experts informatiques mais des chercheurs d'autres domaines, intéressés par de tels outils. En conséquence, il arrive fréquemment qu'ils conçoivent des simulations *ex nihilo* découragés par le manque d'accessibilité des concepts proposés. Cela peut poser problème, non seulement parce qu'il n'y a pas alors de réutilisation des outils, mais parce qu'une implémentation peu rigoureuse peut introduire des biais dommageables, en particulier au niveau de la validation [Meurisse et Vanbergue, 2001].

Toutefois, certaines plateformes (Swarm et Cormas) bénéficient de l'expérience des autres. Ainsi, spécialement conçue pour l'étude des dynamiques à l'interface entre ressources naturelles et société, la plateforme Cormas, et tout le savoir qui entoure l'apprentissage de son utilisation, capitalise un grand nombre d'expériences dans le domaine. Ces expériences ont donné lieu à un nombre important de publications disponibles sur leurs sites et de formations.

Le souci d'épouser au maximum (i) le problème de la gestion de l'eau (ii) et la disponibilité de bibliothèques de programmes utilisés dans d'autres applications multi-agents, nous a conduit à considérer comme prioritaire une autonomie complète en terme de modélisation. Nous avons

toutefois intégré les concepts reconnus de la communauté multi-agent, sans avoir écarté par ailleurs le recours ultérieur à des plateformes éprouvées.

Chapitre 4

La Négociation dans les Systèmes Multi-Agents

Ma recherche est en outre axée sur la gestion de l'eau, ressource posant actuellement de façon accrue le problème de la **durabilité**. Pour cette ressource, des directives générales ont été édictées au niveau national et européen en 1992 et 2001. La mise en œuvre concrète de ces réglementations passe au niveau régional et au niveau local par la création de règles résultant de négociations entre les différents acteurs concernés. Toutefois, l'émergence de ces règles de gestion et d'allocation de la ressource se fait bien souvent sans vision des conséquences résultant de l'adoption de celles-ci tant au niveau global qu'au niveau individuel. C'est ainsi qu'on constate dans nombre de cas qu'elles sont principalement tributaires des rapports de force entre les partenaires.

La négociation est abordée par différentes disciplines : l'économie, les sciences des organisations, les sciences de l'aide à la décision, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)... Dans ce chapitre, nous nous attacherons tout particulièrement aux différentes méthodes rencontrées pour la résolution de conflits.

1 La négociation : définitions

Smith [Smith, 1988] définit la négociation :

« By Negotiation, we mean a discussion in which the interested parties exchange information and come to an agreement. For our purposes negotiation has three important components (a)

there is a two-way exchange of information, (b) each party to the negotiation evaluates the information from its own perspective, (c) final agreement is achieved by mutual selection»³

Dans cette définition, la négociation implique deux éléments essentiels, d'une part la communication (a) et d'autre part la prise de décision (b) (c).

La négociation est abordée par différentes disciplines : l'économie, les sciences des organisations, les sciences de l'aide à la décision, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)...

Dans le domaine des systèmes d'aide à la décision de groupe (Group Decision Support System ou GDSS), des systèmes informatiques d'aide à la négociation (Negotiation Decision Support System ou NDSS), dans lesquels intervient un médiateur, fournissent une aide aux acteurs humains pour négocier [Bui, 1994] [Bui et Shakun, 1995] [Chang et Han, 1995] [Espinasse *et al.*, 1997] [Hahn et Jarke, 1991] [Kersten, 1995] [Sebenius, 1992].

En IAD, le terme de négociation est employé aussi bien dans le cadre de résolution de conflits [Lander et Lesser, 1993] [Sycara, 1988] que dans celui de la coordination entre agents [Davis et Smith, 1980] [Sycara, 1992].

Dans les SMA, la négociation donne lieu à deux approches différentes [Osborne et Rubinstein, 1994] [Lepperhoff, 2002] :

1. La première est une approche analytique et normative fondée sur la théorie des jeux. Zlotkin et Rosenschein [Rosenschein et Zlotkin, 1993] ont été les premiers à appliquer les outils de la théorie des jeux dans le domaine des SMA. Ils proposent une architecture en couche permettant de modéliser différents niveaux d'interaction. Leurs protocoles permettent de spécifier des types de négociations que les agents peuvent réaliser, aussi bien que les séquences de propositions et de contre propositions qui sont permises. Dans leurs approches, on retrouve des considérations sur les stratégies de prise en compte globale du temps et des contacts multiples entre agents [Chaib-Draa et Gageut, 2002]. Dans les travaux de Zlotkin et Rosenschein [Zlotkin et Rosenschein, 1991] ou Kraus *et al.* [Kraus *et al.*, 1998], chaque agent possède sa propre fonction d'utilité et son choix est celui qui conduit à l'équilibre de Nash [Nash, 1953] c'est-à-dire un état dont aucun agent n'a intérêt à s'écarter.

³ « Par négociation nous entendons une discussion dans laquelle les différentes parties intéressées échangent des informations et arrivent à un accord. Les trois temps de la négociation se décomposent en (a) un échange bilatéral de l'information, (b) chaque partie dans le processus de négociation évalue les informations en fonction de son point de vue, (c) l'accord final est obtenu par consentement mutuel. »

2. La seconde, d'inspiration plus sociologique se rapproche plus du comportement des acteurs dans le processus même de la négociation [Epstein et Axtell, 1996]. Dans ce cadre, l'essentiel des travaux menés débouche sur l'élaboration de protocoles de négociation. Le plus connu est le *Contract Net Protocol* (CNP) [Davis et Smith, 1980] développé pour la coordination.

D'après Axtell [Axtell, 2000], la première approche n'est utilisable que si les modèles mathématiques, support de la négociation, ont une solution analytique ou numérique (méthode de Monte Carlo par exemple). La seconde est la seule possible pour explorer des processus complexes dans lesquels les relations entre agents ne sont pas réductibles à des modèles mathématiques. De leur côté, Axelrod [Axelrod, 1997] et Parunak *et al.*, [Parunak *et al.*, 1998] soulignent que la simulation est la seule approche viable pour étudier des populations d'agents de grande taille et qui interagissent selon des règles non linéaires.

Par la suite, de la présentation des différentes approches nous retiendrons celles issues du courant sociologique.

Müller [Müller, 1996] distingue trois éléments fondamentaux dans la négociation (Figure 20) :

1. La négociation qui s'appuie sur des langages comportant des primitives de communication pour la négociation, leurs sémantiques, et leurs usages dans les protocoles. Les primitives concernent les envois et réceptions de messages et intègrent des actes illocutoires. La structure de l'objet de la négociation fait appel à un langage de description de l'objet. Le protocole spécifie les séquences possibles d'actions et les conditions suivant lesquelles une requête peut être effectuée.
2. Les processus de négociation qui peuvent être, soit des procédures pré-établies, soit des comportements. Le processus concerne la proposition de solutions, l'analyse et la révision des solutions préférables.
3. La décision individuelle qui peut être prise en fonction de critères d'utilité, de stratégie, de systèmes de préférences, d'une fonction de comparaison et de mise en correspondance (*matching*). L'observation des différentes interactions humaines et l'analyse théorique ont permis de mettre en évidence dans les processus de prise de décision d'un acteur, une dimension individuelle et collective et la mobilisation conjointe de l'une et de l'autre en relation avec l'apprentissage [Zeng et Sycara, 1997].

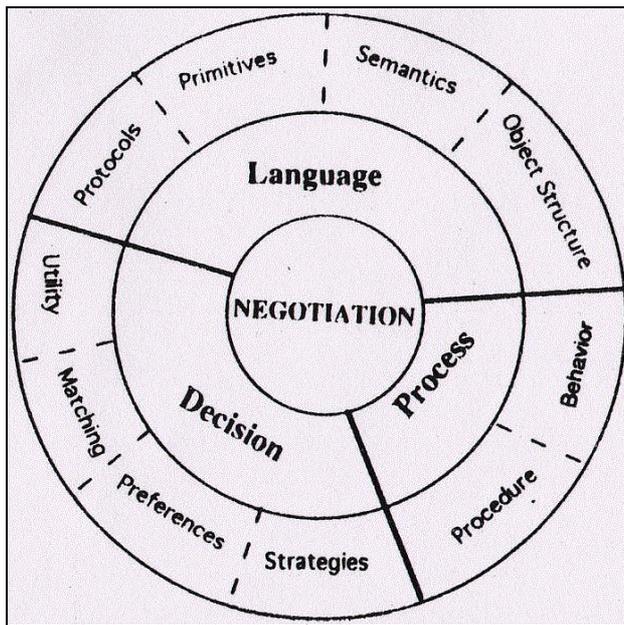


Figure 20: Les différentes catégories de négociation et leurs structures. D'après Muller [Müller, 1996]

2 Deux types de négociation : Intégrative vs Distributive

La négociation en IAD trouve place dans des situations de conflits entre agents qui peuvent porter sur les buts, les moyens ou les décisions [Vercouter *et al.*, 1998]. Ceci peut se produire en situation réelle, entre des acteurs antagonistes, en compétition ou en coopération. Simos [Simos, 1990] distinguent un gradient entre des situations d'affrontement et d'entente (Figure 21).

A chaque pôle Simos [Simos, 1990] associe un type de négociation (au sens IAD), la négociation distributive correspondant à une situation d'affrontement et la négociation intégrative correspondant à une situation d'entente. Aux limites de la négociation se trouvent :

- **L'affrontement** : seul le rapport de force joue ; il y a recherche de la soumission totale de l'adversaire.

- **L'entente** : les interlocuteurs oublient leurs intérêts propres et se retrouvent en situation de résolution de problème, c'est-à-dire vont chercher une solution optimale (du point de vue mathématique).

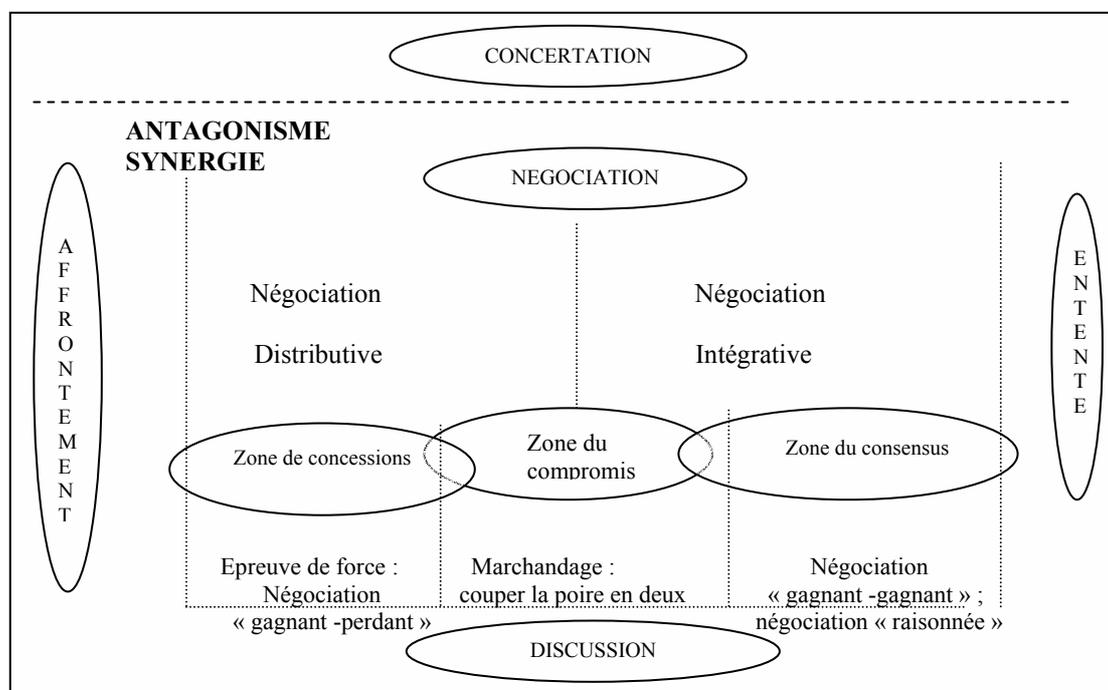


Figure 21: Les différents types de négociation [Simos, 1990]

Certains auteurs [Fox, 1981] [Moraitis, 1994] [Baeijs et Demazeau, 1996] [Simos, 1990] distinguent différentes modalités de négociation en fonction de leurs structures organisationnelles :

- **Organisation à membre unique** : un seul agent va effectuer toutes les tâches et actions qu'il souhaite.
- **Hiérarchie simple** : Le modèle dispose d'un agent qui dirige l'ensemble du système et répartit le problème en sous-problèmes entre les différents agents (appelés esclaves).
- **Hiérarchie multi-niveaux** : L'organisation est la même que précédemment mais un agent peut être le maître d'un ensemble d'agents et l'esclave d'un autre agent.
- **Organisation décentralisée** : Les groupes sont autonomes et communiquent sans relation d'autorité. Chaque groupe est maître de ses décisions et peut négocier avec tous les autres groupes sans rapport de force.
- **Organisation de marché** : C'est le modèle du « *Contract Net Protocol* » défini par Davis et Smith en 1980 [Davis et Smith, 1980].

Le concepteur d'un SMA choisira le modèle organisationnel en fonction des spécificités de son problème. S'il y a un grand nombre d'agents, une organisation hiérarchique est souvent préférable car elle limite le nombre des communications ; si les agents n'ont pas d'ascendants les uns sur les autres, on optera plutôt pour une organisation de marché,... Lorsque l'organisation n'est pas connue a priori, une organisation dynamique des agents est à envisager, appelée souvent auto-organisation [Le Strugeon, 1995].

On peut distinguer différents types de conflits [Béron *et al.*, 1996] :

- Le conflit de buts entre deux agents tel que la réalisation d'un but par l'un empêche l'autre d'atteindre le sien, même partiellement [Sycara, 1988].
- Les conflits de résultats qui surviennent quand plusieurs agents donnent des résultats différents à un tiers pour une même information demandée par celui-ci. Ces conflits dépendent fortement de l'organisation du système et du protocole de communication utilisé.
- Les conflits de ressources interviennent lorsque les agents utilisent des ressources communes dont le nombre n'est pas suffisant pour permettre de réaliser leurs buts entièrement ou partiellement [Zlotkin et Rosenschein, 1991, 1993].

On peut également distinguer un gradient dans l'ampleur du conflit, il peut être spécifique à un agent ou faire intervenir tout ou partie des agents du système.

Pour résoudre ces situations de conflits, différentes approches sont proposées. Elles peuvent être gérées de façon centralisée ou décentralisée.

La négociation peut s'effectuer (i) directement d'individu à individu [Lander et Lesser, 1993], (ii) être réglée de façon centralisée, en faisant appel à un médiateur ou à un arbitre [Sycara, 1992], (iii) ou à un dispositif hiérarchique [Durfee et Moss, 1997] [Davis et Smith, 1980].

Par ailleurs Kraus *et al.* [Kraus *et al.*, 1998] proposent différents critères pour qualifier ces méthodes :

- Distribution ou non : les règles d'interaction sont centralisées ou non.
- Symétrie ou équité pour la satisfaction de chaque agent.
- Rapidité : c'est à dire la part prise par la négociation dans la durée de simulation.
- Efficacité : renvoie au nombre d'agents satisfaits par les résultats de la négociation.
- Simplicité des stratégies mises en œuvre dans la négociation.

- Stabilité. Cette caractéristique correspond au respect d'une seule stratégie par agent tout au long de la négociation.

3 Différentes méthodes de résolution de conflits

De manière générale, dans les méthodes suivantes, la résolution de conflits se fonde sur la recherche d'un compromis acceptable par l'ensemble des antagonistes. Il s'agit ici de résolution plutôt démocratique.

Ces compromis peuvent conduire à infléchir différents points de l'état mental d'un protagoniste et les relations entre agents [Aknine, 2002]. Par exemple :

- Accepter les conditions d'un autre agent peut entraîner qu'un agent soit dans l'obligation de modifier son propre état interne (croyances, préférences...).
- Accepter les conditions d'un agent peut entraîner la modification des relations avec un tiers (ou plusieurs) et générer avec ceux-ci des situations de conflits.

Dans ces approches, même un agent non coopératif peut être amené à adhérer à un consensus partagé par l'ensemble de la communauté. Il peut avoir notamment intérêt à ce que les conflits ne se généralisent pas. Il peut également subir la pression des autres agents. Pour convaincre un agent « égoïste » plusieurs méthodes peuvent être employées. Par exemple, menacer de le gêner dans sa propre activité, promettre de l'aider en retour, Donner une récompense « monétaire » comme en théorie des jeux, en économie [Kraus, 2001]... De son côté, l'« altruiste » peut être amené à différer la satisfaction de ces propres objectifs en participant à la satisfaction des objectifs d'autres agents.

Ces méthodes font généralement appel à la théorie multi-attribut de l'utilité initiée par Von Neumann et Morgenstern [Neumann et Morgenstern, 1944]. Elles reposent sur une augmentation des connaissances dont dispose chaque agent sur les autres agents (préférences, argumentation, blocage, ...) en cours du processus. Dans ces méthodes, une négociation prend fin dès qu'un consensus est trouvé, quand on aboutit à une impasse (aucune nouvelle proposition n'est effectuée) ou, dans nombre de ces méthodes, quand le temps de la négociation excède une limite fixée.

Jennings cité par Beer *et al.* [Beer *et al.*, 1998] identifie trois composantes qui font l'objet de la recherche en négociation : (i) les protocoles de négociation, (ii) les objets de la négociation, (iii) le raisonnement des agents.

- **Les protocoles de négociation** définissent l'ensemble des règles qui gouvernent l'interaction. Le protocole concerne (i) le type de participant possible (les négociateurs et les candidats possibles), (ii) les états de la négociation (par exemple les propositions acceptables, la fin de la négociation), (iii) les événements qui entraînent une transition d'état, (iv) les actions valides que les négociateurs peuvent engager pour chaque état particulier. Kreifelts et Von Martial [Kreifelts et Von Martial, 1991] considèrent important qu'un protocole de négociation (dans des situations de résolution de problèmes distribués) s'attache (i) à prendre en compte la conservation d'un certain niveau de communication entre les différents agents tout en respectant l'autonomie, (ii) à favoriser l'échange de plans d'actions entre des agents, (iii) à synchroniser les actions, (iv) à laisser ouverte différentes voies possibles pour atteindre un compromis.
- **Les objets de la négociation** sont la gamme de résultats vers laquelle doit tendre la négociation. Ce résultat peut être simple comme un prix, ou un résultat en relation avec un prix, un délai de livraison, ... on trouve aussi ici les opérations possibles sur les objets.
- **Le raisonnement des agents** fournit le dispositif de prise de décision dont chaque participant dispose pour atteindre ses objectifs.

Les méthodes de résolutions de conflits supposent donc d'identifier clairement l'objet du conflit, les agents impliqués et mettre en place une conversation basée sur des actes de langage strictement spécifiés [Koning *et al.*, 1998].

3.1 Les méthodes centralisées

- **Une méthode hiérarchique : Le Contract Net Protocol (CNP)**

Ce protocole est largement utilisé. Il a été développé par Davis et Smith [Davis et Smith, 1980] comme modèle de négociation pour la résolution de problèmes distribués. Il est fondé sur la notion d'appels d'offres sur les marchés publics. Les relations entre les clients et les fournisseurs se créent grâce à un mécanisme d'appels d'offres émis par un manager. La décision finale est adoptée par celui-ci à partir des réponses envoyées par les contractants.

Ce protocole se décompose en quatre phases :

1. *Décomposition du problème* : Appel d'offres pour la réalisation d'une tâche.

2. *Distribution des « sous problèmes »* : le message est envoyé par le manager à tous les agents qu'il estime capable de réaliser la tâche ou à tous les agents du système. A partir de la description de la tâche, les agents contractants construisent une proposition qu'ils envoient au manager.
3. *Solution des « sous- problèmes »* : le manager reçoit et évalue les propositions et attribue la tâche au meilleur contractant.
4. *Réponse* : le contractant auquel la tâche est confiée envoie un message au manager en lui confirmant son intention de l'accomplir.

Aknine *et al.* [Aknine *et al.*, 2000] ont proposé une extension du CNP (Figure 22) dans lequel un même contractant peut travailler pour différentes tâches et un manager en organiser plusieurs. Sa structure hiérarchique favorise une rapidité du processus. Elle limite les désengagements des contractants [Aknine *et al.*, 2000]. Son usage ne se conçoit que dans une situation où les objectifs sont partagés par différents agents. Krishna et Ramesh [Krishna et Ramesh, 1998] soulignent que ce protocole n'est utilisable que dans le cas où les agents ont un but commun et ne l'est plus dès lors que les agents ont des objectifs conflictuels.

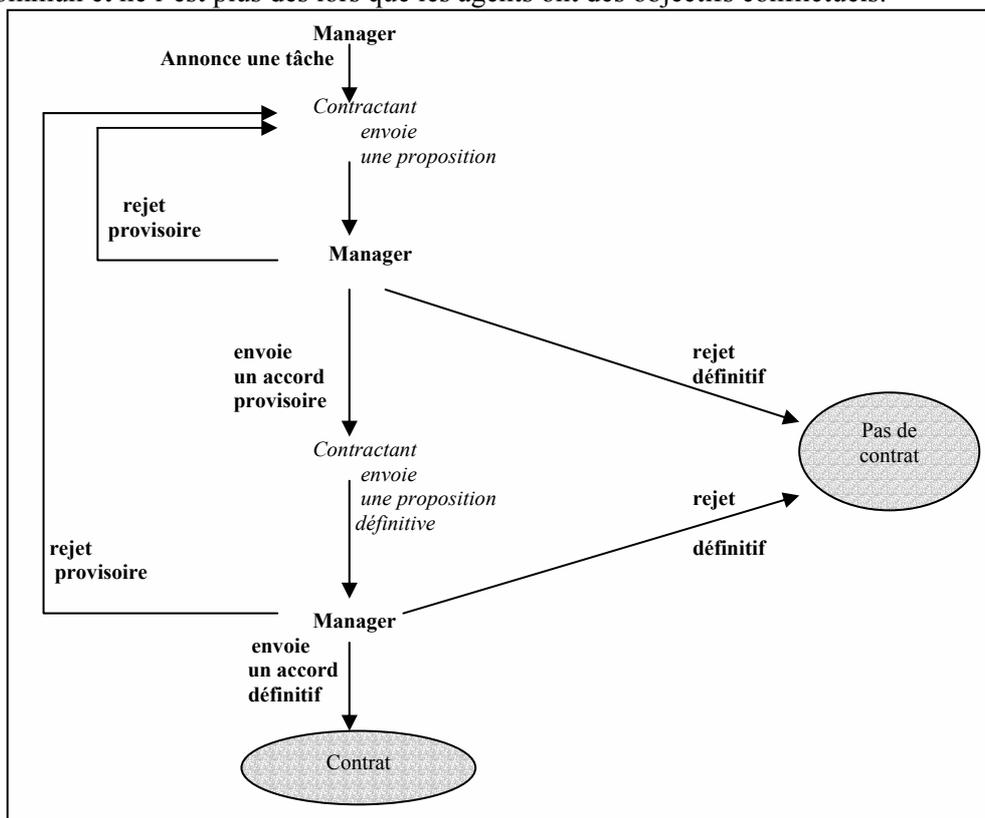


Figure 22: Graphe de transition des états de la négociation entre un manager et un contractant dans une extension du CNP. [Aknine *et al.*, 2000].

- **La négociation via un médiateur : PERSUADER**

La négociation est employée par Sycara pour résoudre des conflits de buts [Sycara, 1988]. Ce système a été implémenté dans PERSUADER [Sycara, 1992] pour aider à résoudre des conflits de travail entre les syndicats d'une entreprise et la direction. Dans ce modèle, trois types d'agents interviennent : un agent médiateur et deux agents opposants correspondant respectivement à la direction et aux syndicats.

Chaque agent opposant possède sa propre fonction d'utilité. Chacun cherche à l'optimiser. Toutefois, en cours de négociation ils seront amenés à réduire leurs exigences en terme d'utilité pour faire aboutir la négociation. En ce sens, on peut dire qu'il s'agit d'agents coopératifs.

L'agent de coordination (ou agent médiateur) aide à trouver un compromis entre les deux agents décrits précédemment. Cet agent de coordination (i) propose un compromis initial aux deux opposants, (ii) corrige cette proposition en cas de refus, (iii) reçoit toutes les justifications de chaque agent associées à une réponse. Ainsi, le médiateur acquiert progressivement une vision de plus en plus complète du système. Il s'arrête dès qu'un premier compromis est obtenu.

On retrouve le même type d'approche mais pour des agents non-coopératifs chez Kreifelts et Von Martial [Kreifelts et Von Martial, 1991].

3.2 Les méthodes décentralisées

Les protocoles de négociation que nous allons décrire succinctement reposent sur une représentation commune du processus de négociation [Jennings *et al.*, 2000, 2001]. Généralement ces approches s'inscrivent dans le courant BDI (*Belief, Desire, Intention*) [Rao et Georgeff, 1995] (définie ultérieurement) ou des courants proches.

A chaque étape de la négociation, on distingue (Figure 23) :

- Un objet qui est défini par différents critères. Cet objet peut être une croyance, un but, un plan.
- Un espace de négociation dont les dimensions sont les critères de l'objet. Dans la Figure 24 les dimensions sont au nombre de deux.
- Des agents négociateurs qui sont situés dans l'espace de négociation par :
 - Un sous-espace qui correspond à un ensemble en extension dans lequel chaque point correspond à une proposition,

- Des préférences qui sont l'expression des poids relatifs des différents critères de l'objet,
- Une fonction d'utilité qui met en œuvre un critère unique de synthèse quantifiable, construit à partir des critères et des préférences. Cette fonction d'utilité est générale à l'ensemble de la négociation.
- Chaque point du sous-ensemble est quantifié par son utilité.
- Au départ de la négociation on crée un objet initial et un agent initiateur de la négociation.

Les agents négociateurs sont proactifs car ils peuvent dans tous les cas faire évoluer leur sous-espace en fonction d'un pronostic porté sur l'évolution de la négociation. A tout moment de la négociation un agent peut faire entrer un tiers dans le processus pour l'aider à accomplir l'objectif poursuivi.

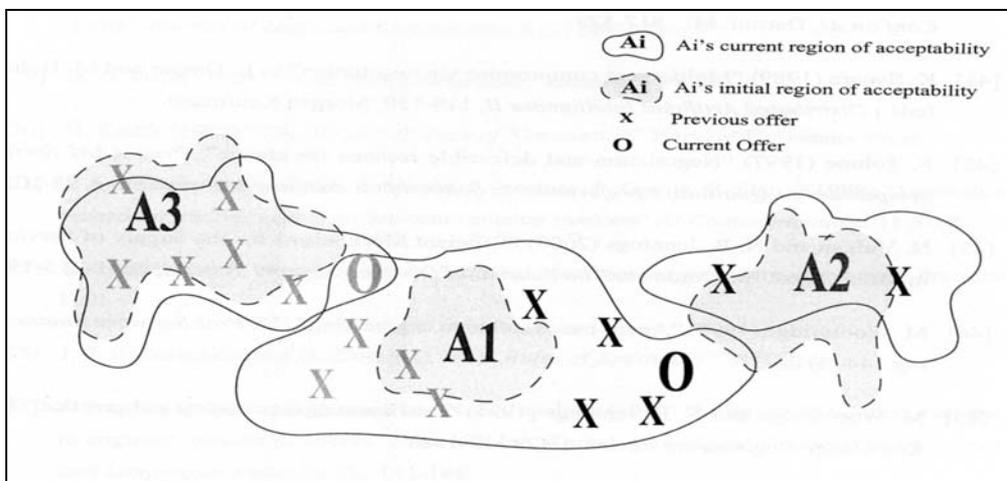


Figure 23 L'espace de négociation [Jennings *et al.*, 2001]

On présentera trois méthodes : Les deux premières (recherche négociée, recherche basée sur des méthodes heuristiques) vont conduire à une évolution de l'espace de négociation par formulation de propositions ou contre propositions. Dans ces deux premiers cas, l'évolution de l'espace des négociations est l'image de l'état interne de chaque agent décidé par lui-même (Belief, préférence,...). La troisième (basée sur l'argumentation) conduit également à une modification de l'espace mais peut également conduire à l'évolution des états internes des agents sous l'influence de l'argumentation invoquée par l'un d'entre eux.

- **La recherche négociée : TEAM**

Dans cette méthode, les agents ne sont pas fondamentalement hostiles. La recherche d'un compromis se fait de façon itérative par élimination progressive des solutions inacceptables par l'ensemble des agents [Lander et Lesser, 1993].

Au départ, un agent fait une proposition, les autres l'évaluent en fonction de leurs propres critères. Les agents qui refusent cette proposition opèrent un retour en arrière compte tenu de leurs désaccords. Ceci conduit éventuellement certains agents à émettre une contre proposition. Celle-ci est examinée par les autres agents. Ce cycle est répété jusqu'à trouver une proposition acceptée par l'ensemble des agents. Au cours de ce processus incrémental les agents sont amenés à réduire leurs exigences pour favoriser une convergence vers un consensus [Zlotkin et Rosenschein, 1991].

Au plan de l'implémentation, cette méthode met en œuvre un mécanisme de résolution par satisfaction de contraintes [Sycara, 1988].

Cette méthode s'applique à un système distribué et est mise en œuvre dans TEAM [Lander et Lesser, 1993] qui propose des agents hétérogènes et réutilisables.

- **Méthode heuristique**

Dans cette méthode Jennings *et al.* [Jennings *et al.*, 2000] ont développé un ensemble d'algorithmes de négociation fondé sur la théorie multi-attribut de l'utilité dans lesquels un agent a (i) une stratégie de négociation, c'est à dire comment conduire la négociation lors d'une confrontation donnée (ii) des tactiques comme moyen d'accomplir ces stratégies. Ces stratégies et tactiques peuvent évoluer au cours de la négociation.

Les auteurs distinguent trois grandes attitudes en négociation Faratin *et al.*, 2000, 2001] [Sycara, 1988] : faire des concessions, échanger des objets de négociation, proposer de nouveaux objets de négociation dans la confrontation en cours. Ces auteurs proposent [Faratin *et al.*, 2000, 2001] [Sycara, 1988] des algorithmes et des heuristiques. Ceux-ci mobilisent le mécanisme de satisfaction de contraintes. Ces méthodes sont particulièrement utilisées dans des approches distribuées avec des agents homogènes. Matos *et al.* [Matos *et al.*, 1998] ont utilisé ce type d'approche dans le domaine financier. Il s'agissait de désigner l'agent le plus approprié pour effectuer une tâche tout en respectant les conditions prédéfinies.

- **La négociation basée sur l'argumentation : ANA**

Cette méthode vise à repousser certaines limites attachées aux deux modèles précédents [Jennings *et al.*, 2001]. (i) Les propositions correspondent en général à un seul point de l'espace de négociation (un seul X, un seul O dans la Figure 23). (ii) La seule réaction à une proposition est d'émettre une contre-proposition (un autre point de l'espace), d'accepter la proposition ou la refuser. (iii) Il est difficile de changer les objets de la négociation au cours de celle-ci (ce qui correspondrait à changer l'espace de négociation en ajoutant de nouvelles dimensions).

Dans cette méthode [Jennings *et al.*, 2001] [Kraus *et al.*, 1998], les agents sont de type BDI. Ils peuvent être coopératifs ou ne pas l'être. L'argumentation est un processus itératif qui émerge des échanges entre agents pour persuader l'autre et lui faire changer ses intentions. Un échange s'opère en mobilisant des illocutoires qui peuvent être de type promesse, menace, demande...et des modèles de logiques qui peuvent être des logiques modales, floues,... Une formalisation peut être trouvée dans Moraitis [Moraitis, 1994].

L'idée de base est de permettre d'augmenter la nature des informations échangées. Un agent pourra ainsi expliquer les raisons de sa réaction à une proposition, par exemple, associer des critiques au rejet d'une proposition et expliquer en quoi elle est inacceptable. De même, un agent pourra accompagner une proposition d'arguments destinée à convaincre un autre agent de répondre favorablement, par exemple : menace (*threats*), récompense (*rewards*), ... Un dernier type d'argument vise à modifier le sous-espace consensuel d'un autre agent en modifiant ses préférences ou les moyens de modifier l'espace de négociation lui-même (dimension de l'objet de négociation).

Sierra *et al* [Sierra *et al.*, 1997] proposent une ontologie de base pour la négociation et présentent sur la Figure 24 la mise en oeuvre de cette ontologie au cours d'un processus. Une négociation commence toujours par une proposition qui peut être une offre ou une demande. Cette étape est suivie par un échange d'illocutions qui peuvent être l'émission de contre-propositions ou d'arguments de persuasion. Enfin, une illocution de fin de processus est invoquée, par exemple : acceptation, refus.

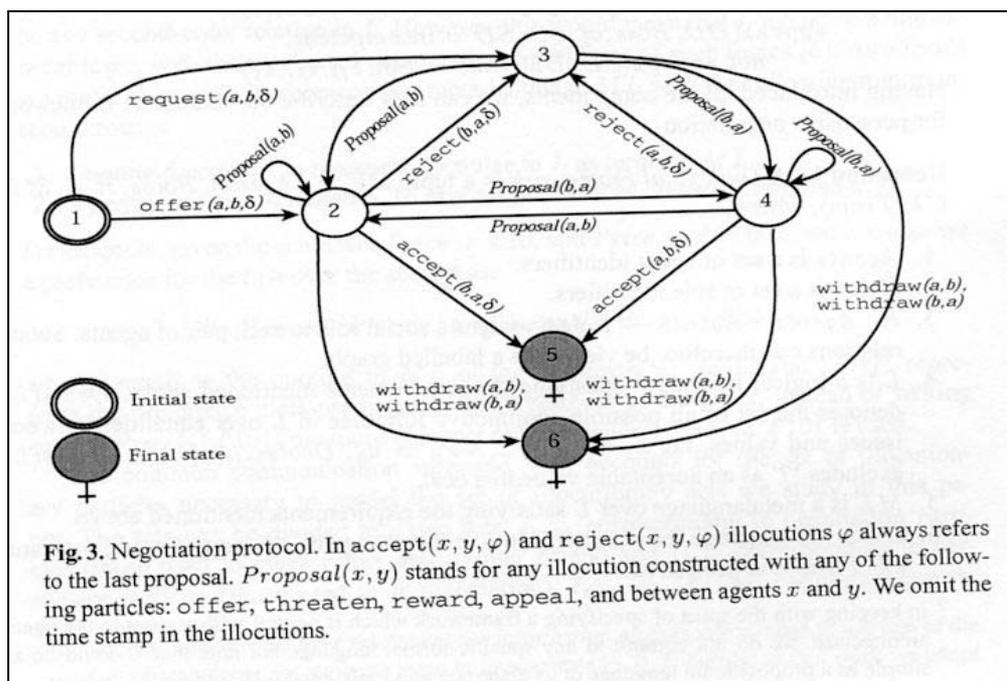


Figure 24 : Protocole de négociation basée sur l'argumentation [Sierra *et al.*, 1997]

Pour être utilisable en situation concrète les agents doivent pouvoir être dotés de comportements flexibles. Les individus doivent avoir une ontologie commune. Les préférences individuelles doivent être publiques.

4 Conclusion

Comme le soulignent Chang et Woo [Chang et Woo, 1992] dans la plupart de ces méthodes ou protocoles utilisés pour résoudre des conflits (excepté le protocole Persuader de Sycara [Sycara, 1992]), la négociation est vue comme un processus avec échanges de contrats qui résultent des processus de planification ou des processus de raisonnement. Dans ce dernier cas, chaque agent a une meilleure idée de ce que souhaitent faire les autres agents et peut réajuster ses propres plans voire influencer le comportement des autres.

Les avantages de telles approches, à l'instar de Jennings *et al* [Jennings *et al.*, 2000] sont les suivantes : contrairement aux modèles fondés sur la théorie des jeux, la rationalité complète n'est pas une hypothèse nécessaire et ces modèles reposent généralement sur les rationalités limitées et procédurales. Il ne s'agit donc pas de rechercher une solution optimale.

Selon Chang et Woo [Chang et Woo, 1992] les limites sont les suivantes : ces protocoles ne permettent pas aux agents de négocier à différents niveaux, c'est à dire que les agents ne peuvent négocier ni le choix d'une action en particulier, ni les critères et hypothèses d'une prise de décision.

Enfin, les méthodes habituellement préconisées sont relativement lourdes à mettre en œuvre et adaptées souvent à des problèmes particuliers. Par ailleurs, le comportement de ce type de système peut s'avérer difficile à prédire voire à interpréter.

Lors d'une table ronde portant sur la négociation dans les systèmes multi-agents [Beer *et al.*, 1998] Schroeder met en garde contre l'émergence d'un standard en terme d'argumentation et de négociation, il invoque deux raisons. La nature de l'argumentation et de la négociation diffère dans de grande proportion entre deux situations. Ainsi, une négociation portant sur des contrats n'aura rien à voir avec une discussion de nature philosophique ! Si l'argumentation et la négociation sont vraiment importantes pour les participants, ils voudront utiliser le meilleur protocole, ce qui va à l'encontre une standardisation. Par ailleurs, selon lui, la part la plus délicate dans toutes situations d'argumentation et de négociation n'est pas la définition formelle d'algorithmes et de protocoles mais la compréhension d'un argument. Malgré tous les travaux portant sur les ontologies, il n'est « pas loin » de penser que tant qu'un ordinateur ne pourra comprendre, les protocoles de négociation et d'argumentation simples seront les plus efficaces.

De plus, l'utilisation de modèles pour représenter la dynamique de systèmes conduit à se poser la question de la place de la négociation vis-à-vis du modèle ou du modèle par rapport à la négociation. Deux types d'approches sont possibles, (i) tout d'abord l'utilisation de modèles endogènes qui font émerger des protocoles de négociation (théorie des jeux, modèles à base d'apprentissage automatique par exemple), (ii) ensuite l'utilisation de modèles exogènes où le processus de négociation est externe.

Nous proposons une alternative possible fondée sur le paradigme multi-agent dans laquelle on simule un ensemble de règles de négociation. C'est à travers la simulation du processus de négociation qu'émergeront des solutions plus ou moins satisfaisantes. L'objectif est de fournir aux négociateurs, dans le cadre de la gestion collective de l'eau, un instrument permettant de tester les conséquences d'une réglementation. Ces négociateurs ont alors toute liberté pour modifier cette réglementation, en tester les conséquences, afin d'aboutir à un compromis acceptable. Les conséquences dépendent des contraintes agricoles, des différents comportements des acteurs en particulier, de la confrontation de leurs règles de décision.

Cet instrument d'aide à la négociation (Figure 25) a pour vocation de permettre :

- une vision globale du système à gérer,
- une vision partagée par les différents acteurs,
- une utilisation par les acteurs eux-mêmes pour tester différents scénarios.

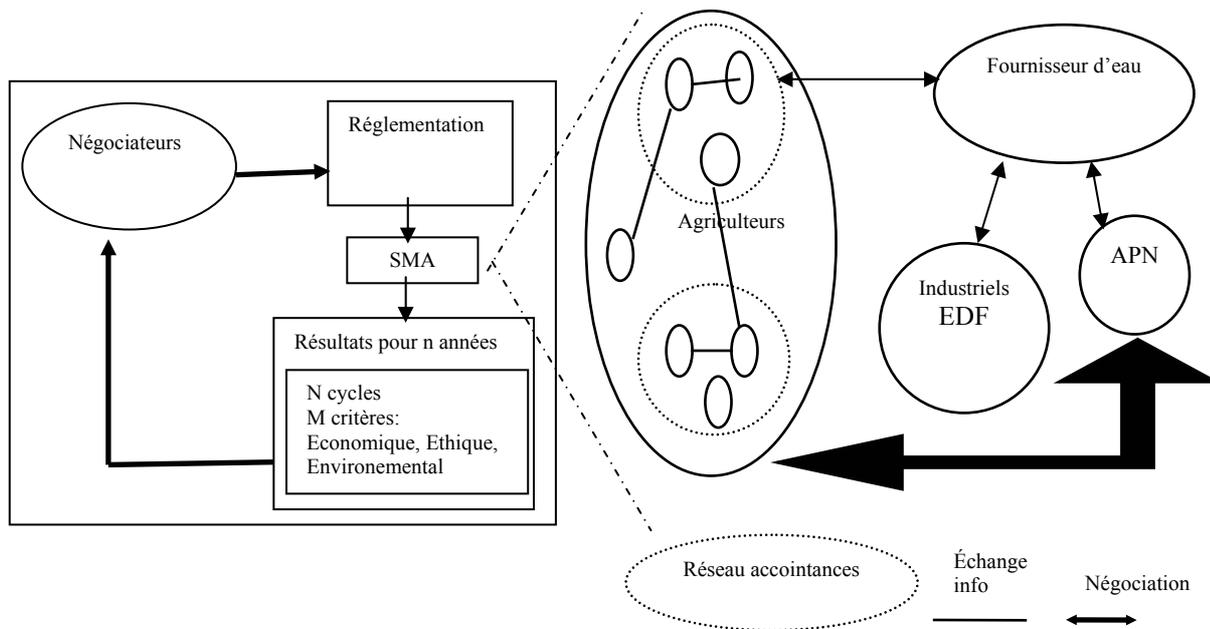


Figure 25 : La place du SMA développé dans l'aide à la décision d'un collectif.

Chapitre 5

Démarche méthodologique

Dans le cadre de la gestion de l'eau, domaine de notre problématique générale, différentes approches sont tentées pour aider au mieux les décideurs de l'allocation de la ressource entre les différents usagers. Pour enrayer la surexploitation des nappes et rivières en accès libre, une gestion de la demande en eau est de plus en plus préconisée. Jusqu'alors, la gestion d'une telle ressource a été étudiée par des modèles de fonctionnement de systèmes physiques, les usages étant modélisés simplement, sans tenir compte des comportements non marchands, des interactions locales entre usagers, et des investissements à long terme. Dans ce chapitre nous présentons l'étude du domaine, les modèles existants et enfin la démarche méthodologique

1 Le contexte

Durant les Trente Glorieuses, au lendemain de la Seconde guerre mondiale, l'enjeu principal au niveau de l'Europe consiste en une augmentation de la productivité. Pour ce faire, l'utilisation des engrais et des pesticides s'est généralisée, la mécanisation s'est largement développée, les variétés végétales sont devenues plus performantes et on assiste à une augmentation considérable des productions. En parallèle, on observe une baisse du nombre d'agriculteurs. Par exemple, depuis les années 80, le rendement du blé tendre a augmenté d'environ 60%. Et, si l'on estime qu'un agriculteur français nourrissait 7 personnes en 1960, il en nourrit 90 aujourd'hui. Le revenu des agriculteurs allait de paire avec l'augmentation de la productivité et a été longtemps soutenu par la CEE. Mais depuis quelques années on assiste à un surplus des stocks européens et les conséquences de cette surproduction ne vont pas sans poser de problèmes.

D'une part, avec l'augmentation de la production, les conséquences défavorables sur l'environnement telle que : la pollution de l'eau (par les nitrates, par les pesticides) ont augmenté et les ressources communes à la collectivité, notamment l'eau, ont diminué. Cette

ressource qui fait partie du patrimoine se partage entre de nombreux acteurs au niveau régional, national ou au niveau européen. Au niveau agricole, l'eau, qui concourt à l'augmentation et à la sécurisation des rendements est devenue un facteur clé depuis une dizaine d'années. On observe par exemple en France une augmentation de 66% de l'irrigation entre 1988 et 1997.

D'autre part, l'ouverture du marché commun sur les produits agricoles au niveau international pose les problèmes de la rémunération et des moyens de maintenir une agriculture rentable et garante à la fois du maintien des revenus et du respect de l'environnement pour les générations futures. La baisse de la réserve en eau entraîne des conflits entre les différents usagers et l'application d'une réglementation pour une gestion équilibrée de la ressource s'est avérée indispensable.

1.1 Une ressource collective en accès libre

Le concept de ressource commune n'est applicable que si les usagers sont en quelque sorte « copropriétaires » de la ressource et si les règles d'accès en sont clairement définies. Hardin [Hardin, 1968] a montré que l'accès libre à une ressource collective conduit en général à une surexploitation, ce qu'il définit comme la tragédie des communs. Ceci est souvent rencontré dans le cas des nappes. Chaque usager qui puise de l'eau entraîne un abaissement du niveau et provoque une augmentation des coûts de pompage pour l'ensemble des usagers. Si rien ne limite, personne n'assure le comportement individuel de chaque usager, c'est ce qui encourage la « course au pompage », et donc la surexploitation, voire la destruction de la ressource.

1.2 Caractéristiques de la loi sur l'eau

Face à la surproduction générale en Europe, la CEE a été obligée de réglementer les prix et les primes données aux Agriculteurs. En France, le problème de l'eau se pose avec acuité et une législation importante a été mise en place.

La loi sur l'eau de 1992 en a constitué le point de départ. Dans son préambule il est écrit que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation » et que « sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général ». Ainsi, il est nécessaire de définir des règles de partage de l'eau « satisfaisantes » non seulement en tant que « ressource partagée » mais également en tant que « ressource patrimoine » pour l'ensemble des acteurs concernés. L'application de ces règles, ne pouvant être imposée nécessite une concertation et des négociations entre les différents acteurs.

Par ailleurs, les problèmes sont locaux : par exemple, une solution applicable en Charente n'est pas transposable en Beauce. La prise en compte des caractéristiques locales est une nécessité. Les agriculteurs de la Beauce n'ont pas attendu la dernière loi sur l'eau, de 2001 pour mettre en œuvre une gestion collective et raisonnée de la ressource en eau de la nappe. Cette région a connu de grandes sécheresses entre 1988 et 1994 et le plus souvent les agriculteurs ont été montrés du doigt. La concertation devenait nécessaire avec pour objectif de ne plus atteindre le seuil minimum de janvier 1994. Des négociations ont eu lieu sur les volumes prélevables pour irrigation. En 1995, une charte a été adoptée entre l'administration et les organisations professionnelles définissant trois seuils d'alerte de la nappe déclenchant des limitations d'irrigation. Selon le niveau de la nappe entre ces seuils, les volumes d'eau attribués pour l'irrigation sont variables selon les conditions climatiques. Défini chaque début d'année, ce volume est réparti entre chaque département au prorata de la surface exploitée par les irriguants.

On se demande alors si l'apport d'instruments de simulation ne permet pas d'aider les négociateurs à rendre plus objectif et plus transparent l'ensemble des décisions prises au niveau régional ou local. Par des simulations on pourrait envisager les multiples conséquences qu'un ensemble de règles de partage de l'eau entraînerait au niveau économique, environnemental et de la ressource.

1.2.1 Les différents acteurs de la gestion de l'eau

En France, de nombreux acteurs étrangers à l'agriculture interviennent dans la gestion de l'eau ; le distributeur d'eau potable (Vivendi, Lyonnaise des Eaux,...), les industriels, Electricité de France (EDF), les pêcheurs, les loisirs (bases nautiques, piscines...) ... On se limitera par la suite aux différents acteurs intervenant dans la gestion de l'eau d'irrigation [Montginoul, 1997] (Figure 26).

1. L'état définit des règles à respecter (Lois, Décrets, Règlements).

La loi de 1992 a donné naissance, d'une part à la création d'un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des eaux (SDAGE) qui, au niveau d'un bassin ou d'un regroupement de bassins, fixe «les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée» (Art 6 Loi 1992), d'autre part à la création d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) qui permet, au niveau d'unité locale hydrologique, «une mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des ressources en eau superficielle et souterraine et des écosystèmes aquatiques ainsi que de préservation des zones humides.» (Art 6 Loi 1992)

L'Etat délègue la gestion de l'eau à des gestionnaires de l'eau, soit :

- A des Agences de l'eau (au nombre de 6 en France) qui ont pour but la lutte contre la pollution, l'amélioration des ressources en qualité et en quantité. Ce sont des intermédiaires entre l'Etat et les usagers.
- Aux Sociétés d'Aménagement Régional (SAR) pour les grands périmètres irrigués. Ces sociétés sont des sociétés d'économie mixte nationales.
- Aux Associations Syndicales Autorisées (ASA) pour les périmètres irrigués de petites tailles (< 100 ha)

2. **Les organismes gestionnaires de la ressource en eau (CACG)** chargés de gérer les différents ouvrages desservant de l'eau aux différents usagers sont les intermédiaires entre l'Etat et les Agriculteurs. Leurs principaux objectifs sont d'équilibrer le budget qui leur est attribué et de maintenir un certain périmètre irrigué.

3. **Les agriculteurs** sont des usagers de la ressource en eau. Selon leurs productions, leurs objectifs de rendement, leur attitude vis-à-vis du risque et leurs réserves financières leurs demandes en eau varient.

4. **Les Associations de Protection de la Nature (APN)** sont des groupes de pression d'utilisateurs (pêche, loisirs, lieu touristique...) qui cherchent à maintenir des conditions environnementales favorables et sont souvent farouchement opposés à l'emploi de l'eau pour l'irrigation et à la construction de barrages.

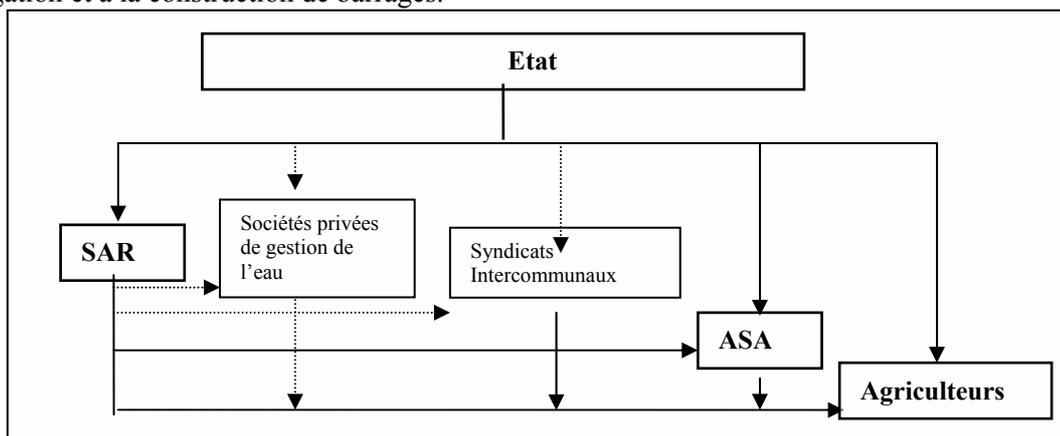


Figure 26: Organismes intervenant dans la distribution de l'eau d'irrigation en France [Montginoul, 1997]

1.2.2 Les outils d'intervention sur la gestion de l'eau en agriculture

Les outils de gestion de la demande sont variés (Figure 27). Un instrument de gestion de la demande doit être susceptible de modifier celle-ci de manière directe (autoritaire ou consensuelle) ou indirecte (incitative) pour tendre vers un équilibre offre /demande ou du moins maîtriser la demande.

Par suite de l'augmentation de la consommation de l'eau et pour obtenir une gestion de la ressource, différentes méthodes sont employées :

1.2.3 Des outils non économiques

Les instruments non économiques permettant de gérer la demande d'utilisation d'une ressource collective, comportent essentiellement l'éducation, les règles qui déterminent les droits d'accès, d'usage et de participation à la gestion.

- Les interdictions préfectorales

Le préfet peut imposer une interdiction de prélèvement d'eau pour éviter d'arriver à une pénurie dans certaines conditions climatiques.

Cette mesure a entraîné parfois des effets inimaginables ; par exemple, en Charente le préfet a interdit une certaine année de prélever de l'eau le samedi et le dimanche. L'année suivante, avec les mêmes interdictions on a observé une augmentation de la consommation d'eau. Ces mesures de restrictions au jour le jour ont eu pour effet d'inciter les irriguants à investir dans de nouvelles capacités d'irrigation.

De façon générale, la réglementation préfectorale reste le dernier recours en cas de crise non maîtrisable par la gestion de quota.

Dans le cas de réglementation nous nous intéresserons en particulier aux instruments économiques pour la gestion de la demande.

1.2.4 Des outils économiques

Les instruments économiques sont de type indirect : il s'agit d'influencer le comportement des usagers par des indicateurs fondés sur les mécanismes de marché, comme une mesure de tarification, une taxe, une redevance ou encore un marché de l'eau.

- La tarification de l'eau

D'après Tardieu, directeur de compagnie et auteur d'une tarification mise en œuvre en Gascogne, « *la tarification est conçue de façon à orienter les décisions des consommateurs dans le sens de l'optimum économique collectif et concourir à une utilité optimale des ouvrages construits. Elle responsabilise l'utilisateur, en le rendant conscient de l'ensemble des coûts induits par sa consommation (valeur de l'eau, coût des investissements, distribution...).* » [Tardieu, 1999]. Cette méthode soutenue par les économistes se heurte à une résistance de la part de la profession agricole. La gestion volumétrique constitue pour eux une solution de moindre mal.

- **La gestion volumétrique**

Elle a pour objectif de définir pour chaque agriculteur le volume maximal prélevable en fonction des besoins des différentes cultures et de la quantité d'eau que peut offrir le milieu naturel (nappe de Beauce, Bassin de la Charente...). Mais le problème majeur est que l'on ne connaît ni la ressource, ni les besoins en eau qui varient en fonction du climat de l'année.

On peut distinguer trois types de gestion volumétrique, pas toujours exclusifs :

- ***La détermination d'un volume d'eau pour l'année***

Dans le cas particulier d'une nappe qui correspond à un stock important d'eau, le volume prélevable pour chaque irriguant a été défini comme suit (Cas du Département du Loiret) après concertation entre l'administration et les agriculteurs :

D'après l'annexe II du rapport remis auprès du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement [Martin *et al.*, 2000]:

$$V = \alpha [20\ 000 + \beta(300 \cdot \text{SAU} + \text{volume à l'hectare négocié} \cdot \text{surface})] \quad [1]$$

Avec :

- α le coefficient annuel.
- 20 000 m³ sont alloués à chaque exploitation quelles que soient les cultures
- β le coefficient cultural dépend de la nature du sol.
- 300 m³ sont alloués à chaque hectare de SAU (Surface Agricole Utilisable) quel que soit le type d'assolement pratiqué.
- Selon la culture, un volume à l'hectare a été négocié avec les irriguants. Ce volume est ajouté au 300 m³ précédents.

- ***Le quota débit***

Le gestionnaire connaît en fonction du débit d'une rivière (ou dans un réseau de canaux gravitaires) et selon la surface irriguée de l'agriculteur, la quantité qu'il pourra attribuer à ce dernier. On parle de quota débit. Par exemple, la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) (une des Sociétés d'Aménagement Régional (SAR)) signe chaque année avec les utilisateurs un contrat qui fixe un débit maximum prélevable et des pénalités en cas de dépassement du débit souscrit. [Tardieu, 1999]

- **Le quota temps**

Lorsque le gestionnaire ne possède aucune donnée sur les volumes d'eau prélevés par les agriculteurs, il limite le temps pendant lequel l'utilisateur pourra prélever. On parle de quota temps.

Tab.1 : Les outils de gestion de la demande : avantages, conditions et limites

Outils	avantages	conditions	limites	exemples	
techniques	assolement moins consommateur en eau	adapter les cultures à la pluviométrie	acceptation locale, contextes économique et pédologique	difficulté à imposer	Israël
	couplage d'un SIG et d'une aide à la gestion de l'irrigation	limiter les abaissement dus aux prélèvements en concertation avec les usagers en limitant leurs pertes	contexte de concertation, disponibilité des données, niveau de développement	insuffisant dans certains cas, difficile à mettre en œuvre sur un système complexe et vaste	Castille, Espagne (Eheart et Barclay, 1990)
	efficience du réseau	réduire pertes en eau	rentabilité	insuffisant	Israël
	systèmes d'irrigation économes	réduire pertes en eau	moyens financiers, subvention, vulgarisation,	choix dépendant de la qualité de l'eau, du débit ou de la pression disponible	Nebraska, E.U ; Cap Bon, Tunisie Israël
	pose de compteurs	contrôler, facturer au volume	acceptation locale	contournement ; difficulté de contrôle ;	France
économiques	tarification (de l'eau ou de l'énergie)	inciter à l'économie d'eau (adaptation des assolements, des objectifs de rendement, des pratiques)	demande élastique ; facilité par le paiement d'un service ; acceptation locale	difficile en cas d'absence de service de distribution collectif ; difficulté de perception, de contrôle demande peu élastique	Système aquifère girondin, France (à l'étude in Reynaud 2000)
	taxes, redevances	inciter à l'économie	élasticité demande taxes ; risque d'effet contraire,	difficulté de perception de contrôle, d'acceptation	nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	accès payant	décourager la construction de nouveaux captages	acceptation locale, déclaration, prix décourageant	difficulté de contrôle ; non déclaration	
	marché de l'eau	augmenter l'efficience économique de l'eau accès des non propriétaires à l'eau	acceptation locale, infrastructures technique et institutionnelle	n'empêche pas la surexploitation à terme, risque de déséquilibre social	Pakistan (Meinzen-Dick, 1997)
non économiques	éducation des usagers	meilleure acceptabilité gestion	moyens, niveau éducation	insuffisant	Nebraska, E.U ; Castille, Espagne
	quotas	contraindre la demande de manière équitable	mesure du volume ou du temps	capacité de contrôle dans un système de prélèvement dispersé	nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	droits d'accès	inciter les gens à ne pas construire	déclaration construction	autoritaire, implique moyen de contrôle ; inéquité	Chine (Grimble et al., 1996)
	outils contractuels	adapté aux conditions locales, acceptés par la population	contexte de négociation, conscience du risque, conscience du caractère commun de la ressource	problèmes de représentation, vision locale, à court terme, problème fédérateur, longueur des négociation...	Astien, France (Laurent, 1993) Vistrenque, France (ANDA, 1999) nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	écartement des puits	limiter les interférences locales	moyens de contrôle	parfois inutile	Nebraska, E.U.
	zones d'accès	réguler l'accès et l'usage	moyens de contrôle, acceptation	autoritaire, mal compris implique moyen de contrôle	nappe de Kairouan, Tunisie France

Figure 27 : Les différents outils de la gestion de la demande [Feuillette, 2001]

2 Les modèles existants

2.1 Méthodes multicritères

Duckstein *et al.* [Duckstein *et al.*, 1992] présentent une application de quatre méthodes d'aide multicritère à la décision à un problème caractéristique de la gestion des eaux souterraines. Pour générer une représentation discrète de l'ensemble de solutions non dominées, Duckstein *et al.* [Duckstein *et al.*, 1992] utilisent un modèle de gestion des eaux exprimé sous forme multicritère. Ce modèle est basé à la fois sur la méthode des éléments finis pour modéliser le système physique et sur une combinaison de la méthode des réponses (*Response Matrix Method*) et la méthode implicite (*Embedding Method*) pour formuler un programme mathématique. Les auteurs analysent alors, en tant qu'outils potentiels d'aide à la décision pour le rangement et enfin le choix du schéma de gestion approprié, quatre méthodes multicritères : Compromise Programming, ELECTRE III, la théorie de l'utilité multi-attribut et la méthode UTA représentant, respectivement, les approches basées sur la distance, sur le surclassement et sur l'utilité multiplicative et additive.

La comparaison des résultats obtenus montre que ces méthodes, quoique différentes, aboutissent aux mêmes solutions. Les auteurs ont aussi étudié l'adéquation de ces méthodes aux différents problèmes de gestion des eaux souterraines.

A l'occasion d'un plan régional de développement des ressources en eau supplémentaires pour le bassin Adour-Garonne, Netto *et al.* [Netto *et al.*, 1993] ont examiné comment des méthodes d'aide multicritère à la décision permettaient de porter un regard critique sur le processus multi-acteur de sélection d'un site où construire un grand barrage-réservoir. Dans leur étude Netto *et al.* [Netto *et al.*, 1993] ont décrit d'abord les éléments du problème décisionnel : 4 acteurs, 13 critères et 38 alternatives. Dans une première phase, ils ont montré comment la méthode ELECTRE III permettait d'analyser les alternatives. Ensuite, deux techniques d'aide multicritère à la décision, l'une quantitative (extension d'ELECTRE III), l'autre non-numérique (ME-Multi Criteria Decision Making) ont été utilisées pour simuler le processus de décision multi-acteur et multicritère. Les solutions obtenues ont été comparées à celles issues du processus réel de décision. L'existence de point de convergence et de divergence entre ce processus et la formalisation proposée par Netto *et al.* [Netto *et al.*, 1993] met en évidence la pertinence des méthodes employées et permet de les évaluer.

Duckstein *et al.* [Duckstein *et al.*, 1993] décrivent l'application d'une méthode multicritère à un problème d'hydroécologie où non seulement des alternatives doivent être ordonnées mais aussi l'ensemble des critères est à évaluer. Ce travail a permis de définir un sous-ensemble restreint de critères permettant de sélectionner un projet qui constitue un bon compromis dans la portion du Danube située entre Vienne et la frontière slovaque. Cette portion a une grande valeur écologique car elle est une des rares où le Danube coule librement. Duckstein *et al.* [Duckstein *et al.*, 1993] ont distingué trois types d'objectifs en conflit : l'objectif économique, écologique et sociologique. La technique « Multicriterion Q-Analysis » (MCQA) est appliquée en vue de susciter des discussions entre les divers décideurs ou acteurs représentant respectivement les trois types d'objectifs en contraste avec le manque de communication éprouvé jusqu'à présent. Ce travail a permis de mettre en évidence un meilleur plan parmi douze. Ceux-ci concernent différents projets hydroélectriques ainsi que divers projets de parcs nationaux.

Dans le cadre d'une étude permettant l'évaluation environnementale des pratiques agricoles, et plus particulièrement dans l'élaboration d'une méthode permettant de différencier des systèmes de culture en fonction de leur impact sur la qualité de l'eau, Arondel et Girardin [Arondel et Girardin, 1998] ont proposé un tri de systèmes de culture à l'aide de la méthode ELECTRE TRI [Mousseau *et al.*, 1999] [Yu, 1992]. Ainsi, quatre catégories d'impact ont été définies et trois familles de critères ont été construites. La nature des critères constitue le débat central de l'étude : si des données de base sont utilisées, le nombre de critères est élevé ; si des données agrégées sont utilisées, les échanges d'information sont délicats. En dépit de ces difficultés, l'étude revêt un intérêt certain pour les chercheurs agronomes, en contribuant à donner aux agriculteurs des exemples concrets de systèmes de culture respectueux de la ressource en eau, elle permet aux chercheurs de coopérer avec les décideurs tels que l'Agence de l'Eau [Arondel et Girardin, 2000].

2.2 Programmation linéaire

La prise en compte de l'irrigation pose des problèmes particuliers :

1. La plupart des coefficients de la fonction économique représentent les rendements des cultures et sont aléatoires. Souvent l'espérance mathématique des coefficients de la fonction économique est utilisée. Certaines approches ne tiennent pas compte de la variance et covariance et au lieu de maximiser une fonction linéaire : la fonction économique, on minimise une forme quadratique : la variance, en effectuant un

paramétrage sur le niveau de revenu. On arrive ainsi de façon détournée à maximiser le revenu sous réserve que la probabilité de celui-ci soit inférieure à un certain seuil (α).

Soit :

$Maxcx$

avec $Pr oba(cx \prec cx_0) \prec \alpha$

Ces techniques ont été mises au point par Charnes et Cooper [Charnes et Cooper, 1959] et diffusées sous le nom de MOTAD (Minimisation Of the Total Absolute Deviation).

2. De même, des éléments du second membre : les disponibilités en eau sont également aléatoires.
3. Certains coefficients de la matrice correspondante sont aléatoires ; c'est le cas des besoins en eau des cultures. Dans ces deux cas, la prise en compte de la variabilité des coefficients de la matrice et du second membre recourt au même principe que dans le premier cas. Le coût de violation des contraintes est alors intégré dans la fonction économique avec des coefficients appropriés qui font que plus l'agriculteur est averse au risque plus forte est l'espérance de revenu.
4. On peut considérer que toutes les décisions sont prises au même moment, alors que certaines sont liées à l'introduction d'informations complémentaires.

La prise en compte d'informations complémentaires correspond au fait que par exemple l'agriculteur décide de semer sans connaître le climat de l'année et que son irrigation sera adaptée à la pluviométrie.

Les techniques de MultiStage Programming parfois appelé Programmation Linéaire Stochastique donnent cette possibilité au prix d'une augmentation importante de la taille de la matrice mais d'une simplification du processus modélisé : en général, seulement deux décisions séquentielles sont prises en compte.

En nous appuyant sur deux exemples d'application de la programmation linéaire nous examinerons comment ceux-ci ont été utilisés dans le domaine de l'eau.

Les applications liées à la gestion de l'eau utilisant des techniques de programmation linéaire.

- **Le bassin de la Charente**

La région dispose de deux barrages et envisage la création d'un nouveau pour maintenir le niveau d'étiage du fleuve Charente. Cet objectif pourrait être atteint par réduction de la consommation d'eau d'irrigation obtenue par diverses réglementations (tarification, interdiction de prélèvement, attribution de quotas). Le recours à la modélisation a pour but de simuler de nouveaux scénarios et de s'appuyer sur les résultats pour dialoguer et prendre des décisions. Une typologie classique des exploitations en a fourni six types introduits dans le modèle.

La prise en compte des aléas sur les disponibilités en eau a fait appel aux techniques MOTAD et l'objectif modélisé est le suivant :

$$\text{Max } \sum \bar{c}_i * x_i$$

\bar{c}_i : espérance de la marge brute liée à la ième activité
 x_i : la surface

On trouvera l'expression détaillée du modèle dans [Rieu, 1994]

- **La nappe de Beauce**

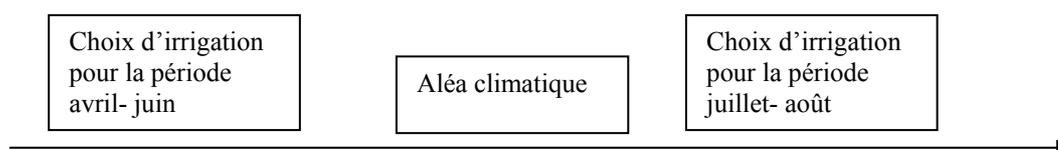
L'irrigation s'est développée de façon importante en Beauce depuis une dizaine d'années. Elle a entraîné une augmentation de la surface en maïs, très exigeant en eau, et le blé est de plus en plus souvent irrigué. Le niveau de la nappe diminue, les rivières sont souvent à sec en été et on assiste à de fréquents conflits entre agriculteurs, habitants des communes et utilisateurs d'aménités souvent originaires de la région parisienne.

La Région et la profession envisagent de réguler la demande d'eau agricole par l'attribution de quotas aux agriculteurs. Des négociations ont déjà permis de les définir de façon très empirique. Mais, pour préciser les conséquences de l'application de ces quotas, une modélisation a été effectuée.

Quatre types d'exploitations sont retenus et le modèle intègre des décisions séquentielles. [Morardet et Hanot, 2000] :

- Les aléas représentés par trois états climatiques (humide, moyen, sec) vont induire une variabilité sur les rendements.
- Chaque état est affecté d'une probabilité objective pour les deux périodes d'irrigation (Printemps, Été).

- Au niveau de sa stratégie d'irrigation, l'agriculteur ⁽¹⁾ choisit à une période fixée (Automne) son assolement en fonction de différents paramètres (surface, volume d'eau disponible...). Ce choix reste ensuite fixe.
- L'agriculteur a un choix à faire lors des deux périodes d'irrigation. Pour la première période, ce choix se fait sans connaître le climat alors qu'en deuxième phase il se fait en fonction du climat selon le schéma suivant :



Le modèle maximise la fonction suivante :

$$\text{Max} \sum_{i,j,k} P_{i,j} \left(P_k * R_{i,j,k} - C_{v,i,j,k} + Pr_k \right) X_k$$

Avec : $P_{i,j}$ probabilité de l'état i, j (climat printemps i * climat été j)

P_k prix de vente de la culture k

$R_{i,j,k}$ rendement de la culture k

$C_{v,i,j,k}$ charges variables de la culture k

Pr_k aide compensatoire de la culture k

X_k surface de la culture k

2.3 Théorie des jeux

Les modèles de théorie des jeux permettent de modéliser les interactions directes (négociation par exemple) ou indirectes. Ces modèles peuvent être utilisés pour simuler l'évolution du milieu en fonction des choix faits par les différents acteurs ou types d'acteurs. Ces modèles permettent d'expliquer une situation concrète ou d'atteindre une solution de compromis entre les acteurs par marchandage ou arbitrage.

Les applications liées à la gestion de l'eau utilisant la théorie des jeux.

Chaque joueur a une fonction d'utilité qui doit présenter un certain nombre de caractéristiques classiques : continuité, dérivabilité, concavité. Les fonctions d'utilité des différents joueurs ne sont pas comparables.

- **Cas du bassin de L'Adour**

L'objectif est plus ambitieux que dans les modèles précédents [Rieu, 1994] [Morardet et Hanot, 2000]. On retrouve le désir de mesurer des conséquences de modifications de la réglementation (tarification, attribution de quotas) mais aussi de prendre en compte le poids politique des différents acteurs : agriculteurs, administration, contribuables et protecteurs de l'environnement.

Ce jeu est une application du modèle de jeu développé par Adams, Rausser et Simon [Thoyer *et al.*, 2001]. On y trouve des joueurs de quatre types :

- a) Trois agriculteurs situés le long du bassin d'étude (l'Adour)
- b) Un joueur «défense de l'environnement »
- c) Un joueur «contribuable »
- d) Un joueur «agence de l'eau »

Chaque joueur a une fonction d'utilité.

Pour évaluer le revenu de l'agriculteur, les auteurs [Thoyer *et al.*, 2001] sont partis d'un programme linéaire de type Charente qui a déterminé le revenu en fonction du prix de l'eau et des quantités d'eau attribuées.

Cette fonction linéaire continue dérivable est la résultante d'une fonction croissante de la quantité d'eau et d'une fonction décroissante du prix de l'eau.

Pour le défenseur de l'environnement sa fonction d'utilité est définie par une fonction croissante de la quantité d'eau disponible dans les rivières.

Pour le contribuable sa fonction d'utilité est une fonction décroissante des investissements hydrauliques.

Chaque joueur a un poids qui représente l'importance politique qu'il est censé avoir.

A chaque tour, le joueur s'il est actif, peut prendre un certain nombre d'actions. Mais son choix diminue avec le temps en fonction des décisions des autres joueurs. Quand une décision a été

prise par un joueur, les autres joueurs déterminent ce qu'ils pourraient décider au tour suivant et calculent leur gain potentiel.

Le jeu informatisé se déroule de façon séquentielle comme suit :

- A chaque tour, un joueur i est tiré au hasard selon son importance (a_j) et décide en fonction de l'ensemble des variables d'optimiser sa fonction d'utilité (U_i).
- Il présente sa décision X aux autres joueurs.
- Ceux-ci calculent alors ce qu'ils pourraient décider compte tenu du nouveau contexte et établissent leur gain potentiel (GP)
- On calcule alors pour l'ensemble des joueurs le gain potentiel de l'ensemble en pondérant le gain potentiel GP de chaque joueur par son importance (qui est, rappelons-le, également la probabilité qu'il soit tiré au tour suivant).

Soit

$$GP_i \equiv \sum_{j=1}^N a_j U_i(X_{t+1}^j)$$

Si ce gain potentiel de l'ensemble est supérieur au gain actuel de l'ensemble, le jeu continu.

Sinon le jeu s'arrête.

Pour éviter une durée infinie, les auteurs ont fixé un nombre maximum de tirages.

Avantages de cette approche

Ce modèle est plus riche que les modèles de Programmation Linéaire vus précédemment [Rieu, 1994] [Morardet et Hanot, 2000].

Il introduit un grand nombre d'acteurs aux intérêts contradictoires. Mais, il repose sur une série d'hypothèses très fortes :

- Détermination de fonction d'utilité par acteur.
- Il est aussi basé sur les techniques de Programmation Linéaire pour servir de base à l'établissement de fonction d'utilité pour les agriculteurs.
- Quantification de l'importance politique.
- Nécessité d'un grand nombre de répétitions pour aboutir à des résultats stables.

Conclusions de ces deux approches basées sur la rationalité complète

Les différents modèles présentés (fondés sur la programmation linéaire [Rieu, 1994] [Morardet et Hanot, 2000] et la théorie des jeux [Thoyer *et al.*, 2001]) ont été utilisés pour fournir une aide aux négociateurs.

La théorie des jeux est un outil analytique extrêmement puissant mais présente certaines limites.

On retrouve dans ces deux approches des hypothèses communes :

- Très peu d'acteurs sont représentés, souvent deux ou trois [Moss, 2001]
- Une hypothèse de rationalité complète des individus (au sens où ils cherchent à maximiser une fonction d'utilité) qui paraît inapte à formaliser des comportements réalistes.
- Une connaissance parfaite de la part des acteurs des solutions possibles et de leurs conséquences.
- La représentation des agents est restreinte par des algorithmes de maximisation qui limitent fortement le nombre d'agents en interaction dans le réseau [Moss, 2001]
- Une hypothèse forte, à savoir l'existence d'un optimum en dehors des acteurs proprement dits.
- Prise en compte d'un seul critère (économique),
- Le processus de communication est considéré mais n'est pas explicite et toujours représenté de façon exogène [Jennings *et al.*, 2000].

Ces différents instruments semblent à même de réguler la demande en eau mais leur élaboration et leur application ne sont pas satisfaisantes :

- Les aléas climatiques font que le volume d'eau attribué devrait être adapté à la condition de chaque année.
- Les interdictions préfectorales entraînent des effets pervers et peuvent remettre en cause l'acceptation du principe des quotas.
- Enfin, la plupart du temps, la détermination des tarifs et quotas résultent d'âpres négociations entre agriculteurs et gestionnaires de l'eau.

Si la plupart des modèles (économiques, intégrés,...) représentent finement les interactions entre le système physique et les usagers, en tenant compte ou non des dimensions spatiales de la ressource, de sa complexité

- Ils négligent les interactions directes entre usagers, hormis celles qui sont liées au marché.

- Ils réduisent souvent le comportement des usagers à la maximisation d'un profit ou d'une utilité.
- Ces techniques ne permettent pas de représenter les liens entre les niveaux micro et macro, elles utilisent des paramètres peu réalistes, trop nombreux et toujours quantitatifs.
- Ils ne peuvent prendre en compte les interactions des individus dans leur environnement local [Feuillette, 2001].

2.4 IRMA : une approche mono-agent

L'objectif de ce simulateur est d'élaborer une démarche pour aider l'agriculteur à raisonner l'organisation de sa campagne d'irrigation, pour l'ensemble de ses cultures irriguées; en cherchant à améliorer la cohérence entre ses objectifs de production, ses capacités d'irrigation (ressource, équipement, disponibilité en main d'œuvre) et ses modes de conduite, compte tenu du contexte pédo-climatique et du contexte économique et réglementaire [Leroy *et al.*, 1996] [Attonaty et Leroy, 1997].

Ce simulateur est décrit par les auteurs [Leroy *et al.*, 1996]. Il est fondé sur : (Figure 28)

- Une description du **contexte d'action**, à savoir, les caractéristiques du périmètre irrigable (surface, parcellaire, types de sol), les ressources disponibles (ressource en eau, débit, main d'œuvre), l'équipement d'irrigation (distribution du débit aux parcelles et matériels d'arrosage), l'assolement ainsi que le contexte climatique et économique.
- Une représentation du **modèle d'action** de l'agriculteur dans des termes proches de ceux de l'action. La structuration de ce modèle s'appuie sur les différents niveaux de gestion identifiés lors de l'analyse des processus de décision des agriculteurs du groupe de travail. Il prend la forme de règles de décisions concernant la conduite de l'irrigation des cultures, la gestion des priorités entre les cultures et l'utilisation de la ressource en eau, de l'équipement et de la main-d'œuvre tout au long d'une campagne d'irrigation. Ces règles mobilisent des indicateurs construits à partir d'informations concernant le calendrier, le climat, l'état des cultures, l'état hydrique du sol, l'état des ressources et l'avancement des travaux.
- Des **modèles d'évolution** de l'état du système et notamment des modèles agronomiques traduisant pour chaque parcelle l'évolution de la culture et de l'état hydrique du sol sous l'effet du climat et des techniques d'irrigations pratiquées. Ces modèles fournissent les informations nécessaires aux indicateurs mobilisés dans les règles. Ces indicateurs doivent être cohérents avec ceux utilisés par l'irriguant.

- Un **moteur** qui simule l'application du modèle d'action sur une gamme variée de scénarios climatiques. Pour chaque scénario climatique, le moteur applique, jour par jour, le modèle d'action pour générer des décisions d'irrigation. Il simule la mise en oeuvre effective de ces décisions dans le respect des contraintes et des conditions d'usage des différentes ressources. Il mobilise les modèles d'évolution du contexte d'action pour faire évoluer l'état du système. Il reproduit alors l'organisation des chantiers et génère des calendriers d'irrigation pour chaque culture.
- Un **évaluateur agronomique et économique** qui, à l'aide de modèles, évalue les conséquences de ces calendriers sur le niveau de satisfaction des besoins en eau des cultures et sur le rendement. La prise en compte des données décrivant le contexte technico-économique (rendements potentiels, prix de vente des produits, coût des inputs et notamment de l'eau) permet alors d'évaluer les conséquences économiques par le calcul de marges.

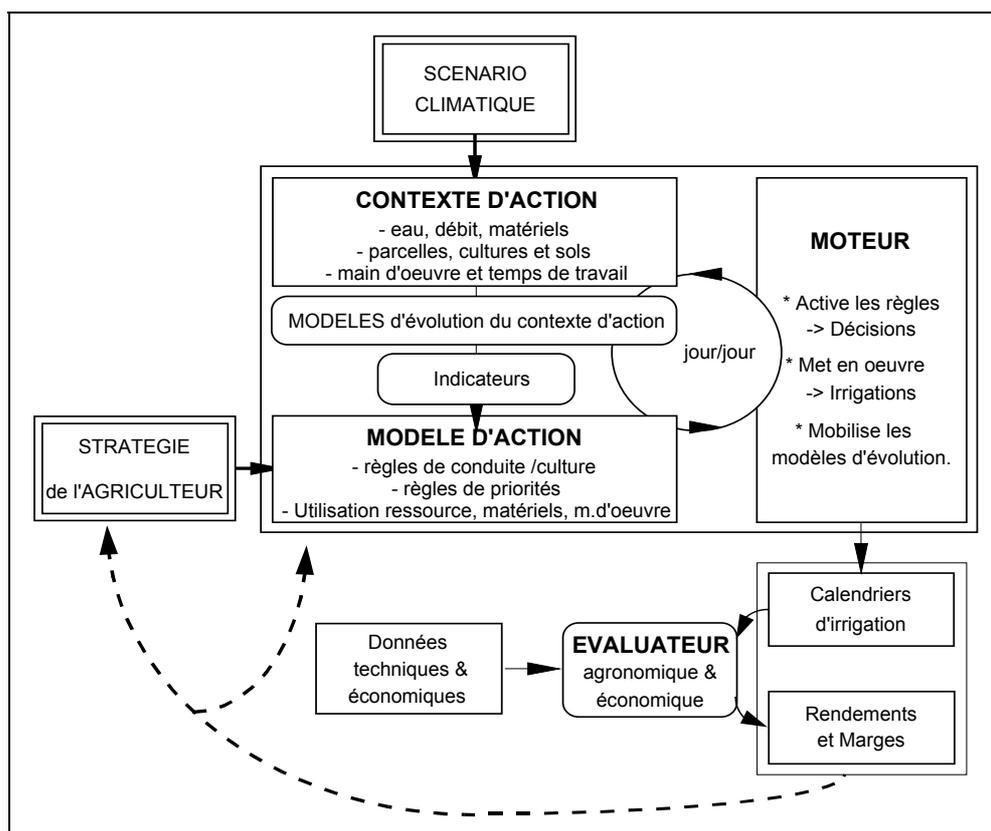


Figure 28 : Principes du Simulateur d'irrigation [Attonaty et Leroy, 1997]

Le modèle d'action prend la forme d'un corps de règles de décisions pour l'ensemble des cultures irriguées. Ces règles sont définies et appliquées au niveau de blocs d'irrigation qui regroupent les positions d'irrigation gérées de façon homogène.

Trois types de règles de décision sont différenciés :

- celles qui gèrent la conduite des irrigations et déterminent les besoins en irrigation ;
- celles qui gèrent les priorités entre les blocs ;
- celles qui gèrent l'utilisation des ressources (ressource en eau, travail, équipements).

La Figure 29 présente la structure du modèle d'action en lien avec le contexte d'action.

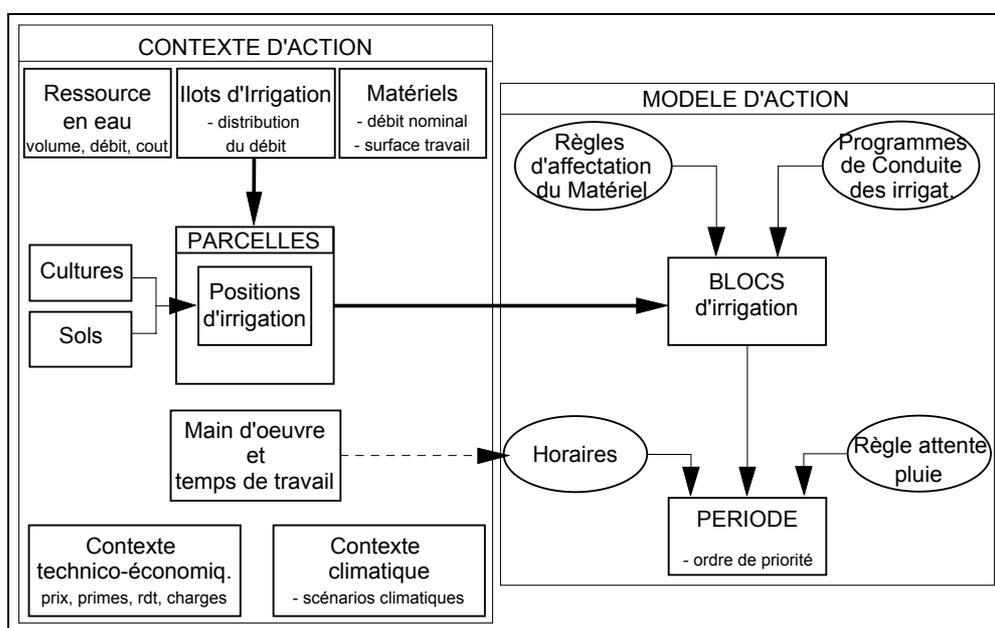


Figure 29 : Les Objets manipulés par le simulateur [Attonaty et Leroy, 1997]

Les résultats obtenus sur plusieurs scénarios climatiques (organisation des calendriers d'irrigation, utilisation des ressources, rendements et marges) permettent de juger la pertinence de la stratégie d'irrigation et des règles de décisions face à l'aléa climatique. Il est alors possible d'envisager des modifications de la stratégie, des règles de décision, de l'assolement, de l'équipement, ... [Attonaty et Leroy, 1997].

Ce simulateur développé dans l'équipe avec laquelle j'ai travaillé nous a servi de base de réflexion pour concevoir un outil de simulation pour la gestion d'une ressource de type eau au niveau d'un collectif.

2.5 Les approches fondées sur les agents

Les systèmes multi-agents sont prometteurs car ils permettent de faire interagir entre eux des agents informatiques autonomes, c'est à dire susceptibles de réagir à leur environnement et dotés de règles d'action qui leur sont propres, tout en respectant le caractère distribué du système.

SIMDELTA

Parmi les travaux concernant l'agro-environnement [Bousquet, 1997] [Fianyo *et al.*, 1997,2001][Treuil, 1998] on retiendra comme exemple le simulateur multi-agent SIMDELTA [Bousquet *et al.*, 1993] [Bousquet, 1994] Il permet de simuler en même temps la dynamique de population des poissons en tenant compte des nombreux facteurs biologiques qui peuvent affecter son évolution et la prise de décision des pêcheurs. Les agents sont de deux types, des bancs de poissons et des pêcheurs. Les poissons ont un comportement plutôt réactif et les pêcheurs se comportent comme des agents cognitifs. Le comportement de chacun des pêcheurs est décrit par un système à base de connaissances composé d'une base de données qui contient ses croyances et sa mémoire, et d'un système de règles qui représente sa stratégie pour exploiter son environnement.

SHADOC (Simulateur Hydro-Agricole Décrivant les modes d'Organisation et de Coordination)

Ce simulateur a été développé par Barreteau [Barreteau, 1998] [Barreteau et Bousquet, 2000] dans l'objectif de compréhension des liens entre modes de coordination et viabilités des systèmes irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal .Comme le décrit Barreteau « *Il s'agit tout d'abord de mettre au point une démarche d'étude des systèmes irrigués et de la mettre en œuvre afin de traiter sa pertinence pour traiter la question des liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués* »

Ainsi que le décrivent [Herimandimby *et al.*, 1998] le SMA sous-jacent à ce modèle repose sur la représentation d'un archétype de système irrigué de la moyenne vallée du Sénégal (modèle d'évaluation du périmètre en fonction des choix des différents acteurs) ainsi que sur la représentation d'un ensemble de paysans structuré en plusieurs groupements (modèle de la dynamique social). Ce modèle a été réalisé en plusieurs étapes alternant modélisation et enquêtes sur le terrain. Les agents informatiques peuvent représenter des paysans ou des

groupements de paysans. La représentation de la population à qui est affecté l'aménagement met en scène des agents paysans selon un modèle à plusieurs niveaux : des agents en interaction, des agents s'échangeant du crédit, des paysans exploitant un périmètre irrigué.

Les paysans sont décrits en particulier par un lien vers une parcelle et un objectif de mise en valeur de cette parcelle [Herimandimby *et al.*, 1998]. Tous les agents, qu'ils représentent des paysans ou des groupements, agissent et communiquent en fonction d'un ensemble de règles qui leur est propre. Ainsi, chaque agent irriguant a des règles de décision concernant les pratiques culturelles, l'accès au crédit, le choix de ses activités (cultiver, faire du commerce, palabrer). Ces règles de décision sont codées directement au cœur du modèle et ne peuvent être modifiées que par le modélisateur. Le simulateur va permettre de simuler un ensemble de règles d'allocation de l'eau et de distribution du crédit. Chacun des scénarios est constitué de paramètres décrivant la structure du périmètre ainsi que les modalités de règles collectives et individuelles utilisées par chaque paysan. [Barreteau et Bousquet, 1999].

Un autre exemple concerne l'irrigation au Pakistan [Rinaudo *et al.*, 1998].

Au Pakistan, l'eau est allouée aux usagers par un système de quotas individuels où chaque agriculteur reçoit la même quantité d'eau par unité de surface irriguée. Or, les agriculteurs ont des systèmes de productions diversifiés et ne valorisent pas l'eau de la même façon.

Le système de quotas mis en place ne tient pas compte de ces différences et ne conduit pas à une utilisation optimale de la ressource (au sens de Pareto⁴).

Compte tenu de la géographie et de la forte croissance démographique, l'utilisation de l'eau commence à être un problème. Les décideurs publics remettent en cause l'allocation de l'eau et souhaiteraient instaurer d'autres règles en prenant exemple sur d'autres pays. Ils souhaitent tout d'abord tester l'apport de nouvelles règles telles que la tarification de l'eau [Rinaudo *et al.*, 1998].

⁴ Pareto définit le concept d'optimum économique de la façon suivante : « *considérons une position quelconque, et supposons qu'on s'en éloigne d'une quantité très petite compatible avec les liaisons. Si en faisant cela, on augmente le bien-être de tous les individus de la collectivité, il est évident que la nouvelle position est plus avantageuse à chacun d'eux. Le bien-être de certains d'entre eux peut d'ailleurs demeurer constant sans que ces conclusions changent. Mais si au contraire, ce petit mouvement fait augmenter le bien-être de certains individus et diminuer celui d'autres, on ne peut plus affirmer qu'il est avantageux à toute la collectivité d'effectuer ce mouvement.* » [Abraham et Thomas, 1966].

Comme le souligne les auteurs [Rinaudo *et al.*, 1998], des travaux ont déjà permis d'estimer les gains d'efficacité économique de ces nouvelles règles. Cependant, ces travaux reposent uniquement sur l'hypothèse de coordination des acteurs par le marché. Or, des études sur le terrain mettent en évidence des processus autres qu'économiques tels que les interactions sociales, politiques, hydrauliques... L'approche Multi-Agent [Barreteau, 1998] [Rinaudo *et al.*, 1998] [Feuillette, 2001] [Fianyo, 2001] a permis de représenter ce système complexe où s'imbrique l'ensemble de ces phénomènes.

SINUSE (Simulateur des Interactions entre Nappe et Usages de l'Eau)

Le modèle SINUSE [Feuillette, 2001] a été construit à partir d'une approche globale du système étudié. Il vise à tenir compte explicitement des comportements socio-économiques réels des exploitants. Ce modèle a pour vocation d'être un outil d'analyse prospective et de dialogue entre des représentants de différentes parties prenantes de la gestion de l'eau d'une nappe. Le cadre d'application concerne la nappe de Kairouan en Tunisie.

Le modèle SINUSE représente des agents autonomes communiquant et agissant dans un environnement distribué et réactif sous la plateforme de simulation CORMAS. Ce modèle comporte trois types d'entités, (i) des entités sociales représentant les exploitants capables d'échanger des messages. Ceux-ci représentent les agriculteurs du terrain. (ii) des entités spatiales, de niveaux d'agrégation différents, comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres collectifs d'irrigation, (iii) des entités passives telles que les puits, qui apparaissent et disparaissent au cours de la simulation (construction ou abandon).

L'hypothèse centrale du modèle considère que la dynamique globale du système provient essentiellement des interactions directes et indirectes entre agriculteurs, à propos de la nappe. Les agriculteurs ont le même objectif; ils cherchent à cultiver en irrigué. Les stratégies déployées pour atteindre cet objectif sont fonction des conditions locales.

Le pas de temps adopté pour la description des interactions entre les différentes entités décrites précédemment est l'année, découpée en deux saisons de culture. Les décisions d'investissement s'opèrent à une échelle interannuelle. Les apports pluviométriques pour chaque type de culture reposent sur la chronologie locale des vingt dernières années. Les différentes simulations sont consacrées à l'évaluation des impacts de certains outils techniques, économiques et

réglementaires. Ce modèle est actuellement utilisé à des fins exploratoires par les chercheurs [Feuillette *et al.*, 2000].

FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents)

Ce projet européen [Barthelemy *et al.*, 2001] est en cours et a pour but de gérer la ressource en eau en combinant des modèles basés agents et des modèles d'évaluation pour décrire les aspects physiques, hydrologiques, sociaux et économiques de la ressource en eau. Les résultats souhaités seront de montrer les conséquences de l'activité d'un agent sur les autres agents et sur l'environnement.

Le modèle agent fondé sur une approche cognitive a été développé par des psychologues sociaux. La structure interne de ses agents est composée de buts et de croyances. Les buts sont des états du monde désiré, par un agent particulier. Ceci définit une hypothèse pour les activités des agents, où les croyances représentent des perspectives particulières de l'agent. L'environnement perçu par chaque agent est incorporé dans le système de croyance personnel. L'agent considéré comme un sous programme est capable de réflexion sur ses propres buts et croyances en les comparant aux changements de l'environnement. Une mise à jour des croyances peut être utilisée pour réactualiser ses propres buts ou pour modifier l'ensemble des hypothèses à travers les agents. Aucune implémentation de ce type d'agent n'est actuellement disponible dans les publications de ce projet.

3 La démarche méthodologique

On rappellera qu'un des objectifs de ma thèse est de fournir aux négociateurs les moyens de tester les conséquences d'une réglementation. Ces négociateurs sont libres alors de modifier cette réglementation, de la tester à nouveau pour aboutir à un compromis acceptable. Les conséquences sont fonction des contraintes agricoles, des différents comportements des acteurs, de leurs décisions et des résultats des négociations menées entre eux.

La construction de l'instrument de simulation s'est faite en deux phases.

- Une première phase : un prototype de simulateur multi-agent est élaboré (intitulé Manga). Il a comme double objectif : d'une part de préciser et formaliser, d'autre part d'instaurer le dialogue avec les acteurs. Il répond à un problème simple : une région avec différents acteurs (agriculteurs, fournisseur(s) d'eau, ...) qui prélèvent de l'eau sur une nappe (stock

limité). Ce modèle s'appuie sur l'expertise de spécialistes (Agronomes, Economistes, Hydrologues, Techniciens agricoles...) que nous avons consultés pour le concevoir.

- Seconde phase : ce premier système a été généralisé pour prendre en compte le processus de planification des acteurs (Système intitulé MangaLère).

Dans la perspective « d'amplifier le raisonnement des décideurs » [Courbon, 1993] nous n'avons pas retenu d'endogénéiser le processus de négociation dans ces deux modèles. En effet il nous paraissait important de laisser la possibilité aux acteurs de conduire eux-mêmes le processus de négociation et d'en gérer la convergence. Ainsi, cet instrument de simulation offre la possibilité de modéliser des règles de confrontation de l'offre et de la demande de façon éventuellement interactive.

Par contre, les objectifs et les critères de ces acteurs ont été pris en compte pour que le modèle leur fournisse des éléments d'appréciations pertinents. Il s'agit alors de représenter pour les agriculteurs les règles de demande en eau et pour le(s) fournisseur(s), la réponse à ces demandes en fonction des règles de gestion des conflits entre les volumes demandés et le volume d'eau disponible. Cette contractualisation entre agriculteurs et fournisseurs d'eau est mise en place en préalable de la campagne d'irrigation, l'influence climatique (donc le volume disponible de la ressource) n'est alors pas connue. L'objectif est de mettre en œuvre ces réglementations et d'évaluer leurs conséquences tant au niveau individuel que collectif selon différents critères : économique, environnemental et éthique.

3.1 Du terrain au modèle

Ce projet a pour origine une Action Scientifique intitulée AQUAE entre le CEMAGREF et l'INRA. Une équipe pluridisciplinaire a été créée permettant de bénéficier des connaissances des économistes, hydrologues, ... [Aqua, 2000]

Les travaux sont conduits dans trois directions.

1) Collecte de données sur le fonctionnement de l'hydrosystème et les comportements des acteurs sur le(s) site(s) choisi(s)

Les documents d'études préalables qui ont servi à l'élaboration du contrat de rivière Aveyron aval ont été récupérés. Ils contiennent des données factuelles sur les caractéristiques physiques de l'hydrosystème, des informations sur les usages ainsi qu'une synthèse des enjeux et des voies

de progrès tels qu'ils ont été identifiés lors d'un atelier de prospective réunissant 70 acteurs intéressés par la gestion du bassin versant (élus, administrations, collectivités, chambres consulaires, association...).

Des divergences et des coalitions d'intérêt apparaissaient déjà quant à la hiérarchie des défis à relever et sur les moyens à mettre en œuvre pour y faire face. Par exemple, des oppositions apparaissent entre d'un côté (i) les collectivités locales, le monde agricole et les services de l'état qui souhaitent résoudre en priorité la question des étiages et mobiliser des ressources provenant des retenus, de l'autre, (ii) des associations de protections de la nature, les consommateurs d'eau potable souhaitent maintenir un niveau d'eau important dans les retenus pour garantir une qualité suffisante.

2) Détermination d'une typologie

Cette typologie a été construite à partir des déclarations individuelles d'assolement fournies par la DDA⁵ sur une zone (La Lère). Ces déclarations individuelles fournissent des informations sur les assolements, les superficies irriguées et les effectifs animaux des exploitations, mais ne contiennent aucune donnée sur les exploitants et leurs familles (âge, succession, main-d'œuvre, autres activités). Une première analyse portant sur 365 exploitations dont 176 irriguantes montre une grande diversité des dimensions, des systèmes de cultures et d'élevage des exploitations, et donc probablement de comportements par rapport à la gestion de l'eau (Figure 30).

Une Analyse Factorielle en Composantes principales (AFC) avec analyse ascendante (figure 30) nous a permis finalement de dégager onze grands groupes d'agriculteurs sur la région (travaux réalisés par l'IAMM⁶, Montpellier) :

- Eleveurs, céréaliers irriguants, arboriculteurs, semenciers, arboriculteurs et plantes aromatiques, activité agricole et travail en ville, maraîchage, maraîchage et élevage, maraîchage et arboriculture, agriculteur qui font que maïs grain, élevage et fourrage.

⁵ Direction Départementale Agricole

⁶ Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

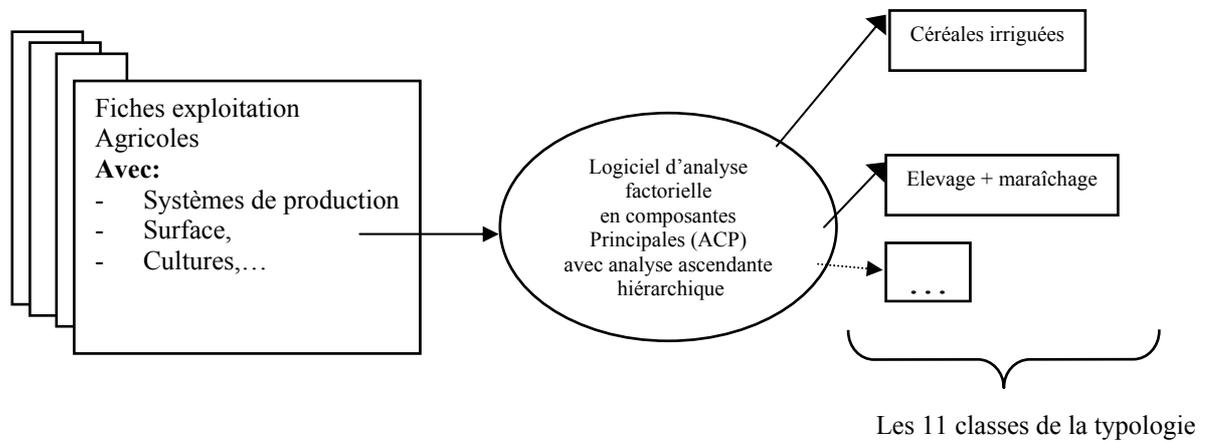


Figure 30 : Typologie d'agriculteurs

3) *Elaboration d'un outil d'aide à la négociation : Une conception interactive*

Les problèmes de décisions concernant des ressources communes et limitées impliquent des acteurs nombreux aux intérêts souvent contradictoires et nécessitent de nombreuses négociations. Dans cette perspective, il nous semble intéressant de concevoir un instrument interactif d'aide à la négociation.

L'objectif d'opérationnalité d'un tel outil passe par une conception avec les utilisateurs potentiels. La perspective de développer un instrument adapté au champ spécifique de la gestion collective de l'eau a animé notre projet et nous a amené à interagir fortement avec des acteurs de terrain.

La méthodologie repose donc sur un processus interactif et incrémental alliant des phases de modélisation et de restitution aux acteurs de terrain.

Un premier prototype (Manga) a été mis au point portant sur des problèmes de gestion de ressource en eau simples. Cette première étape a été suivie de la conception d'un instrument de simulation multi-agent généralisable qui a bénéficié de l'apport de la confrontation à des problèmes concrets de terrain (zone de la Lère) (Figure 31).

Pour construire notre simulateur nous nous sommes alors appuyés sur une analyse commune du problème entre chercheurs et acteurs.

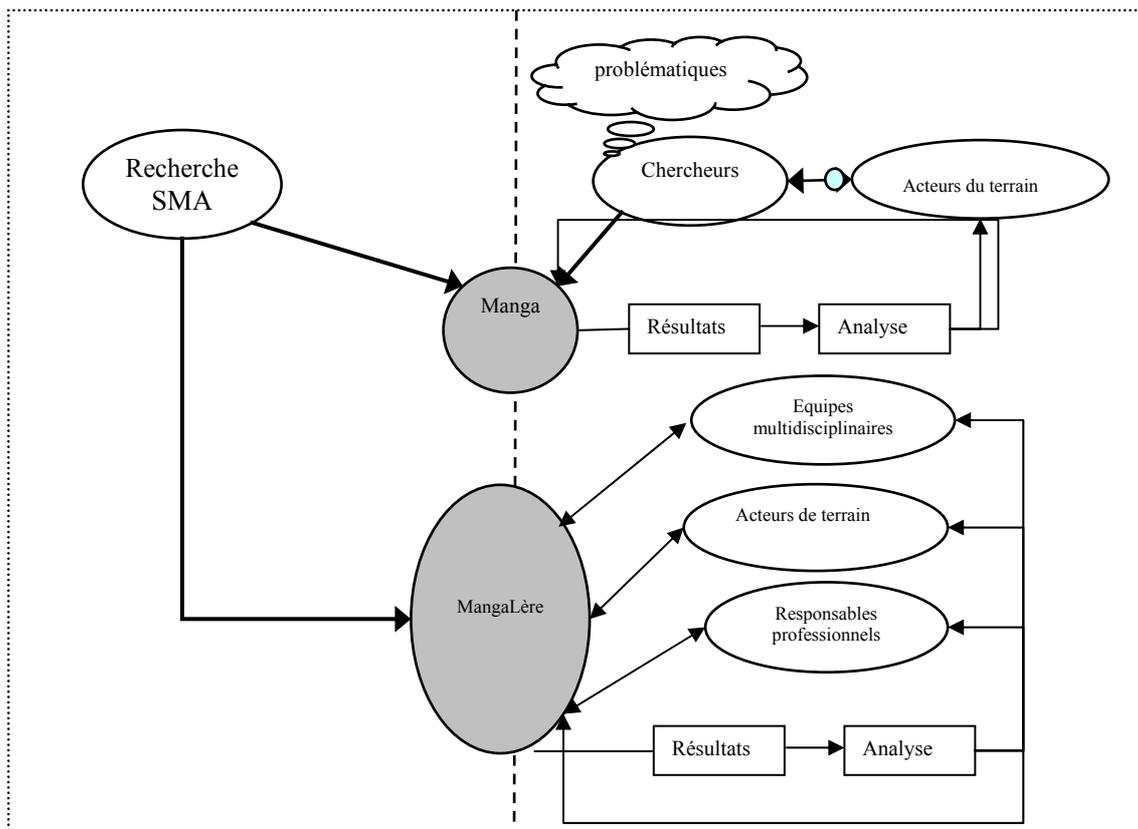


Figure 31 : Du système Manga à MangaLère : deux approches complémentaires dans l'élaboration d'un outil de simulation

3.2 Le système MANGA

3.2.1 Le contexte

Ce premier modèle MANGA (Simulation **M**ulti-**A**gent pour l'aide à la **N**éGociA**T**ion d'un collectif) représente un « *toy problem* » : une région avec différents acteurs (agriculteurs, fournisseur d'eau, ...) qui prélèvent de l'eau sur une nappe (stock limité). Ce modèle n'est pas fondé sur les données réelles que nous avons collectées mais s'appuie sur l'expertise de nombreux spécialistes que nous avons consultés pour établir le modèle puis en discuter les résultats. Tout au long de ce travail nous avons pris en compte le principe « KISS » (*Keep It Simple and Stupid*) d'Axelrod [Axelrod, 1997], reformulé par Conte en « *Keep It Simple As Suitable* » [Conte, 2000].

3.2.2 Objectifs du modèle

D'un point de vue méthodologique

D'une part, avec ce modèle nous avons repéré les acteurs pertinents et leurs relations pour définir des archétypes d'acteurs que l'on retrouvera dans les modèles destinés à l'allocation de l'eau. D'autre part, Manga a permis de tester le comportement du modèle en simulant les conséquences de différentes règles. Cette première approche a abouti à la construction d'une démarche d'utilisation de ce type d'instrument. Une première phase de présentation du modèle aux acteurs concernés a instauré un dialogue avec les décideurs pour aborder ensuite ce problème en vraie grandeur (le système MangaLère).

D'un point de vue informatique

Ce premier modèle (MANGA) permet de construire des classes génériques. De plus, Manga définit les bases d'un instrument de simulation multi-agent plus général (MangaLère) adaptable à des contextes contrastés.

A partir du prototype MANGA, un dialogue a été instauré avec des professionnels pour déterminer les forces et faiblesses du modèle, les acteurs oubliés, les processus omis.

Du point de vue de la mobilisation du modèle

La démarche que nous avons entreprise a été progressive et constituée de plusieurs phases successives. Dans chaque phase, on imagine les conséquences possibles d'une règle testée. Celle-ci peut nous amener à compléter ou à modifier le simulateur Manga (par exemple, comportements des agents, l'adéquation des résultats au problème posé, la lisibilité de ceux-ci par les acteurs,...). En fonction des critères utilisés pour analyser nos résultats et de la faisabilité de la règle d'allocation d'eau testée, on peut être conduit à envisager de nouvelles règles plus ou moins restrictives. (Figure 32)

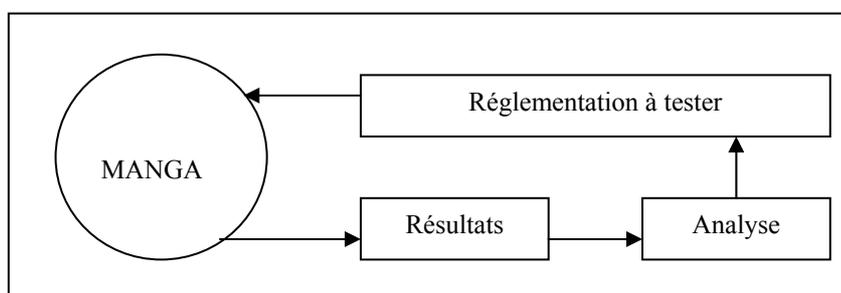


Figure 32 Mobilisation du modèle MANGA

3.3 Le système MangaLère

3.3.1 Le contexte

Le choix du terrain pour ce deuxième système (MangaLère) est celui d'un projet mis en place à l'instigation du Conseil Général du Tarn-et-Garonne (Annexe 1). Les enjeux principaux mis en avant étaient (i) les crues d'automne et de printemps de l'Aveyron, (ii) les besoins en eau croissant d'une agriculture vitale pour le département, (iii) les problèmes de pollution engendrés par les débits d'étiage trop faibles et leurs conséquences sur la faune et la flore aquatique, (iv) la qualité des eaux pour l'alimentation en eau potable.

Un groupe de travail a été constitué. Il rassemble des agriculteurs de la région, des responsables de l'administration, la Chambre d'Agriculture, le fournisseur d'eau (Président de l'ASA), le centre de gestion. Les données collectées et les grandes lignes du modèle sont discutées régulièrement avec ce groupe.

Les acteurs en jeu sur le contrat de rivière

Dans la région de la Lère, les principaux acteurs concernés sont les agriculteurs, les semenciers, les gestionnaires de l'eau, les consommateurs, les associations de protection de la nature, la puissance publique et les industriels (EDF par exemple).

Par la suite on privilégiera deux types d'acteurs, les agriculteurs et les fournisseurs d'eau. Les décisions des autres acteurs seront considérées comme des contraintes pesant sur l'environnement des deux acteurs précédents.

Un certain nombre d'agriculteurs irriguants (500 sur les 700 agriculteurs de la zone) se sont regroupés en Association Syndicale Autorisée (ASA) qui a pour rôle de gérer les ressources en eau. L'ASA a installé un réseau de distribution de l'eau aux agriculteurs et en régule la fourniture.

Ces agriculteurs paient une redevance pour l'eau, celle-ci est composée d'une partie fixe qui est fonction du débit souscrit auprès de l'ASA et d'une partie variable qui est fonction de l'eau consommée.

Il existe des relations contractuelles entre les agriculteurs et l'ASA. Les agriculteurs souscrivent un contrat qui leur permet de disposer d'un volume maximum par hectare pour la campagne d'irrigation. En fonction des conditions de l'année, l'ASA pourra être amenée à restreindre le volume effectivement fourni. Le contrat résulte de négociations entre ces deux types d'acteurs.

Celles-ci reposent pour une grande part sur la connaissance des besoins en eau des différentes cultures pour assurer un rendement maximum.

1) Les agriculteurs

Les agriculteurs cultivent soit des cultures sous contrats (en particulier avec les semenciers), soient des cultures écoulées sur les marchés classiques. En fonction de l'eau attribuée, chaque agriculteur décide de l'attribution de l'eau aux cultures en fonction de ses préférences.

2) L'ASA

L'ASA a deux types de ressources à gérer :

- Un cours d'eau ; la rivière La Lère
- Trois retenues : Gouyre, Tordre et Gagnol.

L'eau est fournie différemment selon le type de la ressource :

- Si la ressource est la rivière, l'eau est distribuée en fonction de son débit instantané, de son Débit Objectif d'Étiage (DOE), de son Débit de CRise (DCR). Lorsque le débit de la rivière est compris entre le DOE et le DCR, un coefficient de restriction est appliqué aux débits individuels. En dessous du DCR, l'irrigation est interdite.
- Pour les retenues le niveau d'eau en début de campagne (généralement avril) détermine les volumes d'eau attribués à chaque agriculteur. Le volume d'eau utilisable pour l'irrigation tient compte des autres fonctions remplies par ces retenues :
 - Le soutien d'étiage,
 - Les activités touristiques,
 - Les contraintes écologiques (nidification par exemple),
 - Des contraintes imposées par l'EDF.
 - Une des trois retenues (Gagnol) est également un réservoir en eau potable et l'ASA peut être amenée, en cours de campagne, à l'alimenter à partir d'une autre retenue (Tordre) si la qualité de l'eau de celle-ci est satisfaisante.
 - Enfin, l'ASA maintient un équilibre entre les niveaux des trois réservoirs et peut être conduite à alimenter un lac à partir d'un autre.

En fonction du volume d'eau disponible et des anticipations (attitude proactive dans le sens où ils anticipent des états futurs de l'environnement pour décider de la conduite à suivre [Ferber, 1995]), l'ASA ou la puissance publique peut décider des restrictions.

3.3.2 Objectifs du modèle

MangaLère a trois objectifs principaux :

- Fournir un instrument de simulation multi-agent dédié à la gestion de la ressource en eau dans des contextes de négociations diversifiés.
- Tester la pertinence du type de support proposé dans des situations concrètes de négociation. On rappellera que le processus de négociation n'est pas endogénéisé afin de laisser la possibilité aux acteurs de conduire eux-mêmes le processus de négociation et de gérer la convergence.
- Tester du point de vue informatique la pertinence d'une architecture d'agents fondée sur les plans (BDI) pour un problème complexe de grande taille combinant plusieurs échelles de temps et susceptible de faire émerger des conflits aussi bien au niveau individuel qu'au niveau collectif.

4 Conclusions

Dans le cadre de ce projet nous souhaitons donc reprendre les bases du modèle Manga mais en cherchant à approfondir le raisonnement des différents agents. Dans le modèle MangaLère, les agents sont basés sur une architecture d'agents BDI (*Belief, Desire, Intention*).

Nous avons choisi l'utilisation d'un formalisme de type BDI (*Belief, Desire, Intention*) pour les raisons invoquées par Rao et Georgeff [Rao et Georgeff, 1995] :

- *L'environnement est imprévisible.* Par exemple, le climat peut changer au cours du temps. Ainsi, les intempéries, les crues ou les sécheresses ne sont pas prédéfinies.
- *Les actions sont multiples,* ce qui permet au système d'exécuter différentes procédures en parallèle. Par exemple, le système peut avoir différentes actions à mener telles que demandes en eau, limitation de la consommation, application d'une réglementation, ...
- *Les objectifs sont divers.* En effet le système peut contenir des agriculteurs de comportements différents correspondant à des objectifs différents par rapport à leur demande en eau: un agriculteur peut avoir comme objectif de pratiquer telle ou telle culture à un temps t , une autre culture à un temps $t+1$. Chaque agriculteur définira en fonction de sa surface irriguée et de son objectif de rendement la quantité d'eau souhaitée.
- *Les objectifs dépendent de l'environnement et non de l'état interne du système.* Par exemple, l'eau attribuée dépend de la quantité d'eau disponible, qui dépend de la pluviométrie de l'année (avant avril).

- *Les agents possèdent une information et une vision partielle de l'environnement.* En effet, initialement chaque agriculteur reçoit une information sur la quantité d'eau qui lui est allouée. Ils ne sont pas au courant de ce que les autres reçoivent. Un des scénarios envisagés est de fournir une partie de l'information à l'ensemble des agents agriculteurs pour observer les conséquences au niveau individuel, au niveau collectif et au niveau environnemental.

De plus, ce formalisme servira comme base de discussion avec les décideurs. Il a en effet l'avantage de fournir une représentation des connaissances concise et synthétique facilement compréhensible et réfutable par les différents acteurs. Il constitue un élément fondamental du dialogue avec eux au niveau de la construction du modèle.

Enfin, nous avons adopté cette architecture car elle évoque bien les concepts de la rationalité limitée [Simon, 1958] et procédurale [Simon, 1982] et offre à ceux-ci un cadre structurant :

Concernant la rationalité limitée : deux aspects sont à souligner : (i) les croyances (comme le terme choisi par le concepteur le suggère) qui peuvent être partielles, incomplètes voire erronées, (ii) la dynamique décisionnelle qui privilégie la poursuite d'un plan engagé pour la recherche permanente d'un optimum économique. En effet, le plan en cours n'est abandonné que si l'agent le décide en fonction de ses croyances. Ceci reprend l'idée du décideur n'ayant, ni les moyens, ni le temps de remettre en cause à tout moment ses décisions.

Concernant la rationalité procédurale : d'une part la structuration sous forme de plans correspond à ses objectifs et d'autre part, le caractère partiellement irrévocable de ces plans répondent bien à sa formulation.

S'agissant de la rationalité complète : cette architecture n'en exclut pas l'usage.

En situation concrète, le contrat initial peut être adapté en cours de campagne, par contre aucune renégociation n'est envisagée. Le niveau de satisfaction de cette demande détermine le rendement effectif et donc la marge brute. Il est plus ou moins bien couvert par le contrat initial souscrit. Ce contrat est initié par un échange de messages entre agriculteurs et fournisseur d'eau. Ces messages se concrétisent par une structure et une ontologie commune à chaque couple de types d'agents (agriculteur et agriculteur, agriculteur et fournisseur d'eau, ...). La structure est caractérisée par un émetteur et un destinataire, un performatif (type d'échange (demande, refus, réponse, redemande, ...)), un contenu qui met en œuvre des phrases bien construites en fonction d'une ontologie commune. Nous avons repris l'ontologie définie par la FIPA en la

contextualisant à notre problème. Adapter le langage de la FIPA (trop général) au problème spécifique posé nous a rapproché au maximum du langage des différents acteurs et permis de simplifier l'interprétation de ses phrases. D'un point de vue informatique classique l'implémentation de ces ontologies passent par l'élaboration de lexiques et de grammaires [Aho *et al.*, 1986] contextualisées, d'interpréteurs ou parseurs et compilateurs.

Deuxième partie

Les systèmes MANGA et MANGALERE

Chapitre 6

Le système MANGA

1 Le modèle MANGA

1.1 *Le modèle statique*

1.1.1 *Les acteurs en jeu*

Les acteurs concernés sont : les agriculteurs, les fournisseurs d'eau, les industriels, la puissance publique, les associations de protections de la nature,... (Tableau 3) Tous ces acteurs ne sont pas modélisés sous forme d'agents. Il en est ainsi de la puissance publique, des associations de protection de la nature. Ils sont toutefois présents sous forme de variables d'environnement fixant des contraintes au système.

Ce sont donc aussi bien des règles de demande et d'allocation de la ressource que des contraintes pesant sur celles-ci qui pourront être expérimentées avec le modèle.

Dans ce modèle, la ressource en accès libre correspond à un stock d'eau de type nappe dont le niveau évolue lentement d'année en année. Cette ressource est gérée par un agent fournisseur d'eau qui la distribue entre l'ensemble des agents agriculteurs en fonction du règlement.

Chaque agriculteur a des données monétaires, un ordre de préférence de cultures, des objectifs à atteindre et une attitude vis-à-vis du risque. Il possède un ensemble de parcelles sur lesquelles il a des cultures irrigables ou non. Chaque année, l'agriculteur décide de son assolement⁷ (composé par l'ensemble de ses parcelles) en fonction de règles agronomiques et de ses préférences de cultures. Cet ordre est fonction du rendement des cultures, et dépend d'une part

⁷ Un assolement est une succession méthodique de cultures pour obtenir du sol les meilleurs rendements possibles sans l'affaiblir.

du risque que prend chaque agriculteur concernant le climat de l'année (inconnu lorsqu'il prend sa décision d'assolement), des besoins en eau des cultures et d'autre part de paramètres plus subjectifs. Il peut ensuite négocier ou non avec le fournisseur d'eau la quantité d'eau dont il a besoin. A la fin de l'année, l'agriculteur calcule ses résultats économiques et en fonction de ceux-ci prend une décision quant à l'augmentation ou non de son matériel d'irrigation.

Le fournisseur d'eau dispose d'une certaine quantité d'eau pour l'année qu'il peut allouer aux différents agriculteurs.

Le centre de gestion (ou Centre d'information) collecte l'ensemble des résultats économiques des agriculteurs et fournit un rapport global à chaque agriculteur. En fonction de ce rapport, chaque agriculteur pourra modifier ses stratégies notamment l'ordre de préférence des cultures.

Caractéristiques	MANGA
Ressource en accès libre	Stock d'eau
Type d'acteurs concernés	Agriculteurs Fournisseur d'eau la puissance publique Association protection de la nature (APN)
Type d'acteurs modélisés	Agriculteurs Fournisseur d'eau fournisseur d'information
Structure d'agents utilisés	Réactif Cognitif
les agents modélisés	
Cognitifs	Agriculteurs Fournisseur d'eau
Réactifs	Climat Cultures Fournisseur d'information
Simulation	Discrète 4 périodes
Plateforme utilisée	Aucune
Implémentation	C++ Builder

Tableau 3 : Caractéristiques générales de MANGA

1.1.2 Le système multi-agent Manga

Nous utiliserons le formalisme VOYELLES décrit par Demazeau [Demazeau, 1995] pour modéliser le système Manga.

1.1.2.1 Les Agents (A)

Dans le modèle, les différents agents modélisés sont :

- Soit cognitifs : agents Agriculteurs, agent Fournisseur d'eau
- Soit réactifs : agent Climat, agents Cultures, agent Collecteur ou distributeur d'informations (Centre de gestion).
- **Les agents cognitifs**

De manière générale, les agents⁸ cognitifs (*Agriculteurs* et *Fournisseur d'eau*) comportent plusieurs modules (Figure 33) :

- 1) **Des connaissances** de soi et des autres.
- 2) **Un module de décision** permettant à l'agent de choisir entre différentes **stratégies** correspondant à un ensemble de règles permettant aux agents d'atteindre leurs buts.
- 3) **Un module de communication** entre les différents agents (envoi de messages).
- 4) **Une mémoire** des échanges avec les autres Agriculteurs et le Fournisseur d'eau.

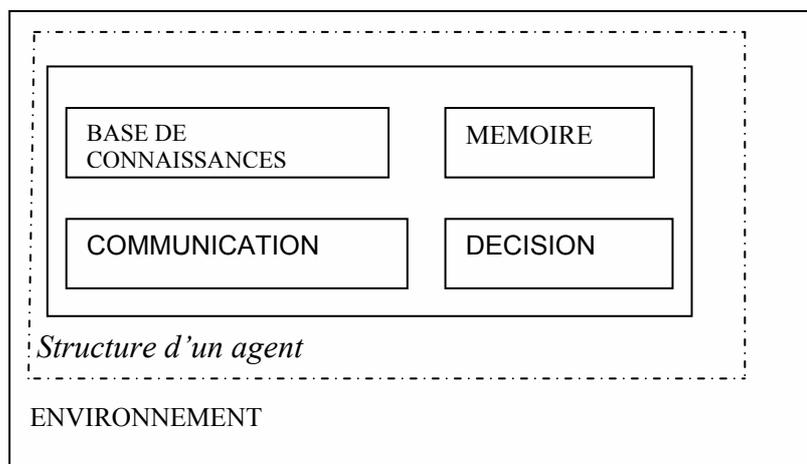


Figure 33: Structure d'un agent cognitif dans le modèle MANGA

1. Les connaissances :

Elles se décomposent en trois parties :

- **Une base de données** qui correspond aux éléments propres à chaque agent.

⁸ Par la suite nous n'emploierons pas le terme d'agent pour définir agents Agriculteurs, agent Fournisseur d'eau, agent Climat, agent Centre de gestion mais simplement Agriculteurs, Climat...

- **Une base de procédures de calculs** qui correspond aux différentes actions effectuées par chaque agent. Dans l'état actuel du modèle, ce sont le plus souvent des fonctions simples.
- **Une base de procédures décisionnelles constituée d'un ensemble de règles.**

Les règles de décision ont la forme suivante :

Si <Condition>

Alors <Décision>

Ces règles sont bâties à dire d'expert comme dans les systèmes experts traditionnels. Les conditions sont appariées aux données issues de la base de données de l'agent ou aux messages reçus. Les règles sont spécifiques à chaque agent.

2. La stratégie :

Chaque agent a des objectifs à long terme et des attitudes variables vis-à-vis du risque.

La stratégie comporte deux ensembles de règles :

- Les règles qui déterminent les informations à prendre en compte pour décider des actions à entreprendre pour une ou plusieurs années. Par exemple :

Règle d'allocation de l'eau en fonction de la surface en maïs irrigué

« Pour chaque agriculteur

Si Σ quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée = quantité eau demandée

Sinon

Coeff = EauDisponible / Σ SurfaceMaïs

*quantité eau allouée = SurfaceMaïs * Coeff »*

- Les règles fixant la manière de négocier qui peuvent être également modifiées dans le temps.

3. La communication entre les différents agents :

Chaque agent cognitif dispose d'une boîte aux lettres où il peut recevoir des messages. Ce module sera décrit plus loin car il n'est pas spécifique à un type d'agents mais correspond à l'interaction entre eux.

4. La mémoire :

Lors de l'envoi d'un message (Demande d'eau ou Accord d'eau), chacun des agents (Agriculteurs et Fournisseur d'Eau) garde une photocopie- historique du message et de la négociation.

Par ce mécanisme il est possible pour un Agriculteur de connaître la quantité d'eau qu'il a demandée à un moment (t-1) de la négociation avant d'effectuer ou non une nouvelle demande.

Pour le Fournisseur d'eau, l'historique de chacune de ses réponses permet de suivre et de comparer la quantité d'eau attribuée par Agriculteur lors de la négociation ou sur l'ensemble des Agriculteurs en fin de négociation.

- Les agents réactifs

De manière générale, la structure des agents réactifs est décrite dans la Figure 34. D'une part, les données sont propres à chaque agent comme pour les agents cognitifs, d'autre part, les procédures permettent des calculs ou un tirage aléatoire. Par exemple l'agent Culture utilise en fonction des données climatiques la fonction qui lui permettra de calculer le rendement.



Figure 34: Structure d'un agent réactif dans le modèle MANGA.

1.1.2.2 L'Environnement (E)

L'environnement contient les objets et l'ensemble des agents modélisés. Les agents sont capables d'agir sur cet environnement à partir des entrées sensorielles qu'ils reçoivent de ce même environnement. Ainsi, l'agent Climat, une fois déterminé va permettre à l'agent Culture d'utiliser la méthode permettant de calculer le rendement en fonction de l'année climatique (Figure 38, Figure 44). Ce rendement permettra aux agents Agriculteurs de calculer leurs résultats économiques.

1.1.2.3 Les Interactions (I)

Une interaction « est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproque. Les interactions s'expriment ainsi à partir d'une série d'actions dont les conséquences exercent en retour une influence sur le comportement futur des agents » [Ferber, 1995]. Suivant Demazeau [Demazeau, 1995] les interactions concernent les

infrastructures, les langages ([Searle, 1969]) et les protocoles d'interactions entre les agents (Figure 35). Elles sont inspirées de la théorie des actes de langage. Le terme d'interaction est alors utilisé à la place du terme communication car il inclut en plus la représentation des connaissances [El Fallah Seghrouchni *et al.*, 1998, 2001].

Dans notre système (i), les agents ont **des buts non concurrents**. Par exemple, la satisfaction d'un agent agriculteur qui obtient une grande quantité d'eau, entraîne l'insatisfaction d'autres agents agriculteurs. (ii) **Les ressources peuvent être insuffisantes**, ce qui conduit à des conflits entre agents. (iii) Chaque agent peut accomplir seul sa tâche pour aboutir à son but fixé.

- *La communication entre agents*

Dans notre modèle la syntaxe des messages échangés entre les agents Agriculteurs et l'agent Fournisseur d'eau s'inspire de Demazeau [Demazeau, 1995] (Figure 35):

<Communication>		
<From>	: agent émetteur Type agent émetteur	} Expéditeur du message Agriculteur, Fournisseur Eau
<To>	: agent récepteur Type agent récepteur	
<Id>	: identifiant du message : n° Agriculteur irriguant, date	
<Mode>	: Asynchrone	
<Multi-Agents>		
<Type>	: Demande ou Réponse	
<Nature>	: choix, action	

<Application>

Contenu

<Interaction>	:: = <Communication> <Représentation de la connaissance>
<Communication>	:: = <from> <to> <id> <via> <mode>
<Représentation de la connaissance>	:: = <Multi-agents> <Application>
<Multi-agents>	:: = <type> <nature> <force> <protocole> <position>
<Application>	:: = description des caractéristiques du domaine considéré

Figure 35: Modélisation de la communication [Demazeau, 1995]

- *Le protocole de négociation*

Dans notre modèle, on distingue un grand nombre d'agents : des agents qui effectuent une demande et un agent qui partage la ressource en fonction des disponibilités et de la réglementation testée. Chaque agent qui effectue une demande a son propre objectif à atteindre. Ces agents peuvent être coopératifs ou non avec les autres agents situés dans l'environnement dans le sens où chacun peut informer ou non les autres. L'agent décideur a pour rôle de partager au mieux la ressource en tenant compte de l'ensemble des demandes des agents. Cet agent décideur reçoit toutes les informations provenant de l'ensemble des agents. Il peut, par exemple, faire une proposition en tenant compte du comportement des agents qui font une demande. Ainsi, l'agent décideur possède une vision centralisée pour résoudre les conflits d'usage de la ressource

1.1.2.4 L'Organisation (O)

Une structure organisationnelle est définie (i) par un ensemble de classes d'agents caractérisés par les rôles affectés aux agents, (ii) par l'ensemble des relations abstraites existant entre ces rôles. La notion de niveau d'organisation permet de comprendre l'emboîtement d'un niveau dans un autre. L'organisation structure les agents en groupes, hiérarchies et relations. Dans Manga, les familles d'agents fonctionnent de manière individuelle. (Figure 36))

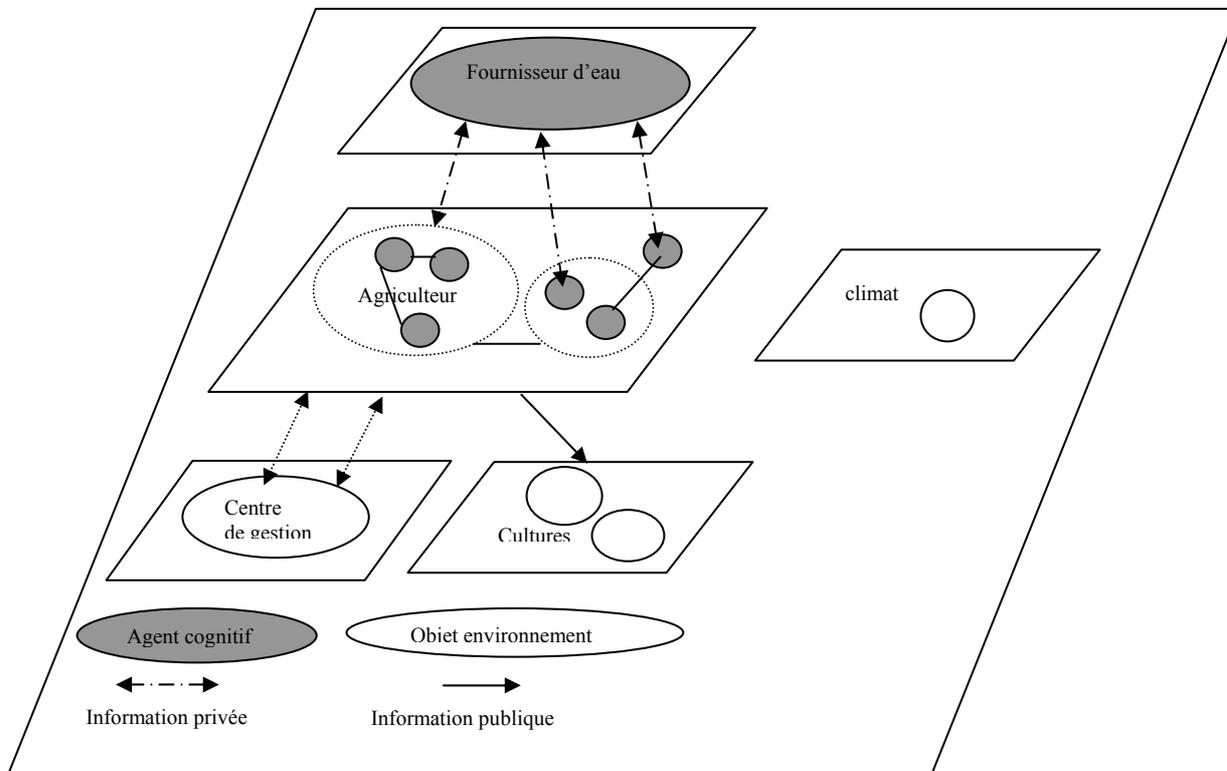


Figure 36 : Schéma général de l'organisation du système MANGA

1.1.3 Représentation UML

Le diagramme UML (Figure 37) représente les classes qui sont implémentées dans le système Manga. On distingue cinq classes principales : *La classe Agent*, *la classe Agriculteur*, *la classe Fournisseur d'eau*, *la classe Culture*, *la classe Climat*.

Ces différentes classes d'agents héritent d'une classe de base, la *classe Agent* qui est définie par (Annexe 2.1):

- Un type (Agriculteur ou Fournisseur d'eau)
- Le numéro dans le type considéré.
- La boîte aux lettres contenant l'historique des messages reçus. Cet historique permettra, par exemple, aux agents Agriculteurs de faire une demande en eau en ayant en mémoire la demande précédente et l'eau accordée par l'agent Fournisseur d'eau.
- Une liste constituant l'historique des messages envoyés.

La *Classe Agriculteur* est définie (Annexe 2.3) par: Un type (Céréaliier, maïsiculteur.) ; il est irriguant ou non ; il possède un nombre de parcelles, une surface totale.

Différentes méthodes importantes pour la demande en eau lui sont spécifiques (Annexe 2.3)

La *Classe Fournisseur d'eau* contient tous les éléments concernant l'eau à attribuer et les méthodes correspondantes (Annexe 2.4).

Chacune de ces deux classes précédemment définies possède une Boîte aux lettres. C'est une liste de pointeurs sur des objets de type Message (*Classe Message*). Chaque message est composé d'une origine (expéditeur), d'une date, d'un contenu et un seul (Demande d'eau ou Réponse en eau) (Annexe 2.2). Selon l'information à transmettre, ce contenu est différent. On a donc défini différentes classes adaptées à chaque contenu. Ces classes comportent les méthodes appropriées pour les écrire et les lire.

Chaque agent dispose en outre d'une méthode de mémorisation des messages qu'il a envoyés. Il dispose également d'une méthode lui permettant d'effectuer une réponse. Par exemple, un protocole possible pour le Fournisseur d'eau est celui «de l'attribution de l'eau en fonction de la surface en maïs irriguée».

La classe Culture (Annexe 2.5) contient les éléments de type rendement minimal et maximal d'une culture en fonction des quantités d'eau apportées. Une méthode spécifique permet de calculer le rendement de chaque culture en fonction de l'eau disponible.

La classe Climat (Annexe 2.6) permet de définir de façon aléatoire, pour chaque année de la simulation, le type d'année (humide, sèche, très sèche).

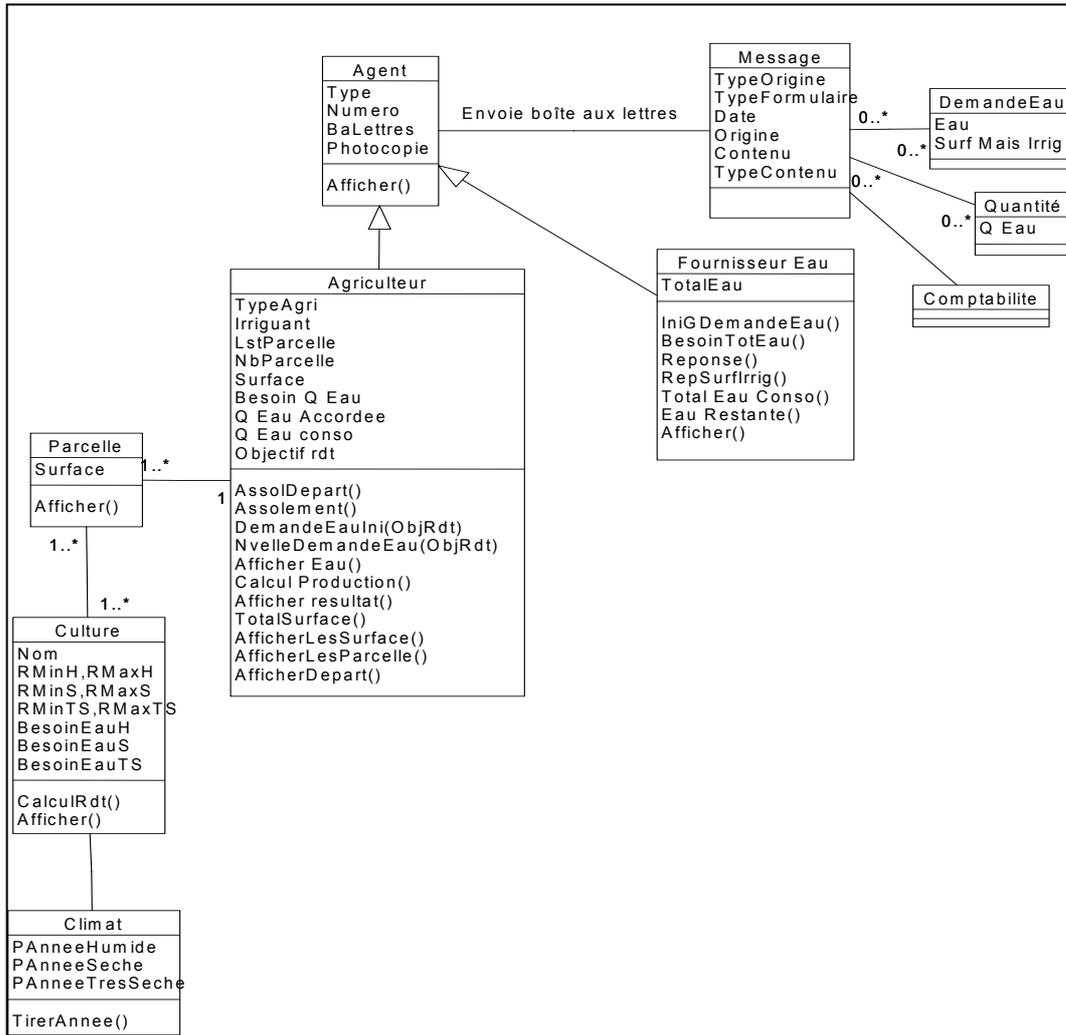


Figure 37: Modélisation UML simplifiée des différentes classes et objets

2 Les agents dans le système

2.1 Les agents cognitifs du modèle

2.1.1 Les agents Agriculteurs

Comme nous l'avons défini précédemment chaque agent agriculteur possède des connaissances et des stratégies.

1. Les connaissances :

Il est possible de décomposer les connaissances des Agriculteurs en trois parties (Tableau 4) :

1.1. Un ensemble de données :

Chaque Agriculteur, irriguant ou non, au début de la simulation (avant tout processus de négociation) est caractérisé par un ensemble de données :

- *La surface* : Il a une surface cultivable composée de n parcelles. Chaque parcelle a une culture.
- *La rotation* : Il est céréalier (rotation Maïs-Blé) ou maïsiculteur (rotation Maïs-Maïs-Blé), ce qui détermine pour l'ensemble la succession des cultures sur chaque parcelle et permet de définir l'affectation initiale des cultures aux parcelles.
- *L'assolement* : en début d'année, chaque agent décide l'ensemble de ses cultures pour chacune de ses parcelles.

1.2. Une base de procédures de calcul :

Les différentes procédures de calcul sont liées aux types de cultures :

- Calcul de la surface totale :
- Pour l'année t de la simulation, l'Agriculteur calcule la surface totale de chaque culture d'après la culture de chaque parcelle, irriguée ou non.
- Après la négociation, le climat de l'année étant déterminé, la culture utilise la méthode pour calculer le rendement en fonction de la quantité d'eau utilisée. A partir de ce rendement et de l'ensemble des cultures, chaque Agriculteur calcule ses résultats économiques.

1.3. Une base de procédures décisionnelles :

Pour l'Agriculteur les conditions sont définies d'après son assolement de départ et selon les règles de succession de cultures.

Assolement de départ : L'Agriculteur a une surface. Cette surface est tirée de façon aléatoire selon une loi uniforme, entre les surfaces minimales et maximales définies par l'utilisateur au niveau de l'interface (Annexe 1). La surface de l'Agriculteur est composée de n parcelles. Pour chaque parcelle, la culture pratiquée l'année initiale tient compte de la rotation pratiquée par l'agriculteur : Maïs- Blé ou Maïs-Maïs-Blé. La décision principale pour chaque Agriculteur est son *choix d'irriguer telle ou telle parcelle*. En effet, de ce choix dépendra le besoin d'eau. L'Agriculteur peut choisir le nombre de parcelles qu'il souhaite irriguer.

Suite aux phases de négociation, l'eau utilisable sera égale à l'eau accordée par le Fournisseur d'eau.

Agents Cognitifs	MANGA
Un agent agriculteur est défini par:	
<u>Une base de données</u>	
Surface	aléatoire
Parcelles	nombre fixé par l'utilisateur
Rotation de cultures	Peut évoluer dans le temps
<u>procédures de calcul</u>	
	Besoin en eau
	Demande en eau initiale
	coût augmentation surface irriguée
<u>procédures décisionnelles</u>	
	affectation culture parcelles en fonction de :
	<i>règles agronomiques</i>
	<i>ordre de préférences de cultures</i>

Tableau 4 : Les données et procédures décisionnelles et de calcul des agents agriculteurs

2. Les stratégies :

Ses stratégies sont différentes selon la période de l'année.

On distingue deux types de décision d'une part l'*assolement de l'année et le choix des cultures irriguées* qui entraînent une négociation pour disposer d'eau, d'autre part, *une décision stratégique en fin d'année* qui concerne l'augmentation de la surface irriguée en fonction de ses résultats économiques.

Ses décisions se décomposent comme suit :

En début d'année :

L'assolement de base de l'année est déterminé tout d'abord par des règles agronomiques en fonction du type de rotation de l'Agriculteur. Mais il pourra être plus ou moins modifié par l'Agriculteur en fonction de ses résultats ou de nouvelles informations.

Les besoins en eau de l'Agriculteur sont déterminés par son objectif de rendement et son attitude vis-à-vis du risque. L'Agriculteur connaît la courbe de réponse à l'eau des cultures mais ignore le climat de l'année. Aussi doit-il calculer sa demande en eau en prenant des risques contradictoires. On distingue différents comportements d'Agriculteurs : il formule sa demande

en eau en fonction de ses besoins en prenant une année de référence (Humide, sèche ou très sèche) et pour assurer sa sécurité augmente ou non cette quantité souhaitée.

Ainsi, s'il se base sur l'année humide pour fixer ses besoins en eau, sa demande sera faible et il a la chance que sa demande soit accordée. Mais en cas d'année sèche ou très sèche il n'aura pas assez d'eau pour irriguer.

Au contraire, s'il se base sur une année très sèche sa demande sera forte et il court le risque de voir sa demande refusée. Mais si elle est accordée alors il atteindra ses objectifs.

On pourrait tenir le même raisonnement sur la fixation de l'objectif. A objectif élevé, risque de voir sa demande refusée mais fort rendement en cas d'acceptation. A objectif faible, chance de voir sa demande accordée mais obtention d'un faible rendement.

Après avoir reçu la réponse à sa demande en eau et si cette réponse ne le satisfait pas, il formule une nouvelle demande. Mais il court à ce moment le risque que toute l'eau ait été distribuée à la phase précédente de négociation. Plusieurs méthodes sont envisagées :

- Il modifie son assolement en remplaçant du maïs par du blé
- Il diminue sa demande sans modifier l'assolement
- Il diminue son objectif de rendement
- Il change d'année de référence (humide, sèche, très sèche)

Ces différentes méthodes sont affectées de façon aléatoire à chaque Agriculteur.

En fin d'année : décision d'investissement sur irrigation :

Le choix de chaque Agriculteur d'augmenter ou non sa surface irriguée dépend de deux facteurs : (i) de ses propres résultats économiques, (ii) des résultats économiques des autres Agriculteurs connus par l'intermédiaire du Centre de Gestion.

Deux grandes familles de décideurs sont introduites :

i. Le copieur :

Il regarde les résultats des autres et prend les mêmes décisions que ceux qui ont eu les meilleurs résultats. Il court alors le risque de voir ses demandes en eau insatisfaites.

ii. Le calculateur :

La décision stratégique du « calculateur » d'augmenter sa surface irriguée dépendra :

- De ses disponibilités financières.

- Du coût de l'hectare irrigué (matériel d'irrigation...)

$$\text{Avec Coût} = \text{Investissement /Ha} * \text{Surface Parcelle}$$

- De l'espérance d'augmenter son revenu à l'hectare. Cette variation de revenu à l'hectare est définie comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta \text{Revenu} = & [(Rdt \text{ Maïs} I_H - Rdt \text{ Maïs} S_H) * \text{Proba } H \\ & + (Rdt \text{ Maïs} I_S - Rdt \text{ Maïs} S_S) * \text{Proba } S \\ & + (Rdt \text{ Maïs} I_{TS} - Rdt \text{ Maïs} S_{TS}) * \text{Proba } TS] \\ & * \text{prix Maïs} \\ & + (\text{Prime/Ha irrigué} - \text{Prime/Ha Sec}) \\ & - [(Eau consommée_H * \text{Proba } H) + (Eau consommée_S * \text{Proba } S) \\ & + (Eau consommée_{TS} * \text{Proba } TS)] * \text{Prix de l'eau} \end{aligned}$$

Avec :

Proba H, Proba S, Proba TS : la probabilité d'avoir une année humide, sèche ou très sèche.

Rdt Maïs_{I_H}, Rdt Maïs_{I_S}, Rdt Maïs_{I_{TS}} : rendement en maïs irrigué selon les trois types d'années.

Rdt Maïs_{S_H}, Rdt Maïs_{S_S}, Rdt Maïs_{S_{TS}} : rendement en maïs selon les trois types d'années.

- Des règles de décisions variables selon les Agriculteurs :

R1 :	Si les investissements sont couverts en moyenne sur x années alors Augmenter la surface Irriguée
-------------	---

R2 :	Si les investissements sont couverts sur x années sèches alors Augmenter la surface Irriguée
-------------	---

R3 :	Si la probabilité de couvrir les investissements en x années > α (α un certain seuil) alors Augmenter la surface Irriguée
-------------	---

R4 :	Si la probabilité de faire faillite < α alors Augmenter la surface Irriguée
-------------	---

Ces règles correspondent aux règles classiques de décision en situation de risque [Hardaker *et al.*, 1997].

2.1.2 L'agent Fournisseur d'eau :

Le Fournisseur d'eau a pour rôle la distribution de l'eau disponible aux agriculteurs en tenant compte des réserves à faire pour les autres usages et notamment les problèmes environnementaux. Ses particularités semblent être une des conditions importantes pour la gestion maîtrisée de l'eau.

Sa base de connaissances se décompose principalement en trois éléments (Tableau 5) :

1. Un ensemble de données :

Ces données sont la quantité d'eau distribuable pour l'année ou en fonction de chaque phase de négociation, (i) l'eau demandée par Agriculteur, (ii) l'eau attribuée à chaque Agriculteur ou encore (iii) l'eau totale attribuée et (iv) l'eau encore disponible qui, en fin de campagne, c'est-à-dire en fin d'année, correspond à l'eau non utilisée.

2. Une base de procédures de calcul :

Deux ensembles de procédures de calcul sont utilisés :

L'une permet d'accorder des quantités d'eau aux agriculteurs et permet de calculer (i) la quantité totale attribuée, (ii) la quantité attribuée à un agriculteur en fonction de la règle utilisée, (iii) la quantité d'eau restant à attribuer.

L'autre permet en fin d'année de calculer (i) l'eau non utilisée à partir de la quantité d'eau effectivement non consommée par les agriculteurs en raison du climat de l'année et de la quantité d'eau attribuée, (ii) les résultats économiques en fonction du montant de l'eau facturée et de la consommation effective.

3. Une base de procédures décisionnelles :

Cette base contient les différentes règles testées par les utilisateurs du modèle Manga. Ces règles sont de la forme :

Si (condition) remplie alors allocation eau demandée

Sinon refus allocation eau demandée

Cette base contient un ensemble de règles testées dans différentes simulations, par exemple :

R5 : En fonction de la surface en maïs irriguée

« Pour chaque agriculteur

Si Σ quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée = quantité eau demandée

Sinon

Coeff = EauDisponible / Σ SurfaceMaïs

quantité eau allouée = SurfaceMaïs * Coeff »

R6 : Au prorata de la demande en eau

« Pour chaque agriculteur

Si Σ quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée = quantité eau demandée

Sinon

Coeff = EauDisponible / Σ DemandeEau

quantité eau allouée = DemandeEau * Coeff »

R7 : En fonction de la surface d'exploitation

« Pour chaque agriculteur

Si quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée = quantité eau demandée

Sinon

Coeff = EauDisponible / Σ SurfaceExploitation

quantité eau allouée = SurfaceExploitation * Coeff »

R8 : En fonction des surfaces en maïs irrigué en favorisant les petits irrigants

« Pour chaque agriculteur

Si Σ quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée = quantité eau demandée

Sinon

SurfaceMax) Pour l'ensemble des exploitations Déterminer (SurfaceMin, SurfaceMoyenne,

// Pc=Pourcentage

// Tests faits avec PcMax=0.120 et PcMin =0.80

// Calculer surface corrigée pour chaque agriculteur

SurfaceCorrigee = SurfaceAgri(1 + [(SurfaceMoyenne - SurfaceAgri) / (SurfaceMax - SurfaceMin)] * (PcMax - PcMin))

Coeff = EauDisponible / Σ SurfaceCorrigee

quantité eau allouée = SurfaceCorrigee * Coeff »

R9 : En fonction de la quantité d'eau attribuée l'année précédente

« Pour chaque agriculteur qui ont reçu eau année précédente

Calcul Total eau attribuée l'année

Si total eau attribuée l'année précédente < quantité d'eau disponible

Alors quantité eau allouée= quantité eau attribuée année précédente

Sinon Attribution eau au prorata de la quantité disponible année en cours

Si eau restante année précédente=0 alors Fin

Si eau restante année précédente ≠ 0

Si (agriculteur=ancienIrrigant)

Demande supplémentaire=Demande année précédente- Eau attribuée année précédente

Total Demande Eau supplémentaire

Si Total Demande Eau supplémentaire < eau restante année précédente

Si (agriculteur=ancienIrrigant)

Alors eau attribuée= Attribution eau année précédente+ Demande Eau supplémentaire

Sinon Ratio(Total Demande Eau supplémentaire, eau restante année précédente)

Si (agriculteur=ancienIrrigant)

Alors eau attribuée= Attribution eau année précédente+ Demande Eau supplémentaire*Ratio

Sinon eau attribuée=Demande eau année en cours * Ratio »

R10 : En fonction du volume prélevable pour chaque irriguant (Formule page 104)

« Pour chaque agriculteur

Si quantité d'eau demandée < quantité d'eau disponible

Alors chaque agriculteur peut utiliser la quantité d'eau demandée

Sinon quantité eau allouée = $\alpha [20\ 000 + \beta(300*SAU + \text{volume à l'hectare négocié} * \text{surface})]$

»

un agent Fournisseur d'eau est défini par:**Une base de données**

quantité eau disponible nombre fixé par l'utilisateur

procédures de calcul

quantité eau totale consommée

quantité eau accordée /agriculteur

quantité eau restante

procédures décisionnelles

règle d'allocation d'eau Au prorata de la demande en eau

Au prorata de la surface irriguée

En faveur des petits agriculteurs

Tableau 5 : La base de connaissances de l'agent fournisseur d'eau

2.2. Les agents réactifs

2.2.1. L'agent culture

Pour chaque culture on détermine :

1. **Un ensemble de données** telles que, par exemple, la prime à l'hectare ou les charges à l'hectare
2. **Des procédures de calcul** telles que la loi déterminant le rendement en fonction de l'eau allouée et du type d'année. Des modèles de culture ont été mis au point par les agronomes. Ils sont complexes et requièrent un grand nombre de données. Pour le moment, nous nous contentons d'un modèle linéaire. Pour chaque type d'année, le rendement est une fonction croissante de la quantité d'eau apportée jusqu'à un maximum. La Figure 38 représente les fonctions utilisées qui ont eu l'aval des agronomes.

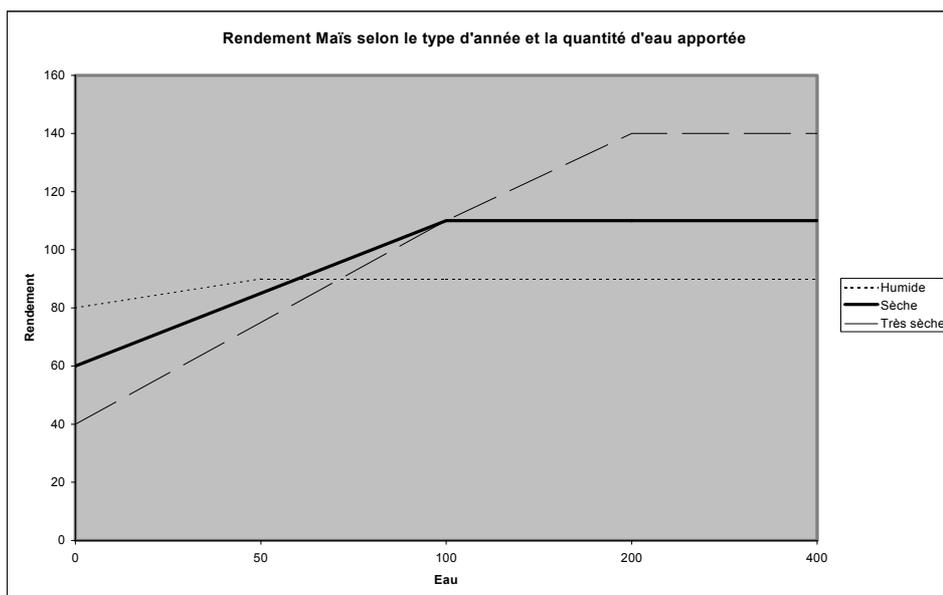


Figure 38: Courbes de réponse à l'eau des cultures

Agents Réactifs	MANGA
un agent Culture est défini par:	
Une base de données	
rendement Min en fonction du Climat	Quantité fixée par l'utilisateur
rendement Max en fonction du Climat	Quantité fixée par l'utilisateur

Tableau 6 : Les données de l'agent réactif Culture

2.2.2. L'agent Climat

Le climat joue un rôle important dans ce modèle car il régule les quantités d'eau utilisées chaque année et le rendement des cultures. Il est défini par (Tableau 7) :

1. **Un ensemble de données** où l'on distingue par exemple trois types d'années avec des fréquences (P) : Humide (P_H), Sèche (P_S), Très sèche (P_{TS})
2. **Une procédure de calcul** : le climat est tiré de façon aléatoire pour chaque année de simulation. Toutefois, l'utilisateur peut modifier le climat d'une ou plusieurs années, pour examiner, par exemple, les conséquences de la succession de trois années très sèches.

Agents Réactifs	MANGA
Un agent Climat est défini par:	
Une base de données	
Types d'années	aléatoire
% année humide	Fréquence fixée par l'utilisateur
% année sèche	Fréquence fixée par l'utilisateur
% année très sèche	Fréquence fixée par l'utilisateur

Tableau 7 : Les données de l'agent réactif Climat

2.2.3. L'agent Centre d'information

Sa fonction est de faire la synthèse des résultats de chaque agriculteur et de la mettre à la disposition de l'ensemble des Agriculteurs.

Le centre d'information reçoit des informations de chaque Agriculteur telles que, le type d'Agriculteur (maïsiculteur ou céréalier), sa surface, son assolement, sa surface irriguée, le rendement des cultures en sec et en irriguées, l'eau consommée ou encore ses résultats économiques.

Le Centre de Gestion traite ces informations pour chaque Agriculteur. Il classe les exploitations en trois groupes par résultat décroissant. Cette information est visible par l'ensemble des Agriculteurs.

3. Protocole de négociation entre agents

Les agents ont chacun des stratégies et des objectifs à atteindre. Pour cela, il est nécessaire qu'il y ait des échanges avec les autres agents pour obtenir une partie de la ressource désirée. On a dans ce processus deux types d'agents, d'une part celui qui émet une demande (agent A) et d'autre part, celui qui a rôle de décideur pour l'allocation de la ressource (agent D). Cette

négociation se déroule en plusieurs phases indépendantes du temps de la simulation (figure 39). La figure 40 explicite plus en détail les transitions possibles de l'état de négociation entre l'agent qui émet une demande (A) et de l'agent décideur (D).

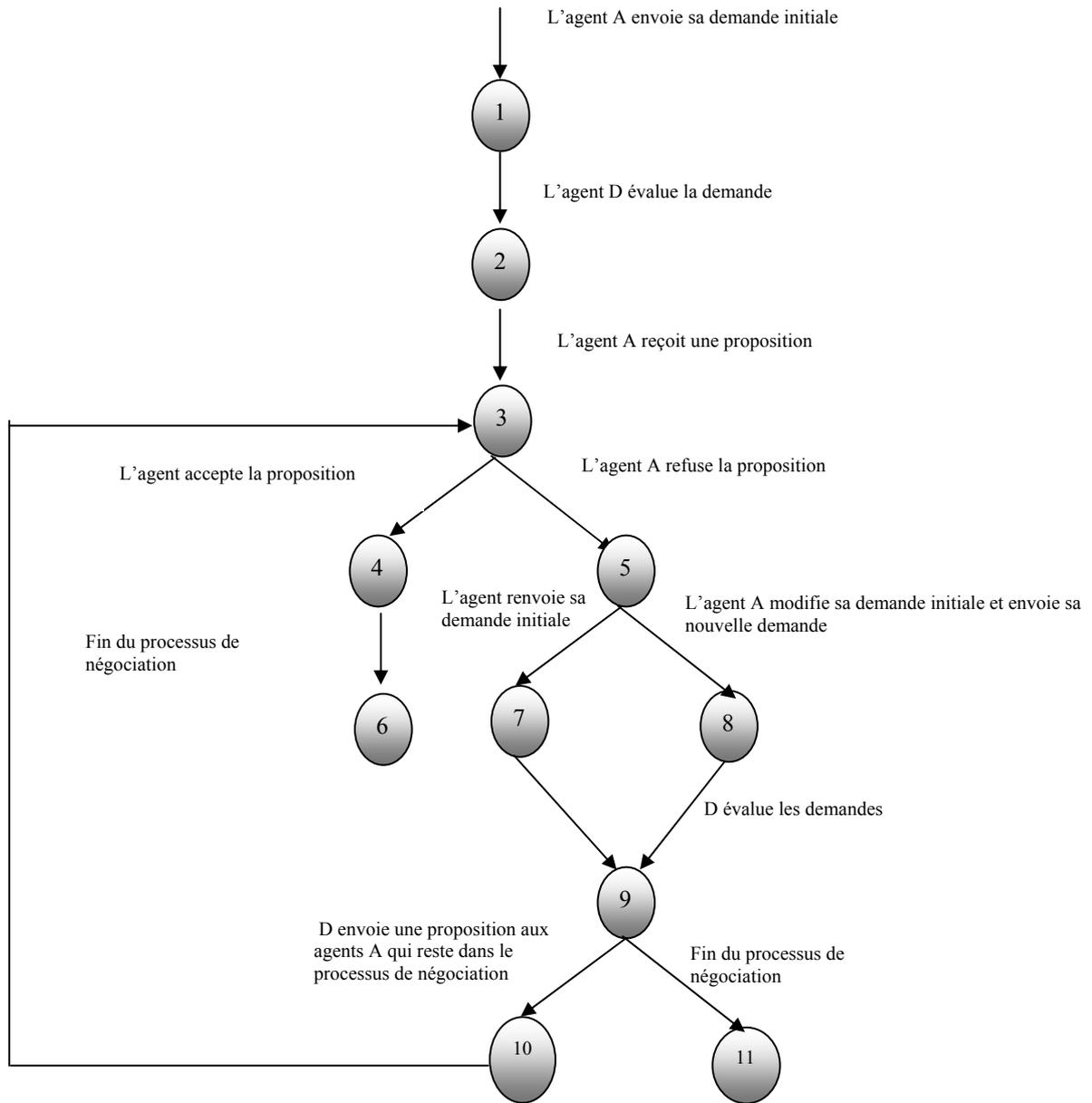


Figure 39 : Graphe de transition des états de la négociation

Lorsque l'agent A envoie sa demande à l'agent décideur (D) (état 1, Figure 39), celui-ci calcule le total des demandes et évalue en fonction de la quantité totale disponible ce qu'il peut

attribuer à chaque agent qui fait une demande d'allocation de la ressource (état 2). Chaque agent A reçoit une proposition qu'il compare à sa demande initiale (état 3). Cet agent A répond au message de l'agent décideur D. Deux solutions sont possibles, soit l'agent A accepte la proposition (état 4), soit il la refuse (état 5). Si l'agent A accepte la proposition, celui-ci se retire du processus de négociation (état 6). Dans le cas contraire, l'agent A peut soit renvoyer la même demande que celle faite initialement (état 7), soit formuler une nouvelle demande (état 8). L'agent décideur (D) réévalue l'ensemble des demandes (état 9) et envoie une proposition à chaque agent qui reste dans le processus de négociation (état 10). Le processus se termine lorsqu'il n'y a plus de demande ou lorsque la ressource n'est plus disponible (état 11).

- **Exemple d'application (annexe 2.7)**

Pour comprendre mieux ce processus, nous allons décrire les messages échangés lors des phases de négociation entre les Agriculteurs et le Fournisseur d'eau :

Le diagramme suivant (Figure 40) représente la conversation entre les Agriculteurs et le Fournisseur d'eau lors de la demande d'attribution d'eau.

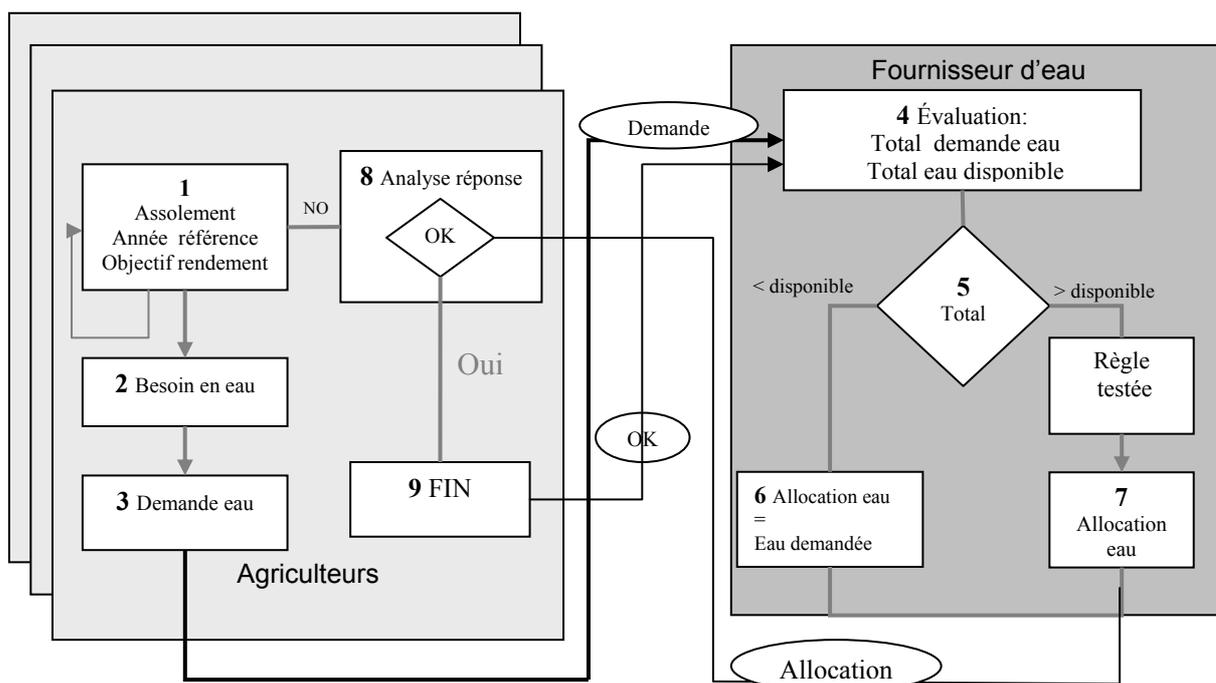


Figure 40: Les différentes phases de la négociation entre les agents Agriculteurs et l'agent Fournisseur d'eau.

Sur cette figure (Figure 40), les cercles représentent les messages échangés, les rectangles représentent des procédures internes à chaque agent.

Pour faire mieux comprendre ce processus de négociation, nous allons en décrire les différentes phases (les différents numéros renvoient à la Figure 40):

Pour l'agent Agriculteur :

- **Formulation de la demande d'eau initiale**

Chaque Agriculteur détermine

1. *Les caractéristiques de son assolement, l'année de référence et l'objectif de rendement (1)*
2. *Le calcul de son besoin d'eau (2) :*

R11 :

Si Objectif de rendement \geq Rdt max. maïs

Alors Besoin eau = Besoin eau max. * min. (Surface totale maïs, Surface irrigable)

Sinon

Besoin Eau = ((Objectif Rdt – Rdt min) / (Rdt max. – Rdt min)) * besoin eau max * min (Surface totale maïs, Surface irrigable)

3. Envoi de la demande d'eau (3)

Photocopie (historique) de la demande d'eau (mémoire de la négociation)

Attente de la réponse

Lecture réponse **(8)**

Lecture de la photocopie de la demande d'eau

- **Formulation éventuelle d'une nouvelle demande d'eau**

Accord ou désaccord selon la quantité d'eau attribuée

R12 :

Si Quantité proposée \geq Quantité demandée * 0.9

Alors

Acceptation eau proposée

Envoi message pour dire son accord **(9)**

Sinon

L'Agriculteur modifie son objectif de rendement ou son assolement **(1)**

Nouvelle demande d'eau **(3)**

Attente de la réponse

Pour l'agent Fournisseur d'eau :

- **Phase initiale :**

- a) Lecture des messages dans sa boîte aux lettres **(4)**

b) Calcule de la demande totale en eau (5)

c)

R13 :

Si l'ensemble des demandes < Quantité eau disponible (6)

Alors Donner accord

Sinon Proposer Quantité d'eau (7)

d) La réponse dans ce dernier cas est alors selon la règle testée (définie page 139):

- En fonction de la surface en maïs irriguée.
 - En fonction de la quantité d'eau obtenue l'année précédente.
 - En fonction de la surface d'exploitation.
 - En fonction du volume prélevable pour chaque irriguant
 - Au prorata des demandes
- e) Photocopie (historique) des réponses
- **Phases suivantes :**
 - a) Lecture des accords des Agriculteurs (4)
 - b) Calcul de l'eau attribuable en retirant l'eau déjà attribuée et acceptée par les Agriculteurs (5)
 - c) Lecture des nouvelles demandes d'eau
 - d) Réponses faites comme à la phase initiale
 - **Fin de la négociation :**

R14 :

Si plus de nouvelles demandes ou phase de négociation > Nombre de phasesX

Alors Fin

Si plus d'eau disponible

Alors Fin

La procédure de réponse du Fournisseur d'eau est déterminée par l'utilisateur du modèle. Ceci permet d'en montrer les conséquences, ce qui est l'objectif du modèle. Une question se pose pour l'avenir : savoir si les agriculteurs connaissent la méthode utilisée par le Fournisseur d'eau pour formuler une demande ou s'ils sont capables de la découvrir et d'adapter leurs procédures de demande.

3. Construction interactive des règles de décision

L'objectif de ce modèle est d'aider les décideurs à déterminer la règle de répartition de l'eau la plus satisfaisante possible. Pour cela, avant toute utilisation du modèle par les utilisateurs potentiels, des phases de tests sont réalisées par les modélisateurs : (Figure 41) :

- **Une première étape** : définir principalement (i) un ensemble d'Agriculteurs avec leurs caractéristiques (Tableau 8) (ii) des données agronomiques concernant les cultures (leur courbe de réponse à l'eau), (ii) une série de règles de répartition qui seront testées et analysées.

INPUT		
Effectif total agriculteurs		Définition utilisateur
Nombre d'irrigants		
Surface exploitation		
Nombre de parcelles par exploitation		
Nombre de parcelles irriguées		
Typologie		
	Non irriguants	Rotation Maïs Blé Définition utilisateur
		Rotation Maïs-Maïs-Blé Définition utilisateur
	Irriguants	Rotation Maïs Blé Définition utilisateur
		Rotation Maïs-Maïs-Blé Définition utilisateur
Comportements		
	% Gourmands	Définition utilisateur
	% Raisonables	Définition utilisateur

Tableau 8 Input pour les agents Agriculteurs

- **Une seconde phase** : simuler les données (effectifs, typologie, comportements,...) directement par Manga.
- **Une troisième phase** : analyser, par les modélisateurs, les résultats de la simulation. Pour ce faire, nous définissons plusieurs critères :
- *Les résultats sont ils facilement compréhensibles* : autrement dit est-il possible de les expliquer aux décideurs en langage naturel. Ainsi, une simulation faite donnait des résultats systématiquement meilleurs en année très sèche. L'explication tenait au fait que compte tenu du nombre de parcelles, cela entraînait, avec des successions de cultures de type Maïs-Maïs-Blé une surface importante une année sur trois. Il y avait donc un problème de données à envisager, à savoir que le nombre de parcelles devait être un multiple de six.

- *Les résultats sont-ils acceptables.* Si des baisses de rendement importantes ou des inégalités importantes apparaissent entre les agents agriculteurs alors nous pensons que ces résultats ne seront pas acceptés par les décideurs, car ils ne sont pas satisfaisants d'un point de vue éthique.
- *Les résultats peuvent-ils être expérimentés sur le terrain, c'est-à-dire sont-ils faisables.* Si les conditions de mise en œuvre sont trop contraignantes, nous pensons alors que la réglementation n'est pas utilisable.

Ces différentes analyses peuvent amener à de simples modifications des paramètres du modèle (comportements, nombre de parcelles, surface irriguée,...) ou à des réécritures partielles des règles d'allocation d'eau.

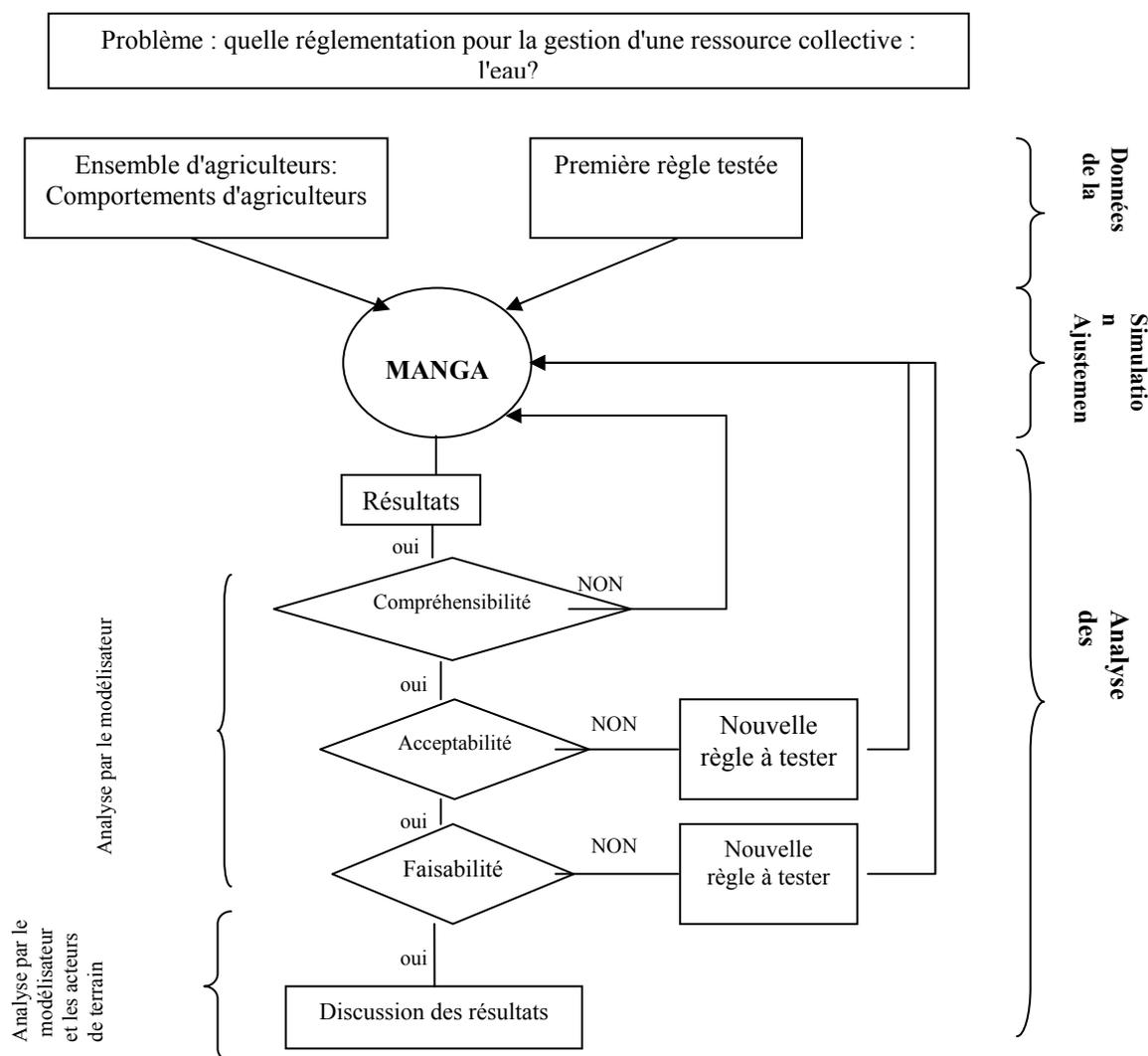


Figure 41 : De la simulation à l'analyse des résultats

3.1. Données de la simulation

Au départ, avant toute simulation, l'utilisateur définit :

- La population d'Agriculteurs, leur nombre en valeur, les rotations suivies, les comportements, les irriguants en pourcentage, les surfaces minimales et maximales (Tableau 9). Ces données font partie de la base de connaissances de l'agent Agriculteur (Figure 33).
- Les fonctions de réponse à l'eau des cultures selon les types d'années,
- les fréquences des types d'années climatiques,
- les quantités disponibles par an,
- la règle d'attribution de l'eau à tester. La création de nouvelles règles suppose une écriture informatique appropriée. La structuration du programme a déjà permis d'augmenter sans problème le nombre de règles disponibles.
- Le nombre d'années de simulation.

Agents Cognitifs	MANGA
INPUTS	
Agents agriculteurs: (groupe de n agents agriculteurs) .	
effectif	
Nombre d'irrigants sur la zone	
Surface exploitation	
Surface irriguée	
Typologie	
Non irriguants	Rotation Maïs Blé
	Rotation Maïs-Maïs-Blé
Irriguants	Rotation Maïs Blé
	Rotation Maïs-Maïs-Blé
Comportements	
% Gourmands	
% Raisonables	
agent fournisseur d'eau	
Règles d'allocation d'eau	
Quantité eau disponible	

Tableau 9: Base de données d'un agent Agriculteurs et d'un agent Fournisseur d'eau en début de simulation

3.2. Les interfaces utilisateurs

Nous avons défini quatre interfaces différentes pour permettre à l'utilisateur de fournir les données au système (Figure 42):

- Les caractéristiques d'un agriculteur (Figure 42, (1)),
- Les caractéristiques d'une culture (Figure 42, (2)),
- Les règles à tester ainsi que la quantité d'eau disponible pour l'agent Fournisseur d'eau pour l'ensemble des années simulées (Figure 42, (3)),
- Les caractéristiques du climat pour l'ensemble des années simulées (Figure 42, (4)).

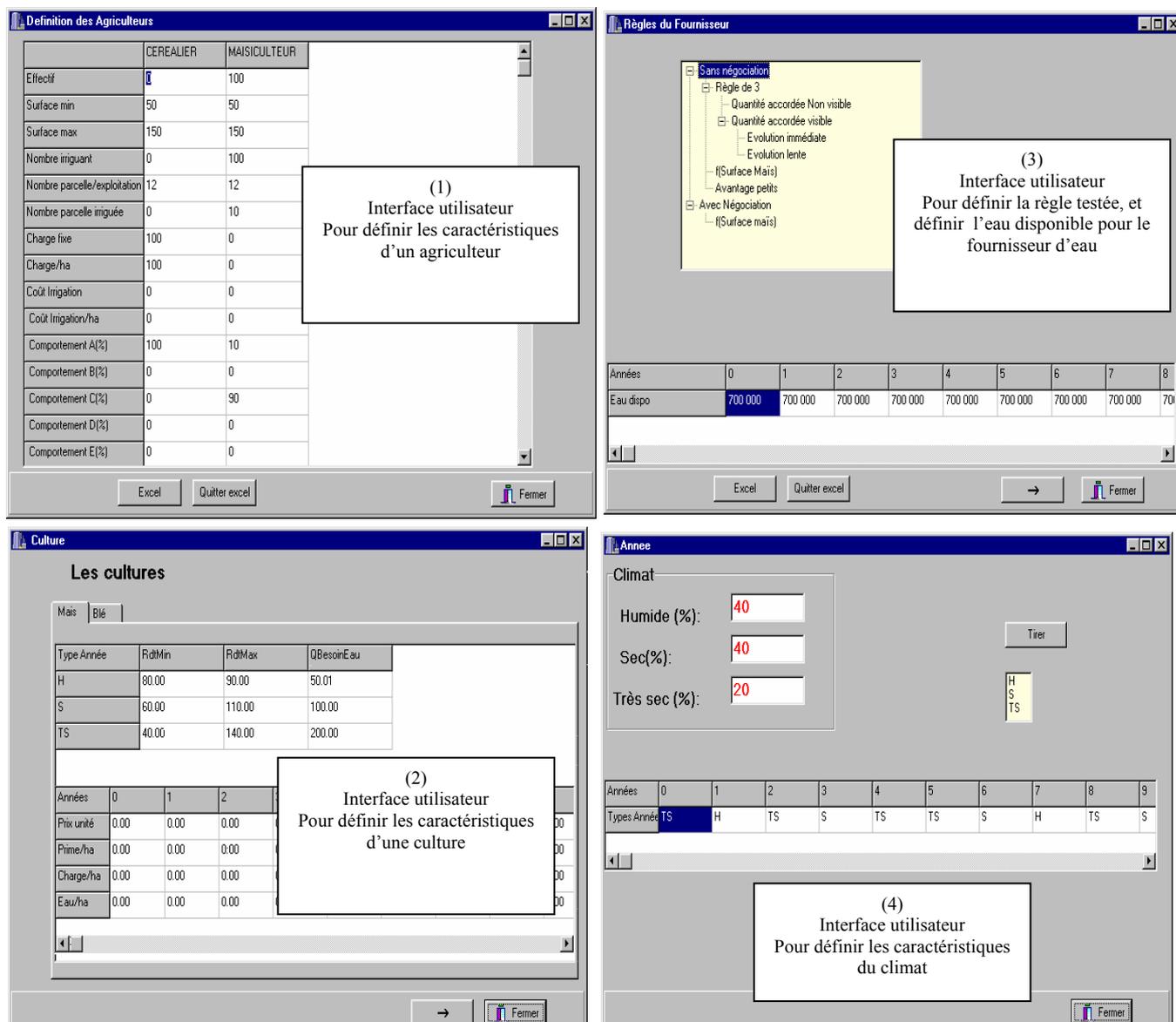


Figure 42 : Interfaces utilisateurs qui permettent de fournir les données générales concernant l'ensemble des agents en début de simulation.

3.3. La simulation

Les premières simulations effectuées avec le prototype mettent en scène :

- Une population d'Agriculteurs ayant des comportements différents vis-à-vis du risque. Cela se traduit dans le choix des années de référence qu'ils prennent pour calculer leur demande en eau auprès du fournisseur.
- Un fournisseur d'eau qui mobilise des règles d'arbitrage pour répondre à chacune des demandes formulées par les agriculteurs, compte tenu des disponibilités initiales de la ressource.

Cette expérimentation sur modèle a consisté à comparer différentes règles d'attribution plus ou moins aveugles (un extrême étant une attribution au prorata de la demande) : les règles R5 à R10 définies page 132. Cette comparaison s'est appuyée sur différents points de vue : économique (marges individuelles et collectives), éthique (critères de disparités entre les différents Agriculteurs), environnemental (eaux attribuée, restante, consommée) [Le Bars et Attonaty, 2001^{a, b}].

La simulation dans MANGA se déroule sur plusieurs années. De manière générale, le système évolue selon la demande en eau et l'eau disponible déterminée par le climat de l'année.

Chaque année se décompose en plusieurs phases (Figure 43) :

Une phase initiale :

Une phase initiale détermine la séquence des types d'années climatiques, la population initiale d'Agriculteurs (surface, type d'assolement, irriguant / non irriguant) (Figure 42). En début d'année, les agriculteurs décident de leur assolement sans connaître le climat de l'année.

Une phase de négociation :

- Les agents Agriculteurs déterminent en fonction de leur assolement et de leur comportement, la quantité initiale d'eau d'irrigation à négocier auprès du Fournisseur d'eau sans connaître, à l'évidence, le climat à venir. Ils envoient cette demande au Fournisseur d'eau.
- L'agent Fournisseur d'eau récapitule l'ensemble des demandes et les traite de façon égalitaire (fonction pseudo parallèle) et propose par message à chaque Agriculteur un volume d'eau. Si l'ensemble des demandes est inférieur à sa capacité à fournir, la

négociation s'arrête. Dans le cas contraire, les propositions du Fournisseur d'eau sont fonction de la règle d'allocation d'eau testée. Pour une simulation une seule règle est appliquée. Elle est définie par l'utilisateur du modèle (Figure 42), ce qui peut amener les Agriculteurs à accepter ou refuser cette proposition. Le processus s'arrête quand toute l'eau a été attribuée ou lorsqu'il n'y a plus de nouvelles demandes de la part des Agriculteurs.

Une phase de jeu de la nature :

- Le climat est tiré au hasard.
- Les agents cultures déterminent la méthode à utiliser pour calculer les rendements en fonction du climat et de l'eau apportée. Cette méthode est rendue visible pour l'ensemble des agents, ce qui permet à chaque Agriculteur de calculer son rendement.

Une phase de synthèse des résultats :

En fin de campagne, les Agriculteurs récoltent leurs cultures et établissent leur revenu de l'année. (i) Les rendements des cultures sont fonction du climat de l'année et de l'eau apportée. (ii) Les informations concernant cultures, rendement, consommation d'eau et résultats économiques sont collectées par le centre de gestion qui fait alors la synthèse et la renvoie à chaque Agriculteur. (iii) Chaque Agriculteur peut alors modifier l'ordre de préférence de ses cultures et décider d'augmenter ou non sa surface irrigable.

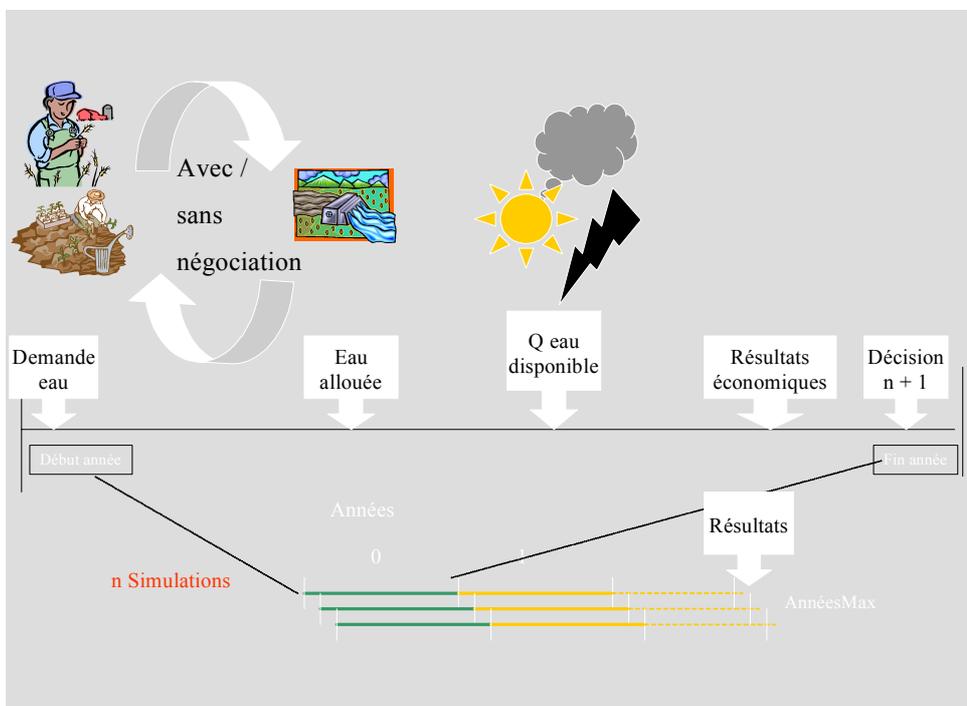


Figure 43 : Les différentes phases dans le modèle Manga

3.4. Les messages échangés entre agents

Lors des simulations un ensemble de messages sont échangés entre les différents agents, principalement entre les agents agriculteurs et l'agent Fournisseur d'eau (Figure 44). Deux types de communication coexistent dans le modèle, l'une publique, l'autre privée.

- La communication publique : certains agents (eg Climat, Cultures) ont des données visibles de tout autre agent qui peut les utiliser à sa guise, par exemple le climat de l'année, la méthode à utiliser pour calculer les rendements,...
- La communication privée : elle est fondée sur le principe de messages envoyés par l'expéditeur au destinataire. Ce message a un contenu. Les méthodes pour lire ce contenu sont publiques. Bien évidemment la méthode pour la traiter est privée. Un exemple de communication privée (Agriculteurs-Fournisseur d'eau) est présenté ci dessous :

- Message de l'Agriculteur au Fournisseur d'eau: DemandeEau

<From>: Agri N°
Maïsiculteur
<To> : Syndic
<Type> : Demande
<Nature> : DemandeEau

Contenu de DemandeEau :

Eau demandée : 1200

Surface Maïs irriguée : 10

- Message du Fournisseur d'eau à l'Agriculteur : AllocationEau

<From>: Syndic
<To> : Agri N°
<Type> : Réponse
<Nature> : AllocationEau

Contenu de RéponseEau :

Eau attribuée : 800

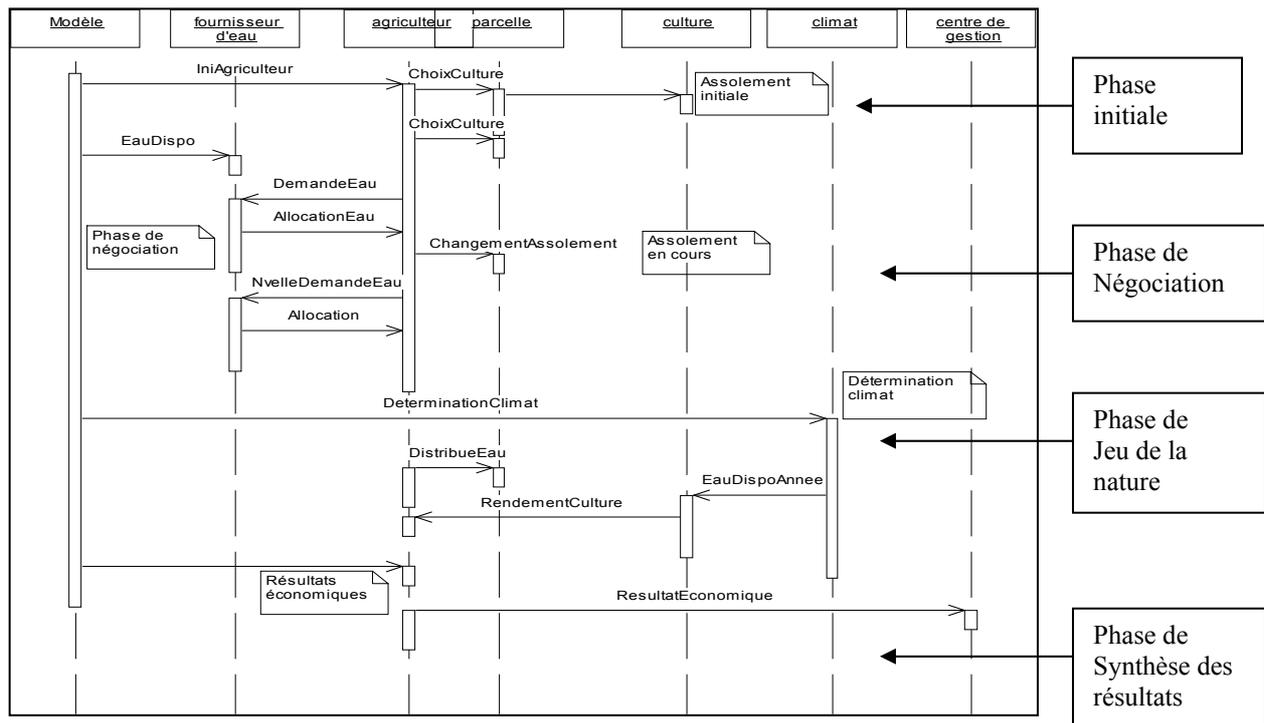


Figure 44 : Les différentes phases du modèle MANGA et les messages échangés.

3.5. Analyse des résultats de la simulation

Les résultats (Tableau 10) sont analysés de différents points de vue :

- *Individuel* :
 - Eau demandée par chaque agriculteur,
 - Eau attribuée à chaque agriculteur,
 - Eau consommée par chaque agriculteur,
 - Son rendement par année, en fonction des cultures irriguées,
- *Collectif*, qui correspond à la production globale d'une culture sur la zone,
- *Ethique*, qui permet d'analyser les disparités entre agriculteurs, ayant des comportements différents vis-à-vis de la demande en eau,
- *Environnemental*, qui permet d'observer la consommation d'eau globale ainsi que l'eau restante sur la zone.

Agriculteur	
	Eau demandée Eau accordée
	Evolution de l'eau attribuée au cours de la négociation
	Rendement
	Eau utilisée, non consommée
	Charges sur les produits, résultats économiques
Fournisseur d'eau	
	Eau disponible
	Eau utilisée par l'ensemble des agriculteurs
	Eau restante
	Evolution de l'allocation d'eau au cours de la négociation
Centre de gestion	Synthèse des résultats en fonction type d'assolement, type de comportement

Tableau 10 Les sorties obtenues après simulation pour l'ensemble des agents

Les résultats sont fournis directement aux utilisateurs à travers plusieurs interfaces (Figure 45).

Le modèle a été utilisé pour tester une série de règles d'allocation de l'eau. Après la simulation de l'emploi d'une règle, ses conséquences sont analysées et donnent lieu à une réflexion pour imaginer une nouvelle règle susceptible d'en palier les défauts.

La première règle alloue de l'eau en fonction des demandes faites par les Agriculteurs. En cas de pénurie d'eau cette règle est satisfaisante si tous les Agriculteurs ont un comportement identique. Par contre si les comportements sont hétérogènes elle amène des disparités importantes et un mauvais emploi de la ressource entraînant un sous-emploi de la ressource.

Une règle d'inspiration administrative accordant l'eau en fonction des surfaces élimine ces problèmes mais nécessiterait pour sa mise en œuvre de nombreux contrôles coûteux et ouvrirait la voie à des risques de tricherie importants.

Pour palier ce problème la troisième série de simulation suppose des modifications de l'information disponible pour les Agriculteurs et un comportement différent de ceux-ci. La règle d'allocation est la même que dans la première série de simulation : au pro rata de la demande en eau. Mais dans cette simulation chaque Agriculteur peut connaître l'eau attribuée à tout autre Agriculteur et peut alors faire sa demande en copiant la demande de celui qui a demandé le plus d'eau. Au bout de quelques années les résultats sont satisfaisants et les disparités de la première série de simulation ont disparu sans amener des nouvelles mesures administratives.

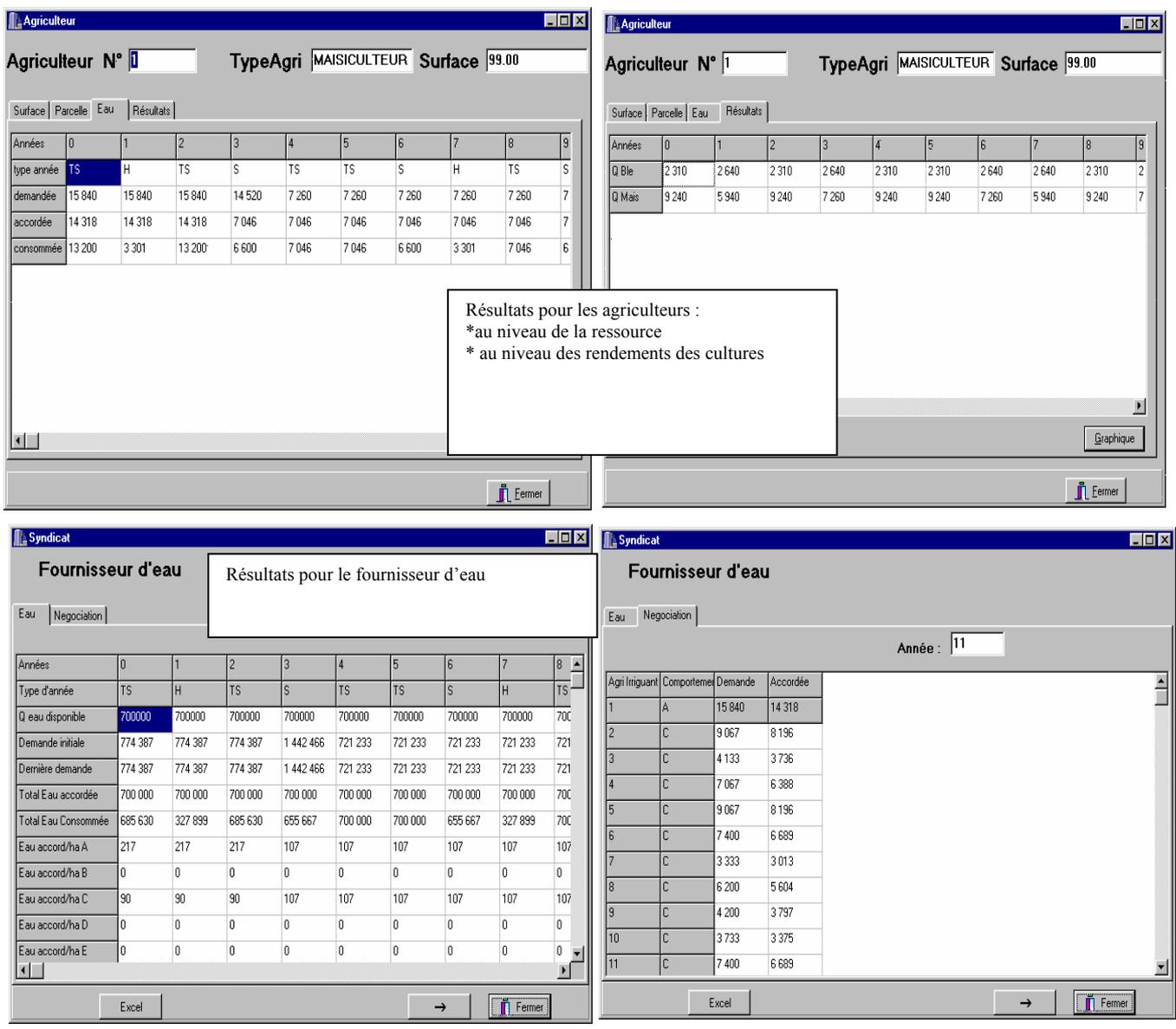


Figure 45 : Interfaces qui représentent les différents résultats des simulations.

Les résultats des simulations présentés ci-dessous ont été faites :

- Pour un nombre constant d'Agriculteurs (100) sans qu'il y ait évolution de leurs surfaces semées;
- Pour trois années climatiques très différentes (Humide, Sèche et très Sèche) ;
- Pour une quantité d'eau disponible légèrement supérieure aux besoins en année sèche.

Par contre, les Agriculteurs ont des comportements différents pour établir leur demande en eau:

- *Les Agriculteurs de comportement de type A* (de type « gourmand ») formulent leur demande en eau en fonction de leurs besoins en prenant comme année de référence une année très sèche. De plus, pour assurer leur sécurité, ils augmentent leur demande de 20%.
- *Les Agriculteurs de comportement de type B* (plus « raisonnables » que les Agriculteurs de type A), formulent leur demande en eau en fonction de leurs besoins en prenant comme année de référence une année sèche. Ils ne demanderont pas plus que les besoins calculés.

Il serait possible de définir d'autres types de comportement plus ou moins risqués en fonction des demandes faites (en tenant compte de leurs besoins calculés, et de l'année de référence choisie).

Les résultats de ces simulations sont maintenant analysés en détail.

3.5.1. Règle d'allocation au prorata de la demande en eau

Cas 1 : 100% d'Agriculteurs de comportements de type A (« Gourmands »)

La Figure 46 montre la quantité d'eau disponible et la quantité d'eau accordée à des agriculteurs ayant tous un même comportement (de type A) pour les années humide, sèche et très sèche. On rappellera que ces Agriculteurs déterminent leurs besoins en eau en fonction de l'année très sèche. De plus pour s'assurer cette quantité d'eau, ils demandent 120% de leurs besoins en année très sèche.

Avec la règle testée, au prorata des demandes en eau, ils obtiennent tous la même quantité d'eau. On observe une pénurie d'eau en année très sèche, chaque Agriculteur obtient donc une quantité d'eau inférieure aux besoins en eau des cultures. Ce manque en eau se traduit au niveau global (en année très sèche) par une production en maïs irrigué en dessous de la quantité maximale possible (612 tonnes au lieu du maximum possible de 917 tonnes). (Figure 47)

La Figure 49 correspond aux rendements de maïs irrigués obtenus selon l'année climatique, humide, sèche et très sèche. Ces rendements sont directement liés à l'eau attribuée aux différentes cultures irriguées. Dans ce cas, les agriculteurs ont obtenu toute l'eau souhaitée en année humide et en année sèche (Figure 46), cela se traduit donc par un rendement maximal en maïs irrigué pour ces deux types d'années (90 et 110 Quintaux). Par contre, en année très sèche, compte tenu d'un manque en eau, ils n'obtiennent que 93 quintaux au lieu des 120 s'ils avaient eu toute l'eau nécessaire.

Au niveau environnemental, (Figure 48) on observe donc en années humides et sèches que toute l'eau n'est pas consommée. Par contre, en année très sèche, toute l'eau accordée par le fournisseur d'eau est consommée.

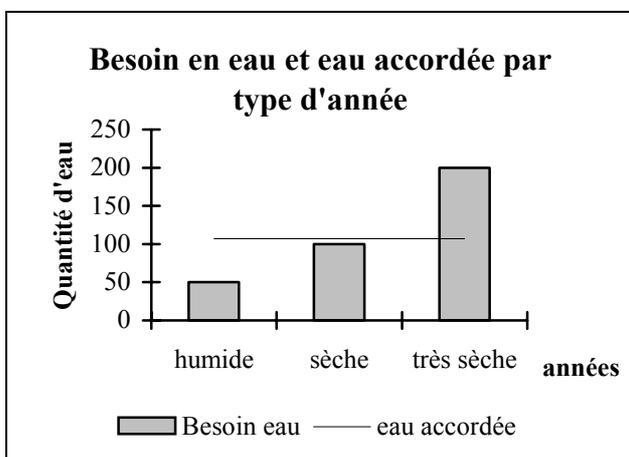


Figure 46 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (100% de type A)

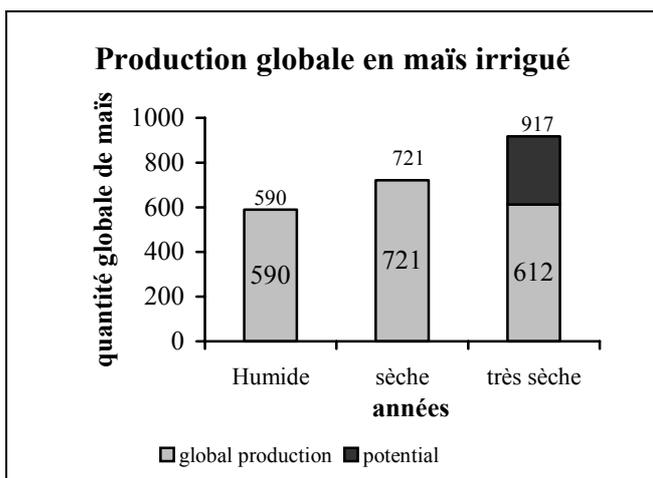


Figure 47 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (100% de type A)

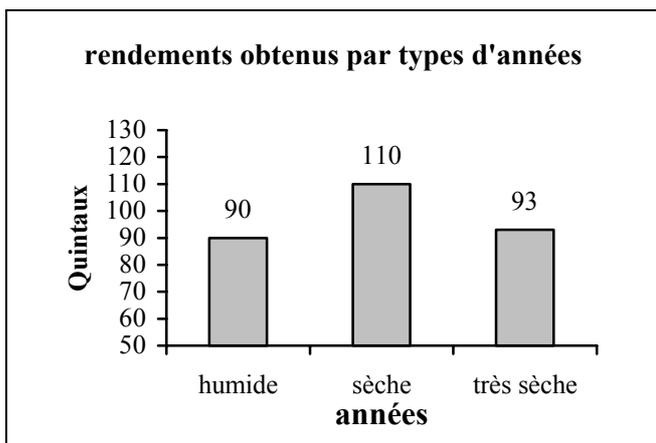


Figure 48 : Rendements obtenus par types d'années (100% de type A)

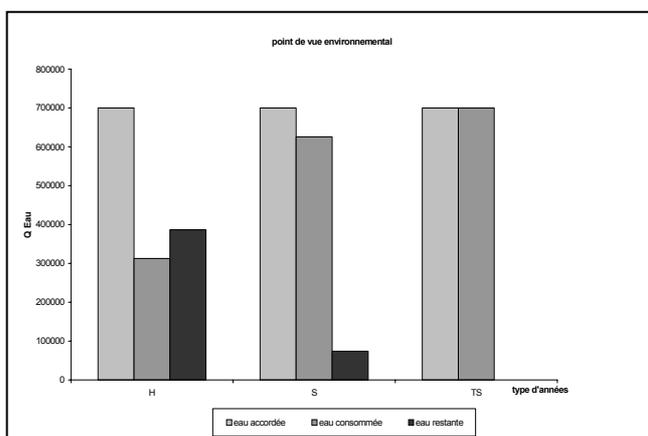


Figure 49 : Quantités d'eau accordée, consommée, et restante par types d'années

Cas 2 : 100% d'Agriculteurs de comportements de type B («Raisonnables»)

Les résultats sont légèrement différents par rapport au type A. Ce type d'Agriculteurs demande une quantité d'eau qui correspond à leurs besoins en année sèche. On observe (Figure 50) qu'en année très sèche, ces Agriculteurs obtiennent une quantité d'eau inférieure au cas précédent où tous les Agriculteurs ont un comportement « gourmand ».

Cette diminution de la quantité d'eau allouée au niveau individuel se traduit :

- Au niveau global (Figure 51) par une diminution de la quantité produite de maïs irrigué (590 Tonnes au lieu de 612 Tonnes dans le cas précédent) en année très sèche.
- Au niveau du rendement, par une diminution de celui-ci en année très sèche (90 Quintaux au lieu de 93 dans le cas1). (Figure 52)

- Par contre, au niveau environnemental on observe que ce type d'Agriculteurs ne consomme pas toute l'eau allouée en année très sèche. (Figure 53)

De manière générale, on constate donc que leur comportement que l'on pourrait qualifier de raisonnable se retourne contre eux et pénalise la collectivité. Le modèle serait sans doute à modifier pour éviter cette sous-utilisation de l'eau.

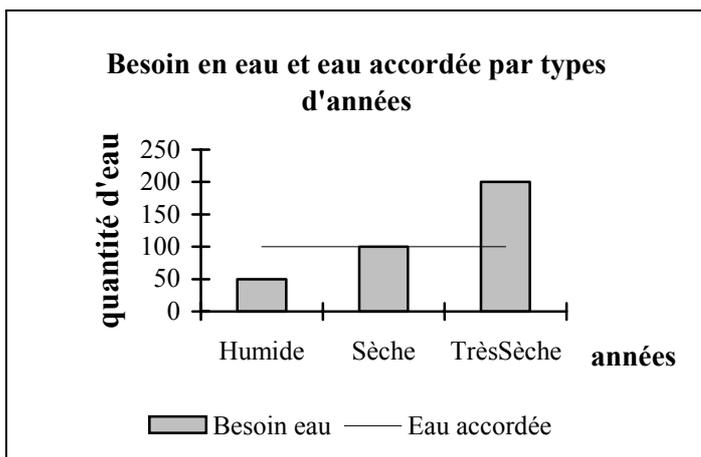


Figure 50 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (100% de type B)

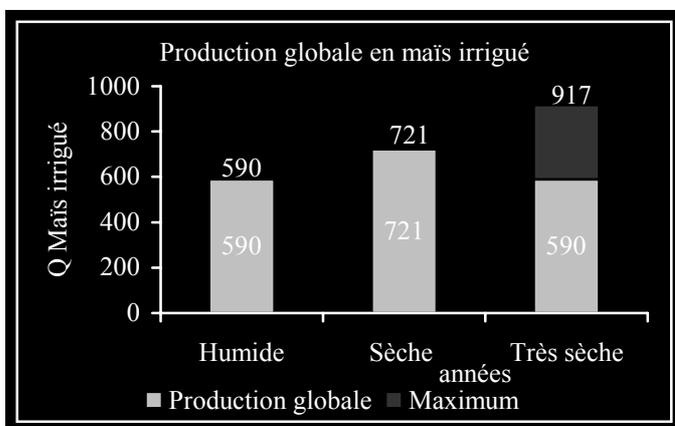


Figure 51 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (100% de type B)

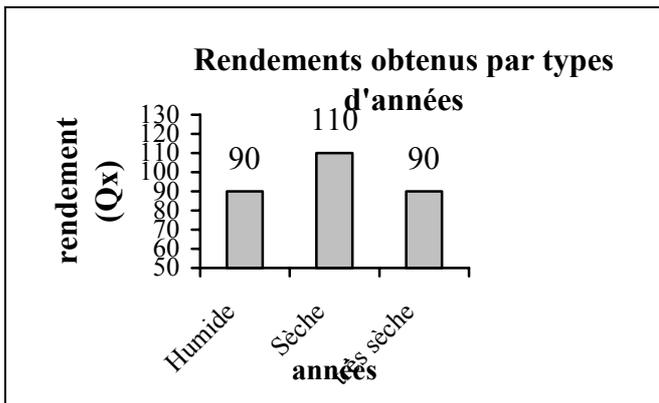


Figure 52 : Rendements obtenus par types d'années (100% de type B)

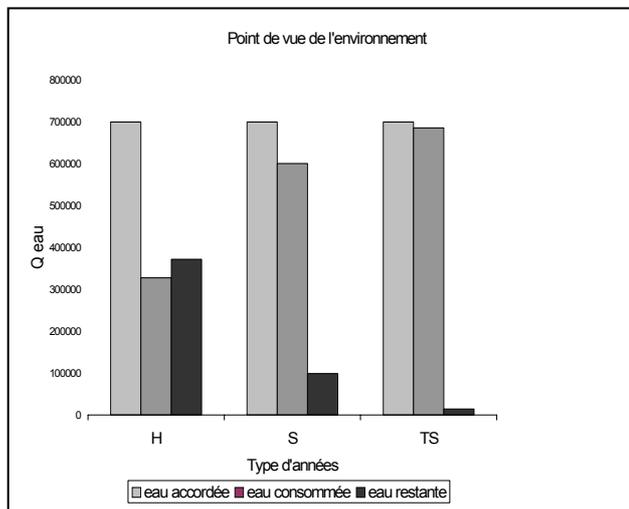


Figure 53 : Quantités d'eau accordée, consommée, et restante par types d'années

Cas 3 : 50% d'Agriculteurs de comportements de type A («Gourmands») + 50% d'Agriculteurs de comportements de type A («Raisonnables»)

L'hétérogénéité du comportement introduit des modifications considérables des résultats.

Nous avons alors simulé une population composée de 50% d'Agriculteurs de type A et 50% d'Agriculteurs de type B. La règle d'attribution d'eau au prorata des demandes accorde évidemment plus d'eau à ceux qui ont demandé plus mais elle a un effet pervers dans la mesure où, par rapport au cas précédent (100% B) elle diminue la quantité accordée à ceux qui ont demandé moins et en attribue davantage à ceux qui ont demandé le plus (Figure 54). On observe alors au niveau individuel, que même en année sèche (Figure 55) les Agriculteurs de type B ne

disposent pas assez d'eau, celle-ci ayant été réservée par les Agriculteurs de type A qui ne l'utilisent pas.

Au niveau des rendements (Figure 56), les résultats sont encore plus marqués. Les Agriculteurs de comportement A atteignent le maximum de production alors que les Agriculteurs de comportement B ont un faible rendement.

Au niveau de la production globale (Figure 55), en année sèche toute l'eau n'a pas été utilisée et la production globale régresse. Par contre, en année très sèche, la production globale permise par la quantité d'eau disponible est atteinte.

Cette règle entraîne donc des disparités très importantes liées à l'hétérogénéité des comportements.

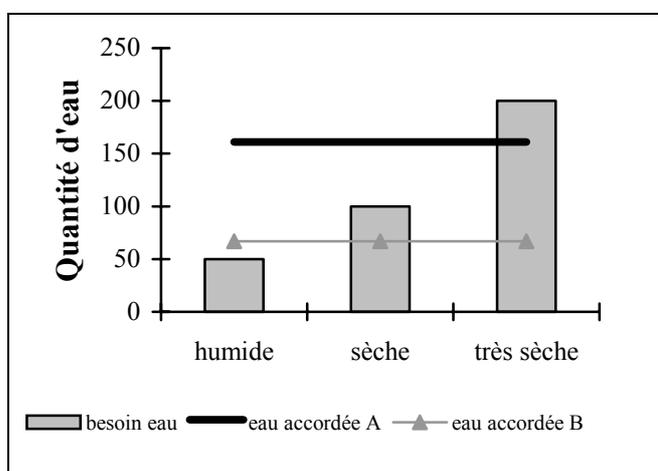


Figure 54 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (50%A+50%B)

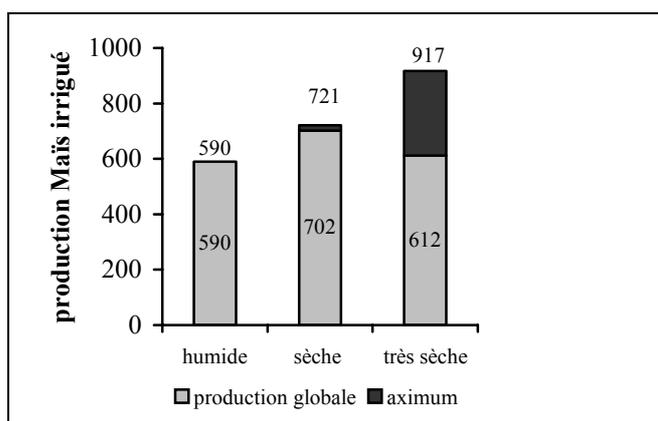


Figure 55 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (50%A+50%B)

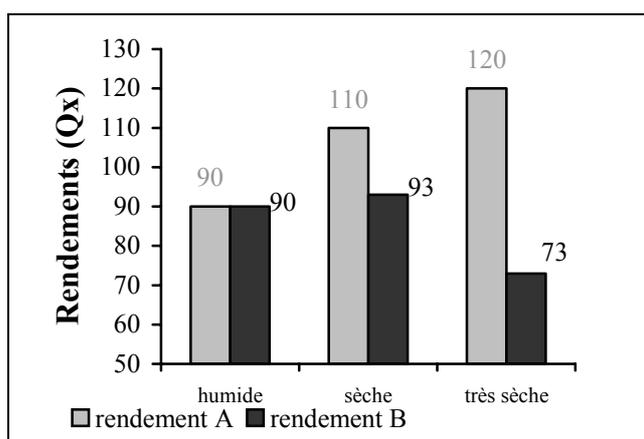


Figure 56 : Disparités de rendements obtenus par types d'années (50%A+50%B)

Conclusions sur les cas présentés :

Ces simulations mettent clairement en évidence l'importance du comportement et de l'hétérogénéité des Agriculteurs. Les meilleurs résultats du point de vue individuel, global et éthique (disparités de rendement entre Agriculteurs) correspondent aux Agriculteurs de comportement A. Sans doute eut-il été possible d'améliorer le modèle pour éviter la sous utilisation de l'eau en période sèche mais nous avons préféré tester une autre règle d'allocation plus conforme aux habitudes.

3.5.2. Règle d'allocation d'eau en fonction de la surface en maïs irrigué

Cette règle fait abstraction du comportement des Agriculteurs et attribue autoritairement de l'eau à ceux-ci en fonction de leur surface en maïs irrigué.

Les résultats sont toutefois similaires à une règle qui serait fondée sur une économie centralisée. Face à cette situation nous avons testé une règle plus autoritaire qui est d'allouer l'eau au prorata de la surface en maïs irrigué.

Dans ce cas, les résultats obtenus sont identiques à ceux d'une population homogène d'Agriculteurs au comportement de type A : la production est maximale et les disparités liées au rendement disparaissent.

Ce type de règle est couramment utilisé dans certaines régions. Le problème posé alors réside dans la pratique. Elle entraîne une complexité administrative : envoi de formulaires, vérification et traitement souvent lourds et coûteux.

Pour éviter ces problèmes, nous avons repris la première règle simulée : allocation au pro rata des demandes maïs en modifiant l'information disponible pour chaque Agriculteur et en supposant une prise en compte de cette information qui se traduit par une évolution de la façon de formuler sa demande.

3.5.3. Règle basée sur l'évolution des comportements

Dans ce cas, la simulation est fondée sur deux hypothèses :

- Chaque Agriculteur peut connaître la quantité d'eau attribuée à tous les autres Agriculteurs.
- Chaque Agriculteur formule sa demande en suivant la règle suivante : *la demande à l'hectare est égale à la quantité d'eau maximale à l'hectare attribuée.*

Les résultats ont été obtenus sur une série d'années climatiques, humides, sèches et très sèches. Ils montrent qu'au bout de quelques années, les disparités cessent et que les rendements individuels et la production globale augmentent (Figure 57).

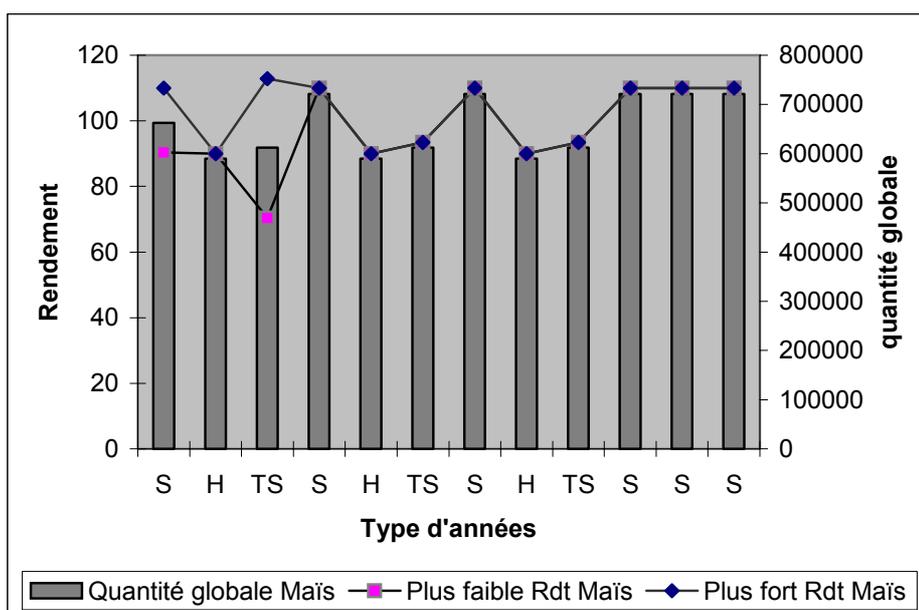


Figure 57 : Evolution de la quantité globale produite et des disparités de rendements selon un scénario climatique.

Conclusions sur les résultats des différentes simulations

Nous aurions pu affiner la règle basée sur l'évolution des comportements des agents agriculteurs en imaginant des vitesses d'adaptation différentes selon chacun. Mais il nous a semblé plus

important d'aborder un problème réel que d'améliorer ce *toy problem*. Néanmoins, celui-ci a montré que toutes choses étant égales par ailleurs, l'hétérogénéité des comportements des acteurs a des conséquences importantes du point de vue économique : les productions individuelles et globales diffèrent beaucoup, et du point de vue éthique, dans la mesure où les disparités sont plus ou moins considérables. Ces résultats montrent aussi :

- Qu'une solution de type administratif (règle au prorata de la surface en maïs irriguée) fournirait des résultats satisfaisants au prix d'un renforcement des processus de contrôle nécessaires à une mise en œuvre pratique,
- Qu'une solution fondée sur une information rendue publique et sur une capacité d'évolution des acteurs (règle basée sur l'évolution des comportements) fournirait en peu de temps des résultats identiques aux « meilleures » solutions obtenues, en impliquant le moins de contraintes.

4. Conclusion

Le système Manga est opérationnel et permet d'apprécier, pour une règle donnée, ses différentes conséquences en terme de production individuelle et collective, de disparités, et d'utilisation de la ressource.

Dans le contexte de notre travail, Manga présente l'avantage d'être un outil où l'utilisateur peut spécifier les connaissances relatives à chaque acteur modélisé (Par des interfaces définies avec les utilisateurs) avant le lancement de l'exécution de la simulation.

Les utilisations de ce prototype ont permis, (i) de repérer les acteurs pertinents et leurs relations pour définir des archétypes d'agents que l'on retrouvera dans les modèles destinés à l'allocation de l'eau, (ii) de dégager sur le plan informatique des classes, (iii) d'instaurer un dialogue avec des professionnels afin de déterminer les forces et faiblesses du modèle, les acteurs oubliés, les processus omis.

Ce système fournit pour un cas d'école : les différents acteurs identifiés dans le cadre de notre problématique ainsi que des premiers résultats pertinents. Ainsi, la diminution de l'asymétrie de l'information entre différentes classes d'agriculteurs s'est accompagnée d'une diminution de la disparité et d'une efficacité plus grande de la ressource en terme de marge globale [Le Bars *et al.*, 2002].

Ce système a montré une série de recherches complémentaires à entreprendre :

- La typologie des agriculteurs doit intégrer leurs comportements et notamment leur attitude vis-à-vis des risques.
- Le comportement des agents peut être plus riche que la représentation classique de la recherche de la maximisation d'une fonction d'utilité unique. Les processus d'apprentissage doivent jouer alors un rôle important.
- Le problème du choix entre plusieurs propositions de règles de partage de l'eau pourrait sans doute être amélioré par l'utilisation de méthodes multicritères.
- Le problème de la négociation est abordé par les communautés Multi-Agent et par la Théorie de jeux, mais peu de relations existent entre les deux. Ce modèle serait grandement amélioré en intégrant les avancées de ces deux communautés.

Enfin le processus de décision des agents n'évolue pas en fonction du temps. Pour cela nous envisageons d'utiliser un formalisme de type BDI pour que chaque agent puisse en fonction de ses connaissances et de ses objectifs utiliser le plan le mieux adapté à la situation. Cet aspect sera développé plus précisément dans le chapitre suivant.

A partir de ce prototype nous avons dégagé avec les intervenants au niveau de la gestion d'un bassin (Agriculteurs, Conseil Général, Chambre d'Agriculture, Centre de Gestion,...) les perspectives d'évolution du système. Ceci a été rendu possible par le fait que bien que le modèle soit simplifié, il s'est révélé suffisant pour susciter des discussions et imaginer une suite à ce travail.

Chapitre 7

Le système MANGALERE

Cette première étape nous a permis d'approfondir nos connaissances quant au problème posé. Cependant, le modèle d'agent défini précédemment ne suffit pas pour représenter les stratégies de l'agent et son processus de délibération et de planification. Le simulateur Manga a servi de base à une conceptualisation qui se traduit actuellement sous la forme de l'instrument de modélisation (dénommé MangaLère) que nous allons présenter. Celui-ci n'ambitionne pas le statut de plateforme générale de développement mais se veut une plateforme de simulation multi-agent dédiée à la gestion de la ressource en eau dans des contextes de négociations diversifiés.

1 Le modèle MangaLère

Nous avons choisi le modèle d'agent BDI pour représenter les stratégies des acteurs. Les raisons en sont les suivantes :

- *L'environnement est imprévisible.* Par exemple, le climat peut changer au cours du temps. Ainsi, les intempéries, les crues ou les sécheresses ne sont pas prédéfinies.
- *Les actions sont multiples,* ce qui permet au système d'exécuter différentes procédures en parallèle. Par exemple, le système peut avoir différentes actions à mener telles que demandes en eau, limitation de la consommation, application d'une réglementation, ...
- *Les objectifs sont divers.* En effet le système peut contenir des agriculteurs de comportements différents correspondant à des objectifs différents par rapport à leur demande en eau : un agriculteur peut avoir comme objectif de pratiquer telle ou telle culture à un temps t , une autre culture à un temps $t+1$. Chaque agriculteur définira en fonction de sa surface irriguée et de son objectif de rendement la quantité d'eau souhaitée.

- *Les objectifs dépendent de l'environnement et non de l'état interne du système.* Par exemple, l'eau attribuée dépend de la quantité d'eau disponible, qui dépend de la pluviométrie de l'année (avant avril).
- *Les agents possèdent une information et une vision partielle de l'environnement.* En effet, initialement chaque agriculteur reçoit une information sur la quantité d'eau qui lui est allouée. Ils ne sont pas au courant de ce que les autres reçoivent.

De plus, ce formalisme servira comme base de discussion avec les décideurs. Il a en effet l'avantage de fournir une représentation des connaissances concise et synthétique facilement compréhensible et réfutable par les différents acteurs. Il constitue un élément fondamental du dialogue avec eux au niveau de la construction du modèle. Pour illustrer notre application, on fera référence au terrain de la Lère. En effet, sur cette zone nous avons entretenu des échanges fréquents avec les acteurs concernés. Rappelons les acteurs en jeu, les agriculteurs, les semenciers, les gestionnaires de l'eau, les consommateurs, les associations de protection de la nature, la puissance publique et les industriels (EDF par exemple). Dans MangaLère les acteurs modélisés sont les agriculteurs et les fournisseurs d'eau. Les autres acteurs sont intégrés dans l'environnement sous forme de contraintes.

1.1 Caractéristiques générales

Elles sont récapitulées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	MANGALERE
Type de ressources	retenues (Barrages, lacs, retenues collinaires) Cours d'eau (Rivières, canaux) Nappes
Acteurs modélisés	Agriculteurs Fournisseurs d'eau
Modèle d'agents utilisés	Réactif Délibératif (BDI)
Réactifs	Climat Cultures Ressources en eau
BDI	Agriculteurs Fournisseur d'eau
Simulation	Discrète au niveau agents Journalière au niveau moteur de simulation
Plateforme utilisée	aucune
Implémentation	C++ Builder

Tableau 11 : Caractéristiques générales du système MangaLère

1.2 L'architecture d'agent

Les agents agriculteurs et fournisseur d'eau sont construit sur le modèle BDI suivant (Figure 58) :

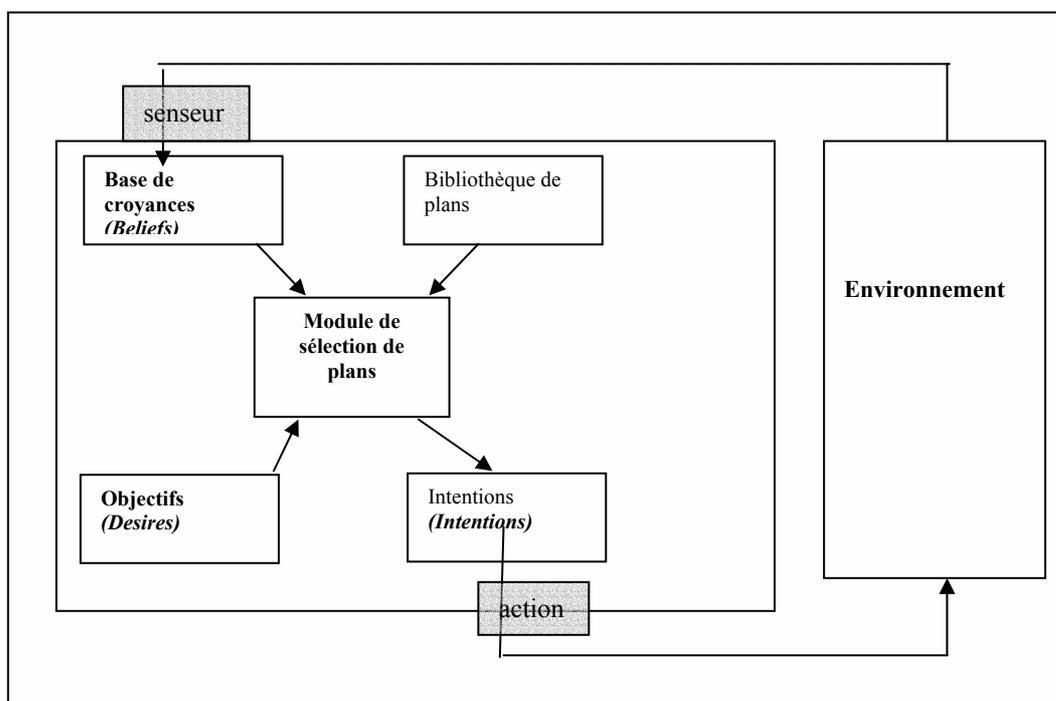


Figure 58 : Schéma général représentant les agents BDI (Agents Agriculteurs, Fournisseur d'eau).

1. **Une base de croyances (*Belief*)** correspond à la base de données de chaque agent. Ces données peuvent être des données factuelles (surface, nombre de parcelles,...) ou des perceptions que l'agent a du monde à un moment donné (par exemple, les anticipations pour la campagne d'irrigation). Cette base de croyances est mise à jour à la suite de changements de l'environnement (niveau d'une ressource, événements climatiques, interdiction préfectorale,...), de messages provenant des autres agents.
2. **une bibliothèque de plans** : l'ensemble de ces plans correspond à l'ensemble des stratégies dont l'agent dispose pour atteindre ses objectifs et sous-objectifs et faire face aux aléas. Ces plans peuvent être partiels et ils seront complétés dynamiquement en cours de simulation. La formulation d'un plan fait appel à un langage (ou ontologie) permettant d'exprimer les conditions à vérifier pour que son déclenchement, sa mise en veille, son abandon, et les décisions à prendre (messages, décision d'irrigation, ajout d'un nouvel objectif à une liste déjà en cours, suppression d'un objectif,...) s'effectuent. Un plan se décompose en sous-

5. **Le module de décision.** En fonction des objectifs et des croyances en cours, il recherche éventuellement les plans aptes à satisfaire de nouveaux objectifs en les plaçant dans la liste des intentions. Il gère l'exécution des plans qui satisfont leurs conditions de déclenchement.

Il peut être amené à gérer les conflits entre différents objectifs.

L'ensemble de ses modules et leurs contrôles sont définis dans la partie suivante.

1.3 Le contrôle des agents BDI

Cette architecture (Figure 58) est assez proche de l'architecture du système PRS [Georgeff *et al.*, 1999]. Pour apporter plus de précision, nous allons décrire le processus de contrôle d'un agent BDI par l'algorithme suivant (basé sur celui de Wooldridge [Wooldridge, 1999]).

Soient \mathbf{B}_0 , \mathbf{D}_0 et \mathbf{I}_0 les croyances, désirs et intentions initiales de l'agent.

Algorithme de contrôle d'agent BDI

1 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$

2 $\mathbf{D} = \mathbf{D}_0$

3 $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0$

4 répéter

4.1 obtenir nouvelles perceptions \mathbf{p}

4.2 $\mathbf{B} = \text{revc}(\mathbf{B}, \mathbf{p})$

4.3 $\mathbf{I} = \text{options}(\mathbf{D}, \mathbf{I})$

4.4 $\mathbf{D} = \text{des}(\mathbf{B}, \mathbf{D}, \mathbf{I})$

4.5 $\mathbf{I} = \text{filtre}(\mathbf{B}, \mathbf{D}, \mathbf{I})$

4.6 $\mathbf{PE} = \text{plan}(\mathbf{B}, \mathbf{I})$

4.7 exécuter (\mathbf{PE})

jusqu'à ce que l'agent soit arrêté

fin

Rappelons que :

- *revc* : $\mathbf{B} \times \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{B}$ est la fonction de *révision des croyances* de l'agent lorsqu'il reçoit de nouvelles perceptions sur l'environnement, où \mathbf{P} représente l'ensemble des perceptions de l'agent.
- *options* : $\mathbf{D} \times \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}$ est la fonction qui représente le *processus de décision* de l'agent prenant en compte ses désirs et ses intentions courantes;

- **des** : $B \times D \times I \rightarrow D$ est la fonction qui peut changer *les désirs d'un agent* si ses croyances ou intentions changent, pour maintenir la consistance des désirs de l'agent (on suppose dans notre modèle que l'agent a toujours des désirs consistants);
- **filtre** : $B \times D \times I \rightarrow I$ est la fonction la plus importante car elle *décide des intentions* à poursuivre ; elle est réalisée par la composante **Filtre**.

La composante **Filtre** est la partie de l'architecture qui a la responsabilité de bâtir des plans partiels pour réaliser les intentions de l'agent, tout en tenant compte des nouvelles opportunités. En conséquence de ce qu'il perçoit de son environnement et de sa révision des croyances, l'agent peut détecter des nouvelles opportunités qui favorisent la réalisation de ses intentions ou qui peuvent même empêcher cette réalisation.

- **plan** : $B \times I \rightarrow PE$ est la fonction qui transforme les plans partiels en plans exécutables (**PE** étant l'ensemble de ces plans).

Si une intention a été choisie par la fonction **filtre**, on dit que l'agent s'est obligé à réaliser cette intention. L'obligation d'un agent envers une intention, en anglais appelé "commitment", a une grande importance dans le modèle BDI d'un agent situé dans un environnement non déterministe.

1.4 Les interactions entre agents

Les interactions entre agents passent par l'émission et la réception de messages. Notre système utilise les normes FIPA [FIPA, 1999] qui se basent sur le langage KQML [Finin *et al.*, 1997], très utilisé dans la communauté agent et a été développé dans le consortium KSE (*Knowledge Sharing Effort*) pour permettre aux agents de coopérer. La structure générale d'un message est la suivante :

Message : $\langle sender \rangle \langle receiver \rangle \langle \textit>performatif \rangle \langle \textit>language \rangle \langle \textit>content \rangle$

- $\langle sender \rangle$ ou émetteur permet de spécifier l'agent qui envoie le message ;
- $\langle receiver \rangle$ ou récepteur permettra d'identifier à qui l'agent envoie son message ;
- $\langle \textit>performatif \rangle$ sont des mots clés qui permettent d'identifier la nature du message (par exemple, REQUEST, ASK-FOR,...) ;
- $\langle \textit>language \rangle$ correspond au langage support du contenu du message (KQML, Lisp,...) ;
- $\langle \textit>content \rangle$ contenu proprement dit.

Les performatifs spécifiques utilisés dans le système MangaLère sont définis dans le tableau 12. Ces performatifs sont :

- *Les exercitifs* : cette catégorie comprend essentiellement les délégations (demandes d'action et demandes de résolution). La conversation associée à l'acte de délégation est certainement, avec la question le type de conversation le plus utilisé dans les systèmes multi-agents.
- *Les interrogatifs* : ils servent à poser des questions dont les réponses ne doivent donner matière à l'exécution d'un calcul complexe. Les questions peuvent porter aussi bien sur le monde, en demandant à quoi croit un agent, ou sur l'état mental du destinataire (quels sont ses buts, ses engagements,...).
- *Les assertifs* : ils servent à donner des renseignements sur le monde et donc à décrire des objets ou des situations.

Type de performatif	Exemple de performatif	Catégorie
Demande	DemandeEau NouvelleDemandeEau Rendement	Exercitif (action+résolution) Exercitif (action+résolution) Interrogatif (pas de calcul complexe)
Réponse	AllocationEau	Assertif (affirme et informe)

Tableau 12: Exemple de performatifs

1.5 Ontologies

Dans MangaLère, les messages respectent une structure et une ontologie commune à chaque couple de types d'agents (agriculteur et agriculteur, agriculteur et fournisseur d'eau,...). Par ailleurs, aux langages généraux de type KQML, lisp,... nous substituons un langage dédié, basé sur ces ontologies. En concevant un langage spécifique au problème, il s'agit de se rapprocher au maximum du langage des différents acteurs et de simplifier la compréhension des messages.

L'implémentation de ces ontologies passe par l'élaboration de lexiques et de grammaires [Aho *et al.*, 1986], d'interpréteurs ou parseurs et compilateurs. Nous avons défini un langage dédié fondé sur les ontologies du domaine et dont la grammaire est donnée Figure 59. Un lexique et une grammaire permettent l'interprétation du langage.

L'analyseur lexical

Un analyseur lexical est défini pour chacune des classes ASA, Agriculteur, Réservoir et Rivière. Chaque analyseur lexical permet d'identifier les mots clés (...) et les identifiants de l'utilisateur (les objectifs, les noms d'agents,...) spécifiques à leur langage. Cette définition d'une ontologie est utilisée à la fois pour l'échange de messages entre agents mais aussi pour définir des plans.

Par exemple : *Ontologie commune pour les ressources utilisables dans la définition des plans spécifiques aux réservoirs et rivières.*

L'analyseur syntaxique

L'analyseur syntaxique reçoit une suite d'unités lexicales (de symboles terminaux) de la part de l'analyseur lexical. Il doit dire si cette suite est syntaxiquement correcte. Il doit donc essayer de construire l'arbre. S'il y arrive, alors, c'est syntaxiquement correct.

La grammaire présentée ci-dessous correspond aux opérandes mathématiques du langage (Figure 59).

```

instruction      : expression_add
                  | expression_si
                  | affectation
expression_si    : SI (condition_OU ) suite_si [SINON suite_si]
suite_si         : expression_si
                  | affectation

affectation      : INDICATEUR= expression_add
expression_add   : expression_mul <op_add expression_mul >
op_add           : + | -
expression_mul   : expression_num <op_mul expression_num >
op_mul           : * | \
expression_num   : (expression_add)
                  | NOMBRE <%>
                  | un_Identificateur
un_Identificateur : IDENT [ (un_exercice) ]
un_exercice      : N [op_add NOMBRE ]

condition_OU     : condition_ET < OU condition_ET >
condition_ET     : expression_comp < ET expression_comp >

expression_comp  : expression_add < op_comp expression_add >
op_comp         : > | < | >= | <= | # | <> | =

```

Figure 59 : Grammaire (Backus-Naur Form)

1.6 Représentation générale de MangaLère

Le modèle général du système MangaLère est représenté par le diagramme de classes simplifié UML (Figure 60) :

Une classe générique (*classe Agent*) est la racine de la hiérarchie des classes représentant les agents modélisés sous le formalisme BDI. C'est ainsi qu'elle contient une liste de plans, une liste d'objectifs, une liste de croyances et une liste d'intentions. Elle contient également une boîte aux lettres c'est-à-dire une liste de messages. La classe message contient les méthodes d'envoi et de réception de messages. Le message est codé sous le formalisme KQML (norme FIPA) à savoir, un émetteur, un destinataire, le performatif, le langage et le contenu.

Les intentions pointent vers un objet de la classe plan. Enfin, les classes plan, objectif, croyances, message, pointent vers un objet de la classe compilateur. Celle-ci contient, un analyseur lexical, un analyseur syntaxique, une méthode de stockage sous forme d'arbre binaire et un évaluateur d'arbre.

Les classes "retenues" et "cours d'eau", bien que non-agent BDI, héritent de la classe agent par simplification car ils contiennent des plans.

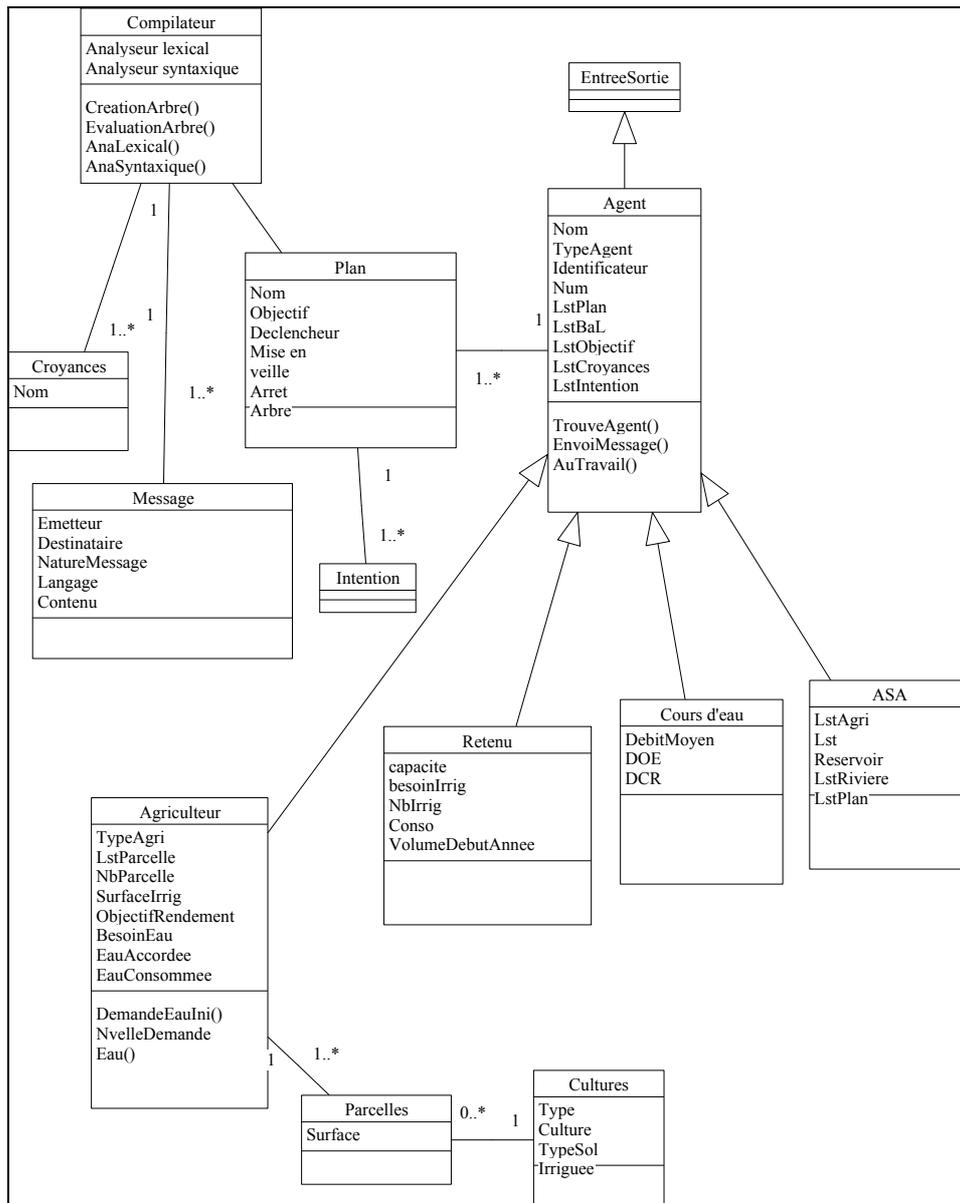


Figure 60 : Diagramme de classes UML (simplifié)

1.7 Les données de la simulation

Les données utilisées dans MangaLère sont actuellement les mêmes que celles utilisées dans Manga (Tableau 9). Par contre, ces données suivent le formalisme XML (abréviation de *eXtensible Markup Language*).

Une classe de base gère les entrées et les sorties sur fichier et toutes les classes ayant besoin de cette fonctionnalité en hériteront.

Les fichiers XML sont sous format texte et sont structurés de la façon suivante :

Chaque élément d'un document XML [Michard, 2001] est encadré d'une balise de début et d'une balise de fin. La balise de début correspond à la nature de l'élément (<type élément>). La balise de fin reprend ce même nom précédé d'une balise '/' (</type élément>).

Par ailleurs, ce formalisme permet l'imbrication des éléments entre eux. Prenons l'exemple de l'historique d'une retenue :

```
<retenue>
  <ident> 1 Gouyre </ident>
  <consoM3> 900000 545152 477014 993504 1719897 844106 678590 1743000 </consoM3>
  <Capacite> 3300000 </Capacite>
  <DebitSouscrit> 2166.8799 </DebitSouscrit>
</retenue>
```

Cet élément contient son identificateur (<ident> </ident>) avec comme champ son numéro et son nom. Un deuxième élément correspond à la consommation en m³ enregistrée pour huit années consécutives à partir de l'année 1991 (caractéristiques générales des fichiers), une capacité et un débit souscrit.

2 Un exemple d'application du système : L'agent Fournisseur d'eau

Une contractualisation entre Agriculteurs et Fournisseurs d'eau est mise en place au préalable de la campagne d'irrigation. Le climat (donc le volume disponible de la ressource) n'est alors pas connu. Le contrat initial dans ce point de vue peut être adapté en cours de campagne mais la renégociation n'est pas envisagée. Le niveau de satisfaction de cette demande détermine le rendement effectif et donc la marge brute. Il est plus ou moins bien couvert par le contrat initial

souscrit. Ce contrat est initié par un échange de messages entre Agriculteurs et Fournisseur d'eau.

Chacun de ces agents (Agriculteurs, Fournisseur d'eau) est composé de différents modules (Figure 61): (i) une base de croyances, (ii) des objectifs (iii) une bibliothèque de plans, (iv) un module de sélection des plans qui alimente la liste des intentions.

2.1 Base de croyances

Elles contiennent des éléments de deux origines :

- Des données propres à l'agent Fournisseur d'eau (ou Association Syndicale Autorisée (ASA, dans la région étudiée) telles que la liste des ressources qu'il gère (La Lère, le Gouyre, le Tordre, le Gagnol), l'ensemble des Agriculteurs adhérents (500), son historique de décision (eau accordée par exemple)....
- Des informations provenant de l'environnement telles que les arrêtés préfectoraux, les demandes d'eau, la consommation d'eau, les demandes provenant des Associations de Protection de la Nature, les besoins en eau potable,...

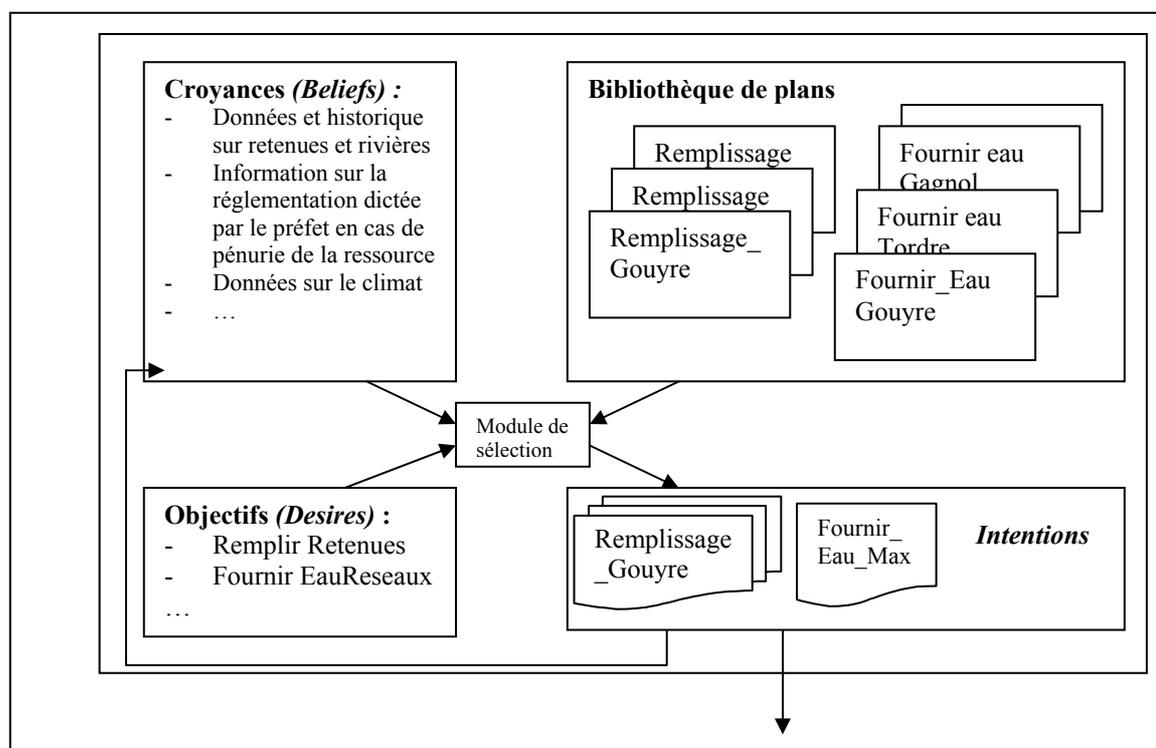


Figure 61 : Architecture de l'agent Fournisseur d'eau (ASA)

2.2 Un exemple de plan

Selon la période de l'année et en cas de pénurie d'eau l'ASA possède un ordre de priorité d'allocation d'eau en fonction des cultures faites par les Agriculteurs (Figure 62). Ainsi, en cas de restriction, il va favoriser les cultures exigeantes en eau comme le maïs et limiter la quantité d'eau aux autres Agriculteurs.

Une impossibilité à prélever de l'eau a deux origines : (i) soit elle provient de l'agent préfet qui informe le fournisseur d'eau de la réglementation à appliquer sur telle ou telle ressource, (ii) soit elle provient de l'arrêt d'un plan en cours d'exécution car le niveau de la ressource est inférieur à la quantité d'eau demandée (par exemple).

The screenshot displays three main windows from the 'FenReservoirFrm' application:

- FenReservoirFrm (top left):** Shows 'Caractéristiques' for 'Gouyre' with a table of values:

Capacité	3 300 000
Besoin Irrigation	2 000 000
Besoin Eau Potable	0
Evaporation	300 000
Besoin APN	650 000
- FenResHistFrm (bottom left):** Shows a 'Gouyre' history table:

Années	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Conso	900 000	545 152	477 014	993 504	1 719 897	844 106	678 59
voDebuAnneM3	0	0	0	0	0	0	0
voPreleveM3	0	0	0	0	0	0	0
evapoMaOctM3	0	0	350 000	660 000	6 000 000	491 000	0
debitMaOctLparS	0	0	0	0	0	0	0
- FenResPlanFrm (top right):** Shows 'Les Plans' with a 'Remplissage' plan defined as follows:

Nom	Remplissage
Documentation	On remplit à partir de mars dès que prix.kw < 1.5 !!?? interruption si niveau Aveyron < 1.5 !!?? arrêt après 15 juin ou reservoir plein Quantité pompée par jour dans Aveyron à préciser
Déclencheur	PrixKw < 30 ET Volume < 3 000 000 ET Date > 1503
Mise en Veille	Niveau(Aveyron) < 1.5
Arrêt	Date > 1506 OU Volume > 3 000 000
Programme	Pomper(Aveyron) 3000 Pomper(Vers(Tordre)) 1000
- Lexique Ré... (bottom right):** A 'Lexique Réservoir' window listing terms like Date, PrixKw, Niveau(...), Volume(...), PomperDans(...), PomperVers(...), <, >, ET, and OU.

Annotations in the image include:

- 'Caractéristiques d'un des réservoirs : Capacité, besoin pour l'irrigation, besoin eau potable, ...' pointing to the characteristics table.
- 'Définition d'un plan' pointing to the plan definition table.
- 'Historique sur le réservoir : Consommation, Volume disponible en début de campagne, Volume prélevé sur l'année...'
- 'Lexique propre à la ressource réservoir' pointing to the lexicon window.

Figure 62 : Caractéristiques, historique et définition d'un plan

Séquencement d'exécution d'un plan

Pour chaque agent, à un objectif correspond un ensemble de sous-objectifs. A un sous-objectif correspond alors un ou plusieurs plans. A l'état initial, chacun des plans est inactif. L'algorithme d'exécution d'un plan est le suivant (Figure 63) :

```

Si plan = inactif et ConditionDeclenchement = VRAI
    Alors plan = Declenche;
Tant que ConditionMiseEnVeille = VRAI
    Alors plan = EnVeille;
Sinon plan = Actif;
Si ConditionArret = VRAI;
    plan = ARRET;
    
```

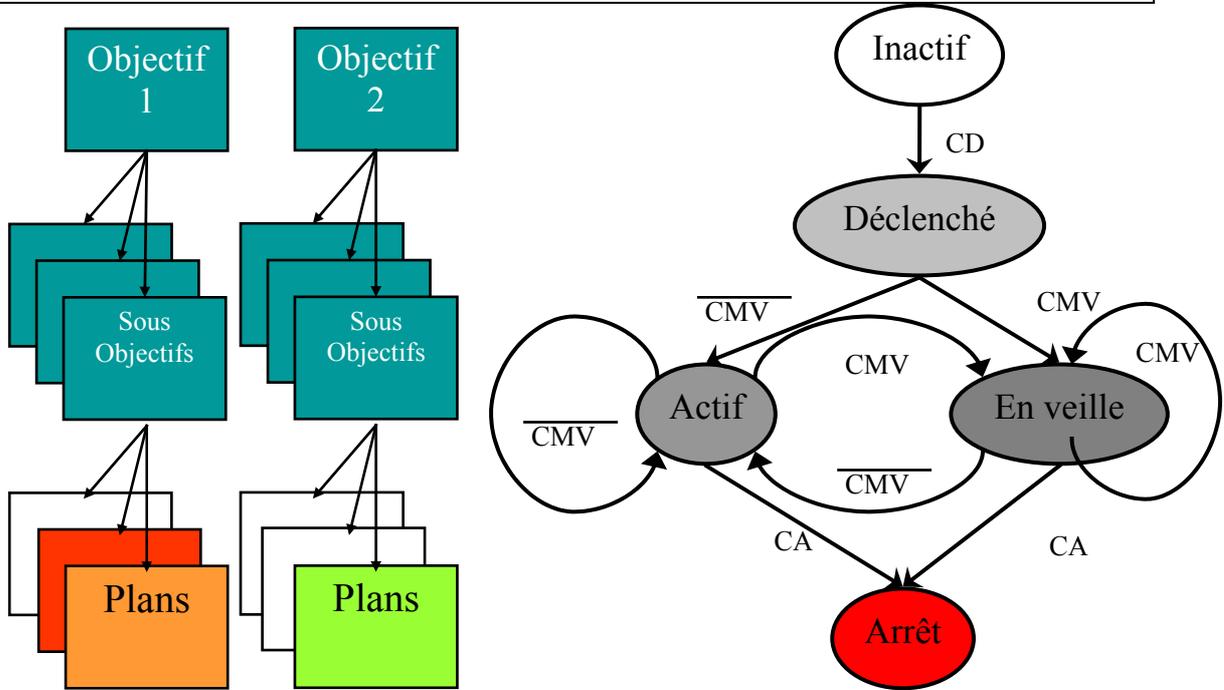


Figure 63: Séquencement d'exécution d'un plan

Deux exemples de déclenchement d'un plan

L'ASA peut avoir un certain nombre d'objectifs. Ces objectifs peuvent être par exemple Remplir_Retenues et Fournir_Eau_Adhérent. Chacun de ces objectifs va déclencher des plans soit en parallèle, soit de manière successive.

Pour l'objectif Remplir_Retenu, les plans Remplir_Gouyre, Remplir_Tordre, Remplir_Gagnol sont déclenchés en parallèle (Figure 64).

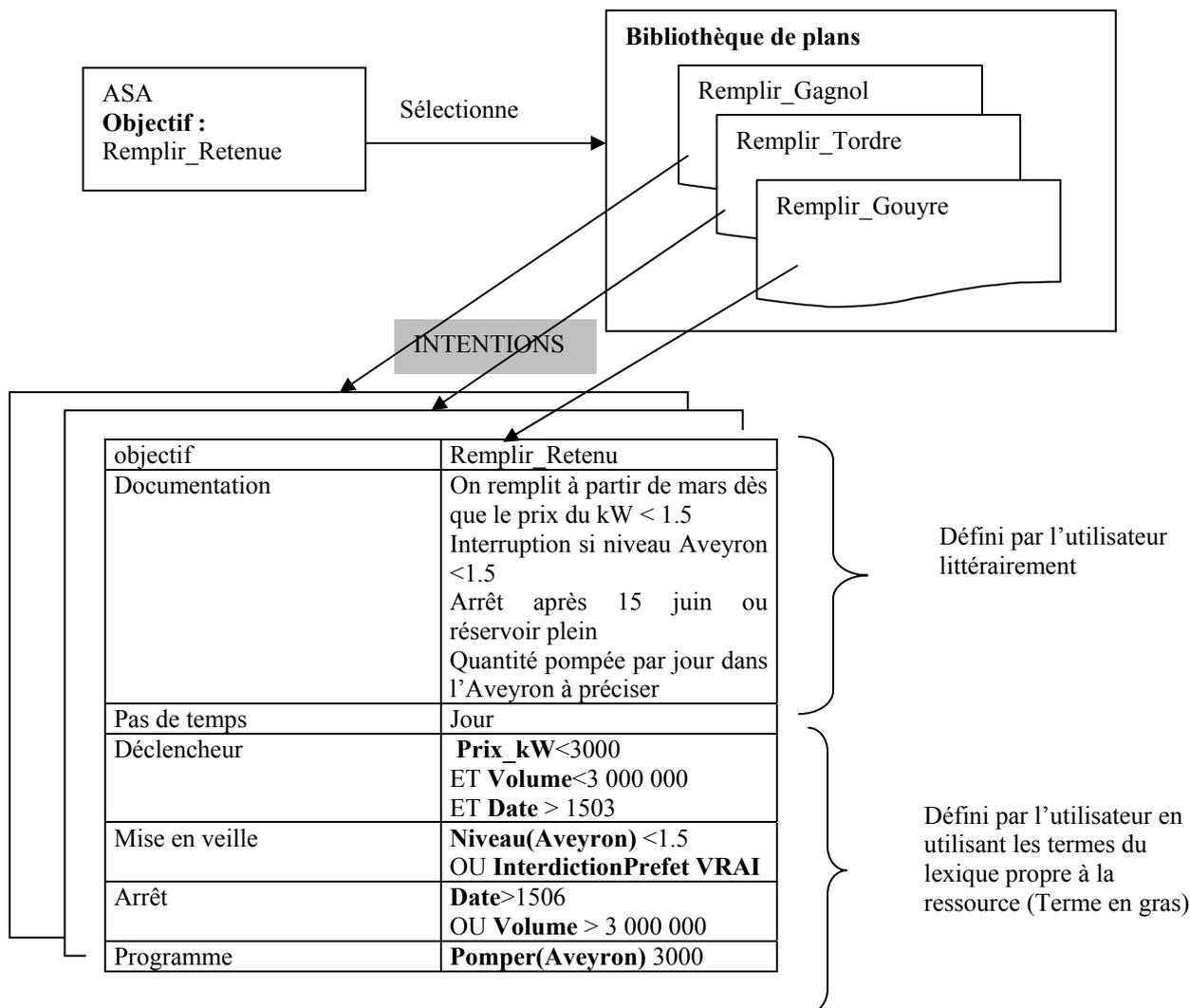
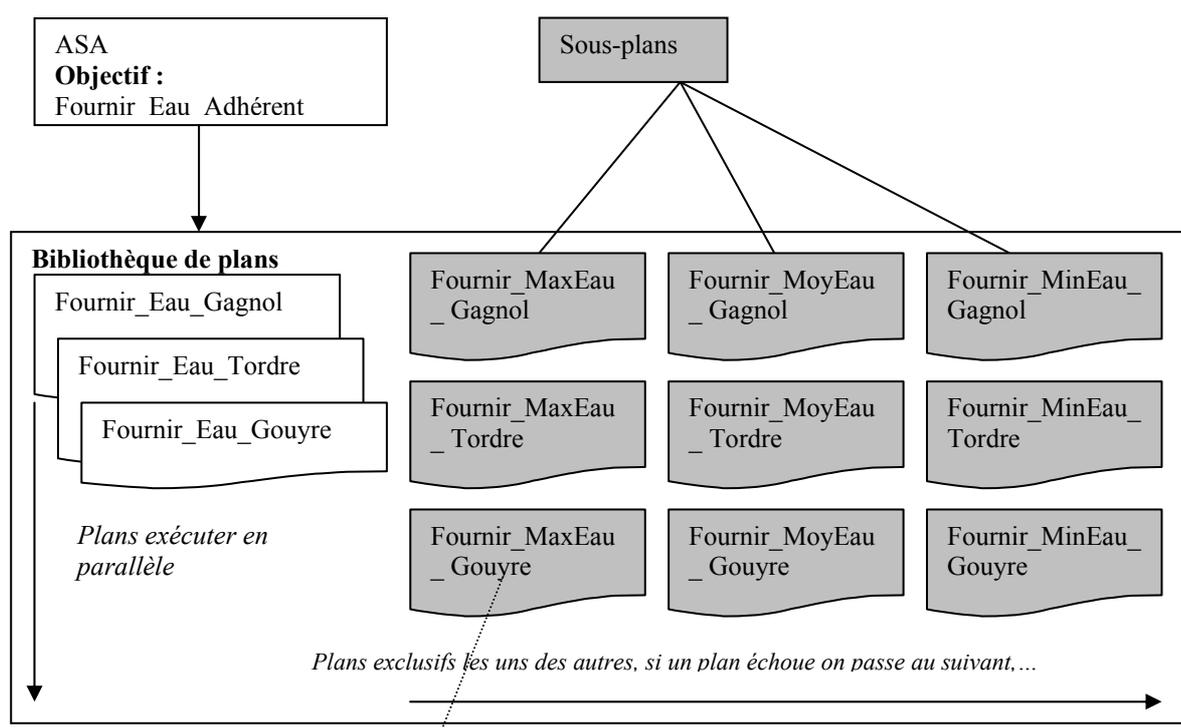


Figure 64 : Plans exécutés en parallèle

Les conditions de déclenchement, de mise en veille et d'arrêt sont différentes pour les autres plans Remplir_Tordre et Remplir_Gagnol.

Pour l'objectif Fournir_Eau_Adhérent, les plans Fournir_Eau_Gouyre, Fournir_Eau_Tordre, Fournir_Eau_Gagnol, sont déclenchés en parallèle. Chacun de ces plans fait appel à des sous-plans qui sont exclusifs les uns des autres. Ils sont testés dans un ordre qui permet de fournir de l'eau au maximum si le plan le permet. Si le plan échoue, un plan plus restrictif est testé (Figure 65).



objectif	Fournir_Eau_Adhérent
Documentation	
Pas de temps	Jour
Déclencheur	Date>DebutIrrigation Volume> 2 000 000
Mise en veille	
Arrêt	Date>FinSemis ET Volume <1 500 000
Programme	DebitFourni=debitSouscrit

objectif	Fournir_Eau_Adhérent
Documentation	
Pas de temps	Jour
Déclencheur	Date>DebutIrrigation 1 500 000<Volume<2 000 000
Mise en veille	
Arrêt	Date>FinSemis ET Volume <1 500 000
Programme	Si TypeAgri=Semencier DebitFourni=debitSouscrit Sinon DebitFourni=debitSouscrit*2/3

Figure 65 : Plans exécutés en parallèle et en séquentielle

3 Dynamique du système

MangaLère est un simulateur à événements discrets, chaque agent a sa propre logique temporelle, deux agriculteurs produisant des cultures différentes auront des calendriers d'actions différents. Un contrôleur général (Annexe 3.4) gère un agenda (Annexe 3.5). Un élément de l'agenda est un rendez-vous qui va permettre d'activer un ou plusieurs agents. Un exemple de rendez-vous peut réveiller un Agriculteur particulier, ou tous les Agriculteurs qui cultivent du maïs, à une date donnée. L'occurrence de ces événements provient de messages envoyés par chaque agent qui anticipent de façon datée une ou plusieurs activités particulières. Il n'y a donc pas prise en compte de la gestion en parallèle des agents.

A chaque fois qu'un agent est réveillé par le contrôleur général, il actualise son état interne, il exécute les actions correspondant aux intentions en cours et renvoie au contrôleur une date de rendez-vous, date à laquelle il souhaite être réactivé. Le contrôleur reclasse alors son agenda. Dans cette approche, la question des conflits entre actions concurrentes ne se pose pas. Dans l'hypothèse où des agents souhaitent être activés en même temps, ils seront traités séquentiellement en respectant leur ordre d'arrivée dans l'agenda.

4 Les données Agroclimatiques

Le système MangaLère est constitué (i) d'un modèle d'agent (précédemment défini), (ii) d'un modèle climatique, (iii) d'un modèle agronomique pour simuler les besoins en eau des cultures en fonction des années climatiques.

4.1 Les données climatiques

La région d'étude contient un nombre important de données climatiques. Nous disposons d'un fichier de données climatiques journalières sur les trente dernières années. Ces données nous informent de la température minimale, la température maximale et les précipitations.

4.2 Modèle agronomique : besoin en eau des cultures

Ce modèle agronomique (bilan hydrique) provient du simulateur IRMA [Leroy *et al.* 1996].

L'état hydrique du sol et la couverture des besoins en eau des cultures sont simulés à l'aide d'un modèle classique de bilan hydrique à deux compartiments (Figure 66).

La réserve utile du sol (RU) est décomposée en une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve de survie (RS). Tant que la RFU n'est pas épuisée, les besoins en eau de la culture sont couverts en totalité. Si la RFU est épuisée, la culture mobilise la réserve de survie ; sa consommation en eau est alors réduite par rapport à ses besoins et un stress hydrique apparaît. Ce stress est d'autant plus fort que la réserve de survie est entamée.

Les besoins en eau de la culture (ETM) sont estimés à partir de la demande climatique (ETref) et des coefficients culturaux (k) calés sur le cycle de la culture :

$$ETM(j) = k(j) \cdot ETref(j).$$

La consommation réelle de la culture (ETR) est calculée à partir de ses besoins en eau (ETM) et de l'état de la réserve en eau :

$$\text{si } RU(j) > RS \quad (\text{ce qui est équivalent à } RFU(j) > 0)$$

$$ETR(j) = ETM(j)$$

$$\text{sinon} \quad ETR(j) = RU(j) * (1 - e^{-ETM(j)/RS})$$

A partir des hypothèses sur le niveau des réserves, l'évolution des différents termes du bilan hydrique est calculée à partir de la relation :

$$RU(j) = RU(j-1) + Pluie(j) + Irrigation(j) - ETR(j) - Drainage(j)$$

Le drainage a lieu quand la RU est saturée :

$$Drainage(j) = \max(0, RU(j-1) + P(j) + Irr(j) - ETR(j) - RU(j))$$

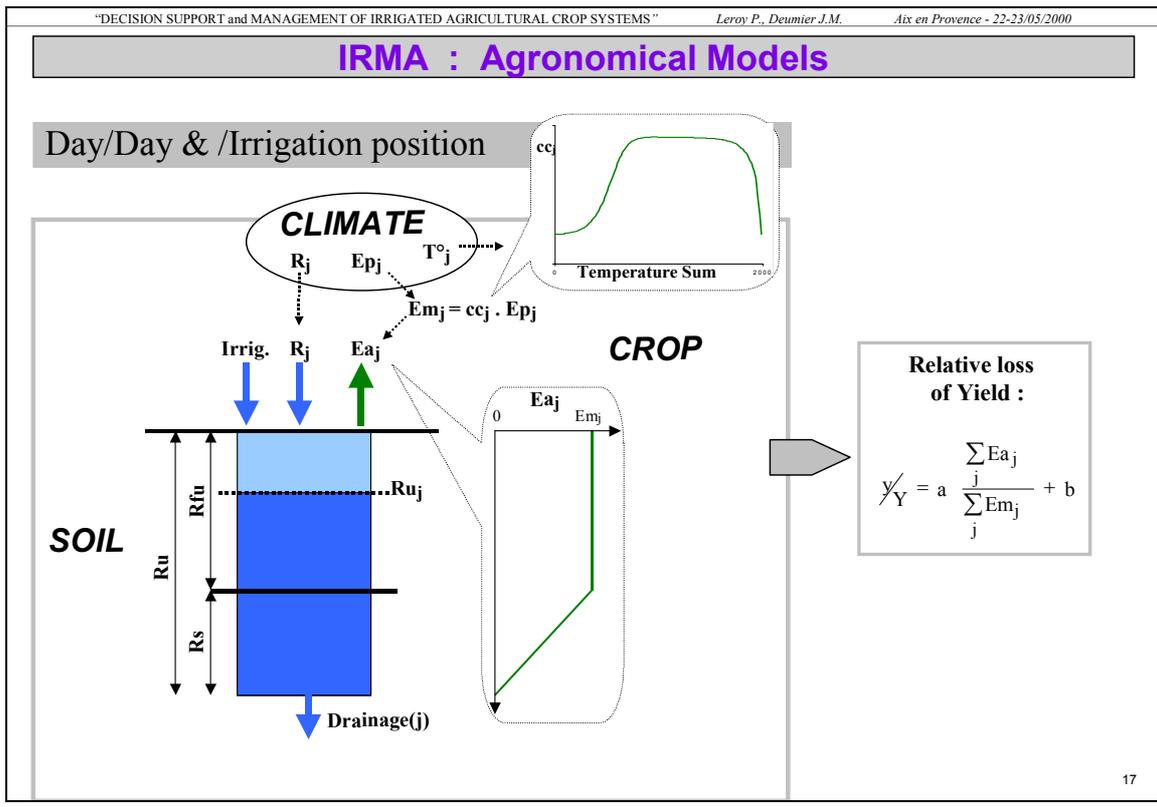


Figure 66 : Modèle agronomique dans IRMA [Leroy *et al.* 1996]

5 Implémentation

Le modèle est développé en C++ (sous Builder5). C++ n'est probablement pas le langage orienté objet le plus utilisé dans le développement d'application SMA. La plupart des programmeurs le considèrent comme le plus complet des langages orientés objet. Pour certains, Java est le standard émergent, langage du futur, au moins dans le domaine du développement pour Internet. Il est toutefois important de noter que l'essentiel de la syntaxe de Java est tiré de C++. Un des avantages de C++ s'observe au niveau de la rapidité de résolution des opérations arithmétiques plus rapide que sous Java.

Le choix de ce langage provient aussi des nombreuses applications développées dans notre équipe en C ou C++, ce qui fournit une aide non négligeable en cas de problème.

6 Conclusion

Le système MangaLère propose une modélisation des stratégies des différents acteurs, principalement les agriculteurs et le fournisseur d'eau. Cette approche nous a permis de structurer la connaissance sous forme de plans. Ce formalisme a servi de base de discussion avec les décideurs locaux (Représentants de l'état, fournisseur d'eau,...).

Nous avons proposé une modélisation basée sur les concepts BDI. Cette approche est particulièrement adaptée à notre problématique car propose (i) un concept de planification au sens Intelligence Artificielle du terme, c'est à dire le processus de formulation d'un programme d'actions pour atteindre certains buts visés, (ii) la prise en compte d'une vision partielle et imparfaite de l'agent sur son environnement, (iii) une modélisation applicable à des agents évoluant dans un environnement changeant. En nous appuyant sur le cas concret de la gestion de la Lère, nous avons testé l'adéquation de ce formalisme à la représentation des acteurs concernés et commencé à développer une ontologie propre au problème posé.

Chapitre 8 : Conclusion et Perspectives

Rappelons que l'accès à la ressource en eau au niveau mondial est un enjeu majeur. La gestion et le respect de cette ressource dans une perspective de durabilité sont des problèmes clés. Généralement, la prise en compte de ces enjeux en particulier dans les pays développés et les décisions qui en découlent au sein des institutions internationales et nationales font appel à une instrumentation importante. La mise en œuvre de celle-ci repose sur des équipes de spécialistes généralement à la recherche d'un optimum pour définir des directives générales.

Toutefois, la mise en œuvre concrète de ces directives se décline au niveau local. L'échec ou la réussite d'une directive édictée à un niveau institutionnel dépendent de décisions prises à ce niveau local et résultent de négociations entre les différents acteurs concernés. Les résultats de ces négociations peuvent être déterminés par des rapports de forces déséquilibrés.

Ma thèse porte sur le développement d'un instrument pour l'aide à la négociation des acteurs impliqués au niveau local. Ces acteurs sont des agriculteurs, des distributeurs d'eau, des industriels, la puissance publique, des agences de bassin, des associations de protection de la nature...L'objectif est de fournir méthodes et instruments pour faciliter une négociation dont l'enjeu est de déterminer les règles d'accès à cette ressource pour les différents utilisateurs.

Cet instrument d'aide à la négociation a pour vocation de permettre (i) une vision globale du système à gérer, (ii) une vision partagée par les différents acteurs, (iii) une utilisation par les acteurs eux-mêmes pour tester différents scénarios. L'hypothèse sous-jacente est que la recherche d'une représentation commune constitue un support pertinent au processus de négociation. L'accent est donc mis sur l'interaction entre acteurs concrètement confrontés au problème et instrumentation. Ceci implique une association précoce de ceux-ci à la conception et à l'expérimentation du système. Les premières expérimentations ont suscité une mise en commun des représentations des différents acteurs et initié l'émergence d'un modèle générique.

Il s'agit donc d'aider autant chaque individu dans la recherche d'une satisfaction que d'aider le collectif d'acteurs pour émerger une réglementation admissible par tous.

Le problème à l'origine de nos travaux nous a conduit naturellement à rechercher les applications de l'approche SMA pour l'aide à la négociation et à la modélisation d'un processus de négociation. A l'évidence, ce champ fait l'objet de nombreuses recherches, mais elles sont menées le plus souvent à un niveau académique. Comme avantages de telles approches, à l'instar de Jennings *et al* [Jennings *et al.*, 2000] nous formulerons les suivantes : contrairement aux modèles basés sur la théorie des jeux, la rationalité complète n'est pas une hypothèse nécessaire et ces modèles reposent généralement sur les rationalités limitées et procédurales. Il ne s'agit donc pas de rechercher une solution optimale. Un grand nombre de ces travaux reposent sur la planification, au sens d'un processus de formulation d'un programme d'actions pour atteindre des buts visés. Ils font souvent références aux concepts développés dans l'architecture de type BDI, c'est à dire les croyances (*Belief*), les buts (*Desire*) et les plans pour satisfaire ces derniers (*Intentions*).

Les différentes approches que nous avons eues à notre connaissance portent sur des processus de négociation unique dans le temps de la simulation. Dans le problème qui nous concerne, cette hypothèse n'est pas applicable. En effet, le déploiement de dispositif contractuel tout au long d'une campagne fait typiquement partie des solutions à débattre. Ainsi, le contexte climatique de l'année peut amener les agriculteurs à renégocier leurs droits à l'usage de l'eau.

Dans le contexte de la gestion de l'eau, deux niveaux de négociation sont à considérer : (i) le premier niveau est collectif et concerne généralement plusieurs campagnes d'irrigation. Il débouche sur les règles générales qui vont servir de base, par exemple, à la contractualisation entre les agriculteurs et les fournisseurs d'eau. (ii) le second niveau correspond à des renégociations individuelles liées au contexte climatique particulier de l'année.

Deux types d'approches nous paraissent possibles, (i) Utiliser des modèles où le processus de négociation est endogène et qui fournissent les plans résultant de ce processus (par exemple théorie des jeux, modèles à base d'apprentissage automatique ou des modèles classiques de négociation fondés sur des protocoles) (ii) Utiliser des modèles de simulation de règles issues de la négociation entre acteurs « humains ». L'objectif est alors une expérimentation sur modèle proche d'un apprentissage dans l'action (« *learning by doing* »). C'est à travers des simulations itératives que les acteurs pourront faire converger le processus vers des solutions satisfaisantes.

Dans la perspective d'amplifier le raisonnement des décideurs [Courbon, 1993] nous n'avons pas retenu d'endogénéiser le processus de négociation au niveau collectif. En effet il nous paraît important de laisser la possibilité aux acteurs de conduire eux-mêmes le processus de négociation. Concernant les renégociations en cours de campagne, l'endogénéisation du processus de négociation paraît raisonnable mais devra être testée.

La construction de l'instrument de simulation s'est faite en deux phases :

Une première maquette (Manga) concerne une situation simple de gestion (type nappe). Avec ce modèle, s'est instauré un dialogue pour déterminer ses forces et ses faiblesses. Il nous a permis en particulier de repérer les acteurs pertinents, leurs missions (par exemple pour le fournisseur d'eau, satisfaire au mieux ses clients et équilibrer son budget) et les interactions mises en œuvre. D'autre part, Manga a permis d'explorer différents corps de règles d'attribution de l'eau et attitudes des agriculteurs face au risque climatique. Concernant les règles, des tests ont porté sur la visibilité pour l'ensemble des agriculteurs des quantités d'eau octroyées par le fournisseur d'eau. L'accès par les agriculteurs à cette connaissance s'est accompagné d'une diminution de la disparité et d'une efficacité plus grande de la ressource en terme de marge globale.

Toutefois passer à des situations de gestion plus réalistes mais plus complexes, nous a conduit à enrichir fortement la représentation des acteurs et à concevoir une deuxième maquette (MangaLère). Dans cette perspective, les architectures d'agents fondées sur des plans nous sont apparues séduisantes et particulièrement les concepts BDI (*Beliefs, Desires and Intentions*). En effet, trois éléments clés nous paraissent particulièrement adaptés : (i) un concept de planification au sens Intelligence Artificielle du terme, c'est à dire le processus de formulation d'un programme d'actions pour atteindre certains buts visés, (ii) la prise en compte d'une vision partielle et imparfaite de l'agent sur son environnement, (iii) une modélisation applicable à des agents évoluant dans un environnement changeant.

Les avancées conceptuelles en modélisation initiées en IAD et plus particulièrement sur la négociation et sur l'architecture BDI ont animé nos réflexions. Mais le souci d'épouser au maximum le problème de la gestion de l'eau nous a conduit à considérer comme prioritaire une autonomie complète en terme d'implémentation. Cette implémentation est en cours. En nous appuyant sur le cas concret de la gestion de la Lère, nous avons testé l'adéquation du formalisme BDI à la représentation des acteurs concernés et commencé à développer une ontologie propre au problème posé. Notre contribution vise à confronter le concept d'agent BDI à un problème de grande taille relevant des sciences sociales. En effet, à notre connaissance, le

concept d'agent BDI a été utilisé essentiellement dans des développements liés à la robotique, à la circulation de flux physique (gestion d'aéroport par exemple) ou informationnel (Internet, Base de données,...). Par ailleurs, peu d'applications mettent en oeuvre une population de grande taille d'agents hétérogènes.

La validation du système

La validation des données permet de certifier que les données représentent le système réel et constituent le meilleur test pour le modèle. Une des validations que nous avons utilisée dans notre approche est la validation « humaine » (*Face Validity*). Elle se fait à l'aide des connaissances de personnes concernées par le problème et familières de celui-ci. On valide par des tests d'entrée sortie pour vérifier les résultats du modèle avec ces personnes, souvent des experts du domaine.

La validation opérationnelle permet de démontrer que les capacités du modèle sont valables dès le départ c'est à dire au niveau du processus de construction et ceci jusqu'à ce que le niveau de performance souhaité soit atteint. La validation opérationnelle s'est faite par une validation interne du modèle en utilisant un ensemble de données tests pour s'assurer si les sorties sont consistantes à chaque pas de la simulation.

Perspectives

A notre sens, les perspectives se situent à deux niveaux : (i) compléter les travaux de cette thèse, (ii) rechercher des contacts avec des disciplines permettant d'approfondir certaines questions que nous nous posons.

Des travaux à poursuivre...

Ils concernent l'implémentation du modèle MangaLère, son expérimentation auprès des utilisateurs potentiels et son évolution en relation avec les questions, requêtes et difficultés rencontrées.

- *L'implémentation du modèle est à poursuivre avec les hypothèses actuelles*
 - Une représentation de tous les agents sous un formalisme proche de celui BDI.

- Des ontologies spécifiques aux différentes classes d'acteurs (en effet chacune a des préoccupations spécifiques) avec une base commune leurs permettant de communiquer. Nous reprendrons l'ontologie de base formulée par Sierra *et al.*, [Sierra *et al.*, 1997] en l'enrichissant et en l'adaptant pour rendre compte des termes et concepts mobilisés par les acteurs. Ce travail va de pair avec la conception d'un langage dédié.
- Une dynamique du système répondant au principe de la simulation à événements discrets.
- Un mécanisme de déclenchement de plans en parallèle.

- *Validation du système*

Une validation du modèle par des données historiques permettra de caler le modèle sur des résultats connus par des experts du domaine. Ces données pourront être des données pour des données climatiques exceptionnelles, de type 1976 par exemple.

La validation opérationnelle du système pourra s'envisager par (i) une comparaison du modèle avec des modèles déjà validés, (ii) par une analyse de flexibilité du modèle c'est à dire observer comment le modèle évolue face aux modifications.

Outre la validation du simulateur proprement dit, on insistera sur la validation par l'usage, c'est-à-dire l'appropriation de l'instrument par les acteurs concernés par le problème. Une utilisation du modèle avec les acteurs impliqués dans la gestion du bassin de la Lère permettra d'analyser les plans et les règles actuelles, de les aménager ou d'en imaginer d'autres. Ce retour sur le terrain auprès des acteurs qui ont participé à la réflexion autour de Manga et MangaLère, est le premier test d'adéquation du modèle aux problèmes rencontrés dans la réalité. D'autres expérimentations sont à imaginer pour confronter le modèle à d'autres situations et à des acteurs différents de ceux à l'origine de MangaLère.

- *Elargissement du modèle*

L'expérimentation et la réflexion menées avec les acteurs ayant participé aux différents tests de réglementation amèneront sans doute à enrichir notre modèle. On peut imaginer par exemple, que la renégociation en cours de campagne soit particulièrement importante et nécessite des développements informatiques nouveaux. Si l'existence de liens entre acteurs se révèle déterminant dans leurs raisonnements, il sera nécessaire d'envisager des réseaux d'acointances. La rencontre de conflits entre groupe d'une même classe d'agents nous conduira à intégrer des

mécanismes de gestion de conflits dans le simulateur. Pour illustrer ce dernier point, un exemple pris dans le bassin de la Lère concerne le différend entre les agriculteurs en amont de la rivière pompant au détriment des agriculteurs en aval. Celui-ci, n'est qu'un exemple observé, la confrontation à des situations concrètes se chargera de nous en fournir d'autres.

Des partenariats scientifiques à établir...

- L'analyse de l'appropriation de l'instrument et des concepts sous-jacents pose le problème de la validation sociale. A ce titre, au delà des expérimentations que nous sommes en mesure de conduire dans des situations concrètes, comme celle du bassin de la Lère, il serait très enrichissant de travailler avec des chercheurs de disciplines telles que l'ergonomie cognitive ... disposant d'un autre corpus de connaissances que le notre et susceptible de le mobiliser sur un objet de recherche commun.
- Nous n'avons pas investi les domaines de l'IAD traitant de négociation automatique qu'il s'agisse des courants issues de la théorie économique ou ceux plus sociologiques débouchant sur des protocoles classiques de négociation (*Contract Net Protocol*, Négociation basée sur l'argumentation, ...) Il nous paraît toutefois intéressant de confronter notre approche avec celles-ci. Cela permettrait d'étudier des archétypes de situation de négociation afin de faire émerger des questions fondamentales à concrétiser dans un modèle plus proche de la réalité.
- Au niveau de la réflexion sur les règles, des approches de type apprentissage (programmation génétique, apprentissage par renforcement) permettraient éventuellement de confronter des propositions d'acteurs voire d'experts à des solutions respectant l'hypothèse d'optimalité.

Références bibliographiques

- Abraham C., Thomas A. (1966) *Microéconomie. Décisions optimales dans l'entreprise et la nation*. Dunod.
- Aho A.V, Sethi R., Ullman J.D. (1986) *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Aknine S., Pinson S., Shakun M. F. (2000) "Des méthodes de coordination Multi-agent par Formations de coalitions" 8e Journées Francophones d' Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'00), Paris, Hermes.
- Aknine S. (2002) "Strategies and Behaviours of Agents in Multi-phased Negotiations" [EC-Web 2002](#): pp.17-26.
- Anderson J.R. (1989) "Simulation : methodology and application" *Agricultural economics*, pp.3-54.
- AQUAE : Action Scientifique Structurante AQUAE du CEMAGREF et de l'INRA : *Outils d'aide à la gestion concertée des ressources en eau*. (http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/Labo/activite_recherche/projets/Projets_en_cours/ASSAQUAE/ASSAQUAE.htm)
- Argyris C., Schön D.A. (1978) *Organizational learning: a theory of action perspective*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Aronde C., Girardin P. (1998) "Sorting cropping systems on the basis of their impact on groundwater quality" Université Paris-Dauphine, *Document du LAMSADE*, N° 158.
- Aronde C., Girardin P. (2000) "Sorting cropping systems on the basis of their impact on ground water quality" *European Journal of Operational Research* Vol. 127, pp.467-482.
- Asa (1999) Collectif ASA. Plates-Formes de développement de systèmes multi-agents. *Bulletin de l'Association Française d'Intelligence Artificielle*, n° 39.
- Attonaty J.M, Chatelin M.H., Poussin J.C. (1990) "L'évolution des méthodes et langages de simulation" *Modélisation systémique et système agricole. Décision et organisation*. Eds. J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne. INRA Editions.
- Attonaty J.M, Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G. (1991) "Advice and decision support systems in agriculture: new issues" *Decision Support Systems: IFORS- SPC 1*, Bruges, March 26-29.

- Attonaty J.M., Leroy P. (1997) "Gestion de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole" Colloque INRA : AIP Eau, Paris 1997/01/28-29 – INRA Paris – Le programme valorisation et protection des ressources en eau 1992-1995. Tome 2 : Valorisation des ressources en eau. Résultats, 250p – Paris : INRA, pp. 1-60
- Attonaty J-M., Chatelin M-H., Garcia F. (1999) "Interactive simulation modelling in farm decision-making" *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 22, pp. 157-170.
- Axelrod R. (1997) "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences" *Simulating Social Phenomena*, Hegselmann R. and Terna P. (Eds.) Berlin: Springer, pp. 21-40.
- Axtel R. (2000) "Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences" Santa Fe University. Broking Institution : Center on Social and Economics Dynamics, 22 Pp.
- Baeijs C., Demazeau Y. (1996) "Les organisations dans les systèmes multi-agents", *Journée PRC-GDR IA*, Toulouse.
- Balbo F. (1999) ESAC : Un modèle d'Interaction Multi-Agent utilisant l'Environnement comme Support Actif de Communication. Application à la gestion des transports urbains, Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine.
- Balci O. (1997) "Verification, validation and Accreditation of simulation models" *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference* (Atlanta, GA, Dec. 7-10). IEEE, Piscataway, NJ, pp. 135-141.
- Barreteau O. (1998) Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamiques des interactions et modes d'organisation. Thèse de doctorat, Ecole nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF).
- Barreteau O., Bousquet F. (1999) "Systèmes multi-agents et viabilités des systèmes irrigués" *Technique et science informatiques*, Vol. 19, N°7, pp.943-962.
- Barreteau, O., Bousquet, F. (2000) "SHADOC: a Multi-Agent Model to tackle viability of irrigated systems" *Annals of Operations Research*, Vol 94, pp. 139-162.
- Barthelemy, O., Moss, S., Downing, T., Rouchier, J. (2001) "Policy Modelling with ABSS: The Case of Water Demand Management" CPM Report No. 02-92. <http://cfpm.org/cpmrep92.html>
- Beer M., d'Inverno M., Luck M., Jennings N., Preist C., Schroeder M. (1998) "Negotiation in Multi-Agent Systems" Workshop of the UK Special Interest Group on Multi-Agent Systems (UKMAS'98).

- Béron F., Carpuet B., Glize P., Régis C. (1996) "La résolution de conflit sans négociation : modèle et évaluation" Quatrième Journées Francophones d'Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'96) Hermès.
- Boissier O. (2001) "Modèles et architectures d'agents" *Principes et architectures des systèmes multi-agent.*, J-P Briot et Y.Demazeau, (Eds.) Hermes, Vol. 1, pp. 71-107.
- Boissier O., Guessoum Z., Ocello M. (1999) "Plates-Formes de développement de systèmes multi-agents" *Bulletin AFIA.*, Vol. 39.
- Bond A. H. and Gasser L. (1988) *Readings in distributed artificial intelligence.* Kaufmann M., (Eds.) San Mateo, California.
- Botkin D. B. (1993) *Forest Dynamics.* New York: Oxford University Press.
- Bourgine P., Lemoigne J-L. (1990) "Les bonnes décisions sont-elles optimales ou adéquates ?" XII congrès européen de recherche opérationnelle, Athènes, 25-29 juin.
- Bourjot C., Chevrier V., Bernard A., Kraft B. (1999) "Coordination par le Biais de l'Environnement: une Approche Biologique" Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'99), Hermès.
- Bousquet F., Cambier C., Mullon C., Morand P., Quensièrè J., Pavé A. (1993) "Simulating the Interaction between a society and a renewable resource" *Journal of Biological Systems*, Vol 1, n° 2, pp. 199-214.
- Bousquet F. (1994) Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard- Lyon.
- Bousquet, F. (1997) "Usage des ressources renouvelables et modélisation des représentations. Une approche par les SMA" *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Elsevier, pp. 187-196.
- Bousquet F., et Le Page C. (2001) "Systèmes multi-agents et écosystèmes" *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, J-P Briot et Y.Demazeau, (Eds.) Paris : Hermes, Vol. 1, pp. 235-266.
- Boussetta S., El Fallah-Seghrouchni A., Haddad S., Moraitis P., Taghelit M. (1998) "Coordination d'agents rationnels par planification distribuée" *Revue d'Intelligence Artificielle*, Vol 12, n°1.

- Brandolese A., Brun A., Portioli-Staudacher A. (2000) "A Multi-Agent approach for the capacity allocation problem" *International Journal of Production Economics*, Vol. 66, pp. 269-285.
- Bratman M. E., Israel D. J., and Pollack M. (1988) "Plans and resource-bounded practical reasoning" *Computational Intelligence*, Vol. 4, pp. 349-355.
- Briot J.P. (2002) <http://www.poleia.lip6.fr/~briot/cours/intro-agents-iarfa01-02.pdf>
- Bui T. (1994) "Evaluating Negotiation Support Systems: A Conceptualization" *Proceedings of the 27TH Hawaii International Conference on System Science*, Maui.
- Bui T. Et Shakun M.F. (1995) "Negotiation Processes, Evaluationary Systems Design and NEGOCIATOR" *Group Decision and Negotiation*, Vol 5, pp. 4-6.
- Busetta P., Ramamohanarao K. (1998) "The BDIM Agent Toolkit Design," Department of Computer Sciences, Victoria, Australia.
- Cahuc, P. (1988) *La nouvelle microéconomie*. Repères. Edition La découverte.
- Carley K.M. (1995) "Computational and Mathematical Organization Theory: Perspective and Directions" *Computational and Mathematical Organization Theory*, Vol 1, pp. 39-56.
- Carley K. M. (2002) "Intra-Organizational Computation and Complexity" *Companion to Organizations*, Joel A.C. Baum (Eds.) Blackwell Publishers.
- Carver N., Lesser V. (1992) "The Evolution of Blackboard Control Architecture" *Expert Systems with Applications* Vol.7, pp.1-30.
- Cassandras C. and Lafortune S. (1999) *Introduction to discrete event systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Chaib-Draa, B., Moulin P. (1987) "Architecture for Distributed Artificial Intelligent Systems" *IEEE Montréal*, pp. 64-69.
- Chaib-Draa, B. (1996) "Interaction between Agents i Routine, Familiar and Unfamiliar situation" *International Journal of Cooperative Information Systems*, Vol 5, pp. 1-25.
- Chaib-Draa B., Jarras I., Moulin B. (2001) "Systèmes multi-agents : principes généraux et applications" *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, J.-P. Briot et Y. Demazeau (Eds.) Hermès.
- Chaib-Draa B., Gageut L. (2002) "Aspects formels des Systèmes Multi-Agents" *Organisation et applications des systèmes multi-agents*, Hermès, pp 109-132.

- Chang A.M., Han T.D. (1995) "Design of an Argumentation-Based Negotiation Support System" *Decentralized A.I. 3*, E. Werner et Y. Demazeau (Eds.), pp. 89-198.
- Chang M. K., Woo C. C. (1992) "SANP: A Communication level Protocol for Negotiation" *Decentralized A.I. 3*, E. Werner et Y. Demazeau (Eds.), pp. 31-51.
- Charnes A., Cooper W. W. (1959) "Chance-Constrained Programming" *Management Science*, Vol. 6, pp. 73-79.
- Chatelin M-H., Aubry C., Leroy P., Papy F., Poussin J-C. (1993) "Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. Le cas des exploitations en grande culture" *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n° 28.
- Checkland P., Scholes J. (1993) *Soft System Methodology in Action*. John Wiley, Chichester, 329 Pp.
- Chi R. T. H., Carando P., Whinston A. B. (1992) "MEDSS: A multi-agent environmental decision support system framework for model management" *Annals of Operations Research*, Vol. 38, pp. 97-136.
- Choumette F., Colard F. (1997) "Histoire de la théorie des jeux" <http://perso.wanadoo.fr/frederic.colard/theojeux/theojeux.html>.
- Collinot A., Ploix L., Drogoul A. (1996) "Application de la méthode Cassiopée à l'Organisation d'une équipe de Robots" Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'96), Hermès.
- Conte R. (1997) "The necessity of intelligent agents in social simulation" *Applications of Simulation to Social Sciences*. Ballot G. and Weisbuch G., (Eds.) France: Hermes, pp. 19-38.
- Coquillard P. and Hill D. R. C. (1995) *Modélisation et simulation d'écosystèmes*. Paris: Masson.
- Cordeiro-Netto O., Parent E., Duckstein L. (1993) "Evaluation of two MCDM techniques for staging the multicriterion design of long-term water supply in southern France" *Document du LAMSADE, N° 118*.
- Cordier M-O. (1999) Actes de la journée autour de la "validation de modèles traitant de processus complexes" INRA, Rennes.
- Corkill D.D., Gaallagher K.O., Murray D.E. (1986) "GBB: A generic Blackboard Development System" *American Association of Artificial Intelligence*. Philadelphia (AAAI 86), pp. 1008-1014.

- Courbon J-C. (1993) "Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision" *Dictionnaire Critique de la Communication*, L. Sfez (Eds.), PUF.
- Cyert R. M., March J. G. (1963) *A Behavioural Theory of the Firm* New Jersey: Prentice-Hall.
- Davis R., Smith R. G. (1980) "Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving" *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Bond A. H. and Gasser L., (Eds.), pp. 333-356.
- Demazeau Y. (1995) "From interactions to collective behaviour in multi-agents systems" First European Conference on Cognitive Science, Saint-Malo, France.
- d'Inverno M., Kinny D., Luck M., Wooldridge M. (1998) "A formal specification of dMARS" *Intelligent Agents IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, Singh M., Rao A., and Wooldridge M., (Eds.) Springer-Verlag, Vol. 1365, pp. 155-176.
- Donnelly J. R., Moore A. D. (1997) "Decision support: delivering the benefits of grazing systems research" 18th International Grass Congress, Australia.
- Doran J. (2001) "Intervening to Achieve Co-operative Ecosystem Management: Toward an Agent Based Model" *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 4, pp. 19.
- Drogoul A., Ferber J. (1992) "Multi-Agent Simulation as a Tool for Modelling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies" *Decentralized A.I. 4*, Elsevier North-Holland.
- Drogoul A. (1993) De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents. Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- Drogoul A. (2000) "Systèmes Multi-Agents situés" Mémoire d'habilitation à diriger des recherches (habilitation thesis), Pierre et Marie Curie (Paris 6).
- Duckstein L., Treichel W., El Magnouni S. (1993) "Multicriterion analysis of groundwater management alternatives" Université Paris-Dauphine, *Document du LAMSADE, N° 114*.
- Duckstein L., Eder G., Nachtnebel H.P. (1994) "Ranking water resources alternatives and criteria by multicriterion Q-analysis: an austrian case study" *Document du LAMSADE, N° 83*.

- Durfee E. H., Moss S. (1997) "Modelling Bounded Rationality using Evolutionary Techniques" AISB'97 workshop on Evolutionary Computation, Manchester, UK.
- El Fallah Seghrouchni A., Haddad S., Mazouzi H. (1998) "Observation répartie et analyse des interactions dans un système multi-agents" Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'98), Hermès.
- El Fallah Seghrouchni A., Haddad S., Mazouzi H. (2001) "A formal study of interactions in multi-agent systems" *International Journal of Computers and their Applications*, Vol 8, pp. 23-32.
- Epstein M.E, Axtell R. (1996) *Growing Artificial Societies-Social Science from the Bottom Up*. Washington: Brookings Institution Press. Cambridge, MA: MIT Press.
- Erceau J., Ferber J. (1991) "L'Intelligence Artificielle Distribuée" *La Recherche*, Vol. 233.
- Espinasse B., Picolet G., Chouraqui E. (1997) "Negotiation support systems: a multi-criteria and multi-agent approach" *European Journal of Operational Research* Vol 103, pp. 389-409.
- Faratin P., Jennings N. R., Buckle P., Sierra C. (2000) "Automated negotiation for provisioning virtual private networks using FIPA-Compliant agents" PAAM'00.
- Faratin P., Klein M., Sayama H., Bar-Yam Y. (2001) "Simple Negotiating Agents in Complex Games: Emergent Equilibria and Dominance of Strategies" 8th International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-2001), Seattle, USA.
- Ferber J. (1995) *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. Paris.
- Feuillette S., Garin P., Le Goulven P., Bousquet F. (2000) "Une modèle d'exploration des dynamiques ressources-usages pour la gestion intégrée d'une nappe surexploitée ; Application à la nappe de Kairouan, Tunisie" Séminaire à Bamako : GIRN-ZIT.
- Feuillette S. (2001) "Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents" *Sciences et techniques du Languedoc*. Montpellier, France, 343 Pp.
- Ferrand N., Deffluent G. (1998) "Trois apports potentiels des approches "multi-agents" pour l'aide à la décision publique" Actes du colloque Gestion des territoires ruraux - Connaissances et méthodes pour l'aide à la décision publique., Antony, France.
- Fiany E., Treuil J.P., Demazeau Y. (1997) «Simulation de l'exploitation des périmètres irrigués : étude sur la coordination réactive par apprentissage dans l'utilisation d'une ressource»

Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'97), Hermès.

- Fianyó E., Boivin P. (2000) "Coupling Dynamical Physical Processes with Agents" GDN2000 - a conference on Group Decision and Negotiation, Glasgow, UK.
- Fianyó E. (2001) Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine.
- Fianyó E., Treuil J.P., Demazeau Y., Pinson S. (2001) - OSIRIS : une architecture multi-agents de couplage de processus physiques pour simuler le fonctionnement hydro-salin d'une région irriguée - 3ème conférence francophone de MODélisation et SIMulation, Troyes, France. In: A. Dolgui and F. Vernadat (Eds.) actes de MOSIM'01: Conception, analyse et gestion des systèmes industriels, volume 2. Ghent, SCS European Publishing House.
- Finin T., Labrou Y., Mayfield J. (1997) *KQML as an agent communication language*, J. Bradshaw (Eds.), *Software Agents*, MIT Press.
- FIPA. "Specification: Agent communication language" *Foundation for Intelligent Physical Agents*, <http://www.fipa.org/spec/fipa99spec.htm>, Draft-2.
- Fischer K., Müller J.P., Pischel M. (1995a) "Unifying control in a layered agent architecture" IJCAI95, Agent Theory, Architecture and Language Workshop 95, pp. 240-252.
- Fischer K., Müller J. P., Pischel M. (1995b) "Cooperative transportation scheduling: an application domain for DAI" *Journal of Applied Artificial Intelligence* (Special Issue on Intelligent Agents – Eds. M. J. Wooldridge & N. R. Jennings).
- Georgeff M., Pell B., Pollack M., Tambe M., Wooldridge M. (1999) "The Belief-Desire-Intention Model of Agency" *Intelligent Agents V*, vol. 1365, Müller J. -P., Singh M., and Rao A., Eds. Springer-Verlag Lecture notes in AI.
- Goodall D. W. (1972) "Building and testing ecosystem models" *Mathematical Models in Ecology*. Oxford : Blackwell.
- Guessoum Z., Ocelllo M. (2001) "Environnements de développement" *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, Briot J.-P. and Demazeau Y., (Eds.) Paris: Hermes Sciences.
- Hall R.I. (1984) "The natural logic management policy making: its implications for the survival of an organisation" *Management Science*, Vol. 30, pp. 905-927.
- Hahn U., Jarke M. (1991) "Teamwork Support in a Knowledge-Based Information System Environment" *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 17, pp 467-482.

- Hardaker J.B., Huirne R.B.M., Anderson J.R. (1997) *Coping with risk in agriculture*. CAB International, Wallingford.
- Hardin G. (1968) "The Tragedy of the Commons" *Sciences*, Vol. 162, pp. 1243-1248.
- Hatchuel A., Molet H. (1986) "Rational modelling in understanding aid aiding human decision making" *European Journal of Operational Research*, Vol 24, pp. 179-186.
- Herimandimby V., Randriarijaona E., Barreteau O., Bousquet F., Weber J. (1998) "Systèmes Multi-Agents et démarche patrimoniale : utilisation de jeux de rôles" *Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires du colloque SMAGET'98.*, Cemagref Editions.
- Hemidy L. (1992) *La Gestion, L'informatique et les Champs : Construction D'usages Et Transformation Des Pratiques Autour D'instruments De Gestion Agricole Informatisés*, Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique.
- Horvitz E.J. (1987) "Reasoning about beliefs and actions under computational resource constraints" *Proceedings of the 1987 Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence*.
- Horvitz E. (1989) "Reasoning about beliefs and actions under computational resource constraints" *Uncertainty in Artificial Intelligence*, Kanal L. N., Levitt T. S., and Lemmer J. F., (Eds.), Elsevier, Vol. 3, pp. 301-324.
- Huget M.P., Pinson S. (1998) "Une typologie des Modèles d'Agents" *Document du Lamsade, n° 110*.
- Jacquet Lagrèze E. (1989) *Techniques quantitatives de gestion et informatisation*. AFCET/Interfaces, Vol. 84, pp 3-13.
- Jefferson D. A. (1985) "Virtual Time" *ACM Transactions on Programming Languages and Systems.*, Vol. 7, pp. 404-425.
- Jelassi M. T. and Beauclair R. A. (1987) "An integrated framework for group decision support systems design" *Information & Management*, Vol. 13, pp. 143-153.
- Jennings N. R., Parsons S., Sierra C., Faratin P. (2000) "Automated Negotiation" *5th International Conference on The Practical Application of Intelligent Agent and Multi-Agent Systems (PAAM-2000)*, Manchester, UK.
- Jennings N. R., Faratin P., Lomuscio A.R., Parsons S., Sierra C., Wooldridge M. (2001) "Automated Negotiation: prospects, methods and challenge" *International Journal of Group Decision and Negotiation (GDN)*, Vol 10, pp. 99-215.

- Kersten G. (1995) "Simulation and Analysis of Negotiation Processes: The Case of Softwood Lumber Negotiations" *Proceedings of the 28th Hawaii International Conference on System Science*, Maui.
- Koning J.-L., François G., Demazeau Y. (1998) "An Approach for Designing Negotiation Protocols in a Multi-Agent System" *IFIP'98*, Vienne, Austria Budapest, Hungary.
- Koning J.-L. (2002) "A review on the interaction issues in agent-based marketplaces" *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol.1, pp 457-471.
- Kraus S., Sycara K., Evenchik A. (1998) "Reaching agreements through argumentation: a logical model and implementation", *Artificial Intelligence Journal*, Vol. 104, pp 1-69.
- Kraus S. (2001) "Automated Negotiation and decision Making in MultiAgent Environments", *Multi-Agent systems and Applications 9 th ECCAI Advanced Course, ACAI 2001 and Agent Link's 3rd European Agent Systems Summer School, EASSS 2001*.
- Kreifelts T., Von Martial F. (1991) "A Negotiation Framework for Autonomous Agents", *Decentralized A.I. 2*, Demazeau Y. and Müller J-P., (Eds.), pp. 71-87.
- Krishna V., Ramesh V.C. (1998) "Intelligent Agents for Negotiations in Market Games, Part1: Model" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 3.
- Kumar D., Shapiro S.C. (1994) "The OK BDI Architecture" *IJAIT, International Journal Of Artificial Intelligence Tools*, Vol. 3, pp. 349-366.
- Lander S. E. and R. Lesser. V. (1993) "Understanding the Role of Negotiation in Distributed Search Among heterogeneous Agents" *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93)*.
- Le Bars M., Attonaty J.M., Pinson S. (2002) "An Agent-Based Simulation for Water Sharing Between Different Users" *Xth Congress of the European Association of Agricultural Economists (EAAE)*, Zaragoza (Espagne).
- Le Bars M., Attonaty J.M. (2001a) "A Multi-Agent System to the Common Management of a Renewable Resource: Application to Water Sharing" *13th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, Dallas (USA), pp. 42-49.
- Le Bars M., Attonaty J.M. (2001b) "The Sharing of Water Between Different Users: A Multi-Agent System to Improve the Negotiation" *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM)*, Canberra (Australie), pp. 1153-1158.

- Le Ber F., Dury A., Chevrier V. (1998) "Un modèle multi-agent pour la simulation en agronomie : usages et comparaisons" *Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires du colloque SMAGET'98*, Cemagref Editions.
- Lee J., Huber M.J., Durfee E.H., Kenny P.G. (1994) "UM-PRS: An Implementation of the Procedural Reasoning System for Multirobot Applications" *AIAA/NASA Conference on Intelligent Robots in Field, Factory, Service and Space (CIRFFSS'94)*.
- Lepperhoff N. (2002) "SAM- Simulation of Computer-mediated Negotiations" *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 5, n°4.
- Leroy P., Balas B., Deumier J.M., Jacquin C., Plauborg F. (1996) "Water management at farm level" *The management of limited resources in water. Their agro-economical consequences, (CEE CAMAR 8001-CT91-0109 contract. Final Report 1991-1995) 89-151*.
- Le Strugeon E. (1995) Une méthodologie d'Auto-Adaptation d'un Système Multi-Agent. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.
- Lévine P., et Pomerol J-C. (1989) *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts*. Hermès, Paris.
- Levins R. (1966) "The strategy of model building in population biology" *American Sciences*, Vol. 54, pp 421-431.
- Lomi A., Larsen E.R, Freeman J.H. (2001) "Things change : dynamic resource constraints and system-dependent selection in the evolution of populations of organizations" Working paper, University of Bologna.
- Maes P. (1994) "Agents that Reduce Work and Information Overload" *Communications of the ACM*, Vol. 37, pp. 31-40.
- Maitre B., Laasri H. (1990) "Cooperating expert problem solving in blackboard systems: a case study" *Decentralized Artificial Intelligence*, pp. 250-263.
- Malheiro B., Oliveira E. (1995) "An Intelligent Distributed System for Environmental Management" *Environmental Informatics, Methodology and Applications of Environmental Information Processing*, Vol. 6.
- Mandiau, R., Grislin-Le Strugeon, E., Péninou, A. (2002) *Organisation et applications des SMA*. Paris, Hermes

- Martin S., Maurer L., Scherrer P. (2000) "La gestion volumétrique des irrigations : pratiques actuelles et potentialités" Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., Paris.
- Matos N., Sierra C., Jennings N. R. (1998) "Negotiation Strategies: An Evolutionary Approach" International Conference on MultiAgent Systems (ICMAS'98), Paris, 1998, pp. 182-189.
- Meurisse T., Vanbergue D. (2001) "Et maintenant, à qui le tour? Aperçu de problématiques de conception de simulations Multi-Agents" Laboratoire d'Informatique de Paris 6 - OASIS, Paris.
- Michard A. (2001) *XML Langage et applications*. Eyrolles.
- Misra J. (1986) "Distributed Discrete-Event Simulation" *Computing Surveys*, Vol. 18, n°1, pp.39-65.
- Montginoul M. (1997) Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information, et des acteurs. Thèse de doctorat, Université Montpellier.
- Moraïtis P. (1994) Paradigme Multi-Agent et Prise de Décision Distribuée. Thèse de Doctorat Université Paris Dauphine.
- Morardet S., Hanot S. (2000) "La gestion volumétrique de l'eau en Beauce: Impact sur les exploitations agricoles." Agence de l'Eau Loire-Bretagne.
- Moss S. (2001) "Game Theory: Limitations and an Alternative" *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 4, 17 Pp.
- Mousseau V., Slowinski R., Zielniewicz P. (1999) "ELECTRE-TRI 2.0 a : Methodological guide and user's manual" Université Paris-Dauphine, *Document du LAMSADE*, n° 111.
- Müller J. H. (1996) "Negotiation Principles" *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, O'Hare G. M. P. and Jennings N. R., (Eds.), John Wiley & Sons, pp. 211-229.
- Müller J.P. (1998) "Vers une méthodologie de conception de systèmes multi-agents de résolution de problème par émergence" Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'98). Hermès.
- Müller J.P. (2002) "Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents: Interaction, émergence et systèmes complexes" Habilités à Diriger des Recherches, Université Montpellier II.
- Nakamura M., Kurumatani K. (1995) "A mathematical model for the foraging of an ant colony and pattern formation of pheromone trail" *Fundamental Theories of Deterministic and*

Stochastic Models in Mathematicla Biology, Institute of Statistical Mathematics, pp 120-131.

Nash J. F. (1953) "Two Persons Cooperative Games" *Econometrica*, Vol. 21, pp. 128-140.

Von Neumann J., Morgenstern (1944) *The Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press.

Nitsch U. (1991) "Computers and the nature of the farm management" *European seminar on knowledge management and information technology*, Washington.

O'Hare G. M. P., Jennings N. R. (1994) *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Osborne M. J., Rubinstein A. (1994) *A Course in Game Theory*. MIT Press.

Padgham L., Winikoff M. (2002) "Prometheus: A Methodology for Developing Intelligent Agents" *Proceedings of the third International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, (AAMAS 2002), Bologna, Italy.

Parunak H.V.D., Savit R., Riolo R.L. (1998) "Agent-Based Modelling vs. Equation-Based Modelling: A Case Study and Users' Guide" *Proceedings of Workshop on Multi-agent systems and Agent-based Simulation*, Springer, pp. 10-25.

Pasquier G. (1995) *Modélisation multi-agents et simulation appliquée à un cas d'aménagement agricole micro-regional*. Mémoire DEA Université Paris Dauphine.

Paz Bétancourt B. (1997) *Un modèle multi-agent pour simuler les accords de réciprocité dans les Andes boliviennes*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1.

Petit M. (1982) "Théorie de la décision et comportement adaptatif des agriculteurs" *Formation des agriculteurs et apprentissage de la décision*, Actes de la journée du 21 janvier 1981, ENSSAA-INRA, pp. 1-36.

Pinson S., Louça J. A., Moraitis P. (1997) "A distributed decision support system for strategic planning." *Decision Support Systems*, Vol. 20, pp. 35-51.

Planeix G. (1999) *Etude de la problématique de l'évaluation dans le cadre de la rationalité procédurale : les systèmes a coopération étendue*. Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine.

Pollack M. (1992) "The uses of plans" *Artificial Intelligence*, Vol. 57, pp. 43-68.

Pollack M., Horty J. (1999) "There's more to life than making plans: plan management in dynamic, multi-agent environments", Vol. 20, pp. 71-84.

- Pomerol J-C (1997) "Artificial Intelligence and Human Decision Making" *European Journal of Operations Research*, Vol 99, pp 3-25.
- Popper K.R. (1972) "Two faces of common sense: an argument for commonsense realism and against the commonsense theory of knowledge" *Objective knowledge: an evolutionary approach*, Clarendon Press (Oxford), pp. 32-105.
- Quéau P. (1986) *Eloge de la simulation : de la vie des langages à la synthèse des images*. Edition Champ Vallon. Col. Milieux.
- Quenum G. (2002) [http : //www-poleia.lip6.fr/~safir/documents/quenum/rapport/node7.html](http://www-poleia.lip6.fr/~safir/documents/quenum/rapport/node7.html)
- Querou N., Tidball M., Jean-Marie A. (2000) "Equilibres conjecturaux et fonctions de réaction dans les jeux statiques et dynamiques" International Workshop: Modelling Agents Interactions in Natural resources and Environment Management., Montpellier.
- Qureshi M. E., Harrison S. R., Wegener M. K. (1999) "Validation of multicriteria analysis models" *Agricultural Systems*, Vol. 62, pp. 105-116.
- Rao A., Georgeff M. (1995) "BDI Agents: From Theory to Practice" Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95), Menlo Park, California, AAAI Press, pp. 312-319.
- Ricordel P.-M., Demazeau Y. (2000) "From Analysis to deployment: A Multi-Agent Platform Survey" Proceedings of 1st International Workshop on Engineering Societies in the Agents World (ESAW), ECAI'2000, A. Oinici R. Tolksdorf, and F. Zambonelli, (Eds.), Berlin, Germany, Springer Verlag pp 93-105.
- Rieu T. (1994) "Equipements Hydrauliques Collectifs et Réforme de la PAC : des conséquences conflictuelles? Le cas d'un projet de barrage en Charente" Actes et Communications INRA, Palacio V., (Eds.) Vol. 12, pp. 187-203.
- Rinaudo J.-D., Le Page C., Morardet S. (1998) "Un modèle Multi-Agent pour analyser le partage de la ressource en eau dans les périmètres irrigués au Pakistan" *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires du colloque SMAGET'98*, SMAGET'98, Cemagref Editions, pp. 293-310.
- Rosenschein J. S., Zlotkin G. (1994) *Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among Computer*. Boston : MIT Press.
- Roy B. (1992) "Science de la décision ou science de l'aide à la décision ?" *Revue Internationale de systémique*, Vol. 6, pp 497-529.
- Roy B., Bouyssou D. (1993) *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*: Economica.

- Roy B. (2000) "Réflexions sur le thème : quête de l'optimum et aide à la décision." Cahier du Lamsade n° 167. Université Paris-Dauphine, 21 Pp.
- Russel S., Norvig P. (1995) *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. Prentice hall, Series in Artificial Intelligence.
- Russel S. (1999) "Rationality and Intelligence" *Foundations of rational agency, Applied logic series*, Wooldridge M. and Rao A., (Eds.), Kluwer Academics Publishers, Vol. 14, pp 11-33
- Rykiel E. J. (1996) "Testing ecological models: the meaning of validation" *Ecological Modelling*, Vol. 90, pp. 229-244.
- Scott Morton M. S. (1971) "Management Decision Systems: Computer-based Support for Decision Making" MA: Division of Research, Graduate School of Business Administration. Boston: Harvard.
- Searle J.R. (1969) *Speech Acts*. Cambridge University Press.
- Sebenius J.K. (1992) "Negotiation Analysis: A Characterization and Review" *Management Science*, Vol 38.
- Sierra C., Jennings N.R., Noriega P., Parsons S. (1997) "A Framework for Argumentation-Based Negotiation" *Proc. 4th International Workshop on Agent Theory, Architectures and Languages*, Rhode Island, USA, pp 177-192.
- Simon H. E. (1947) *Administrative Behaviour*. MacMillan, New York.
- Simon H. E. (1958) "Rational choice and the structure of the environment," *Models of bounded rationality*, Vol. 2. Cambridge: MIT Press.
- Simon H. E. (1969) *The Sciences of the Artificial*. Cambridge: MIT Press.
- Simon H.E (1982) "From substantive to Procedural Rationality" *Models of Bounded Rationality*, Vol 2, pp 424-443.
- Simos J. (1990) "Evaluer l'impact sur l'environnement" *Presses polytechniques et universitaires romandes*.
- Smith R. G. (1988) "The Contract net Protocol: High-level Communication and Control in a Distributed Problem Solver" *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Bond A. H. and Gasser L., (Eds.), pp. 357-366.

- Srinivasa Raju K., Duckstein L., Arondel C. (2001) "Multicriteria analysis for sustainable water resources planning: a case study" Université Paris-Dauphine, *Document du LAMSADE*, n° 185.
- Stabell C. B. (1988) "Toward a Theory of Decision Support" *Decision Support System*, pp. 160-170.
- Sycara K. (1988) "Resolving goal conflicts via negotiation" 7th National Conference on Artificial Intelligence.
- Sycara K. (1992) "The PERSUADER" *The Encyclopedia of Artificial Intelligence*, Shapiro J., (Eds.) New York.
- SWARM (2001) "Tutorial" 2001.www.swarm.org/csss-tutorial/toc.html
- Tardieu H. (1999) "La valeur de l'eau en agriculture irriguée : une information économique nécessaire pour mieux réguler la gestion de l'eau et des productions agricoles dans un marché ouvert" CIID, Grenade, Espagne.
- Terna P. (1998) "Simulation Tools for Social Scientists: Building Agent Based Models with SWARM" *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 1, 9 Pp.
- Tesfatsion L. (2001) "Agent-Based Computational Economics: Growing Economics from the Bottom Up" pp. 31.
- Thoyer S., Morardet S., Rio P., Simon L., Goodhuc R., Rausser G. (2001) "A Bargaining Model to Simulate Negotiations between Water Users" *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 4, 23 Pp.
- Treuil J.P., Mullon C. (1997) *Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique* Editions Scientifiques et Médicales ELSEVIER.
- Treuil J.P. (1998) "AI modelling and Simulation of Ecological/Environmental Systems" *Lecture Notes in Computer Sciences 1416 Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*. A.P. del Pobil J. M. Moonis Ali (Eds.) Springer-Verlag, pp. 795 - 804.
- Vercouter L., Franchesquin N., Treuil J.-P., Pinson S. (1998) "Simulation multi-agents des processus de négociation en agronomie : un exemple de gestion locale sous contrainte collective." vol. 115, Pinson S., Ed. Document du LAMSADE. Université Paris-Dauphine.
- Weiss G. (1999) *Multiagent Systems*, MIT Press.

- Winikoff M., Padgham L., Harland J. (2001) "Simplifying the Development of Intelligent Agents" 14th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence (AI'01), Adelaide, Australia.
- Wooldridge M, Jennings N.R. (1994) "Agents Theories, Architecture and Language: A Survey" In: Intelligent Agents, ECAI'94, M. Wooldridge and N.R. Jennings (Eds.) LNAI 890, Springer Verlag, pp 1-32.
- Wooldridge M. (1999) "Intelligent Agents" *Multiagent systems*, Weiss G., Ed.: MIT Press.
- Wooldridge M., and Jennings N. (1999) "Software Engineering with Agents: Pitfalls and Pratfalls" *IEEE Internet Computing*, Vol. 3, issue 3.
- Wooldridge M., Ciancarini P. (2000) "Agent-Oriented Software Engineering: The State of the Art" *Lecture Notes in AI.*, Vol. 1957: Springer-Verlag.
- Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D. (2000) "The Gaia Methodology for agent-oriented analysis and design" *Autonomous Agents and multi-agent systems*, Vol. 3.
- Yu W. (1992) "ELECTRE TRI : aspects méthodologiques et manuel d'utilisation" Université Paris-Dauphine, *Document du LAMSADE*, n° 74.
- Zeng D. D., Sycara K. (1997) "Benefits of Learning in Negotiation" AAI-97.
- Zeng D. D., Sycara K. (1999) " Dynamic Supply Chain Structuring for Electronic Commerce Among Agents" *Intelligent Information Agents* Mathias Klusch, (Eds.) Springer.
- Zlotkin G., Rosenschein J. S. (1991) "Negotiation and goal relaxation" *Decentralised A.I.*, vol. 2, Demazeau Y. and Müller J.-P., (Eds.) Elsevier Sciences Publishers, pp. 273-285.
- Zlotkin G., Rosenschein J. S. (1993) "A domain theory for task oriented negotiation" 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence.

Liste des Figures et Tableaux

Figure 1 : Structure d'un système d'aide à la décision (DSS) [Chi <i>et al.</i> , 1992].....	28
Figure 2 : Dispositif de réunion mettant en œuvre un GDSS [Jelassi et Beauclair, 1987].	29
Figure 3 : La place du SMA développé dans l'aide à la décision d'un collectif.....	96
Figure 4 : Du modèle à la simulation : un processus non linéaire.....	34
Figure 5: Processus de simulation [Drogoul, 1992]	35
Figure 6 : Classification des systèmes de simulation [Cassandras et Lafortune, 1999].....	37
Figure 7 : Taxonomie de la vérification et validation pour les modèles de simulation orientés objet [Balci, 1997].....	41
Figure 8: Diagramme représentant le cycle de modélisation et la position des différents processus de validation : opérationnelle, conceptuelle, des données [Rykiel, 1996].....	42
Figure 9 Validation conceptuelle ou adéquation analytique.....	43
Figure 10 : Différences entre objets et agents [Briot, 2002].....	47
Figure 11 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents [Ferber, 1995].....	48
Figure 12 : Cycle Perception / Délibération/ Action d'un agent cognitif [Wooldridge, 1999].....	58
Figure 13 : Architecture InteRRap [Fischer <i>et al.</i> , 1995a]	60
Figure 14 : Facette AEIO au sein d'un agent [Boissier, 2001].....	63
Figure 15 Architecture BDI d'un agent.....	65
Figure 16: Architecture PRS [Georgeff <i>et al.</i> , 1999].....	68
Figure 17 : Architecture BDI [Rao et Georgeff, 1995] [Bratman <i>et al.</i> , 1988] [d'Inverno <i>et al.</i> , 1998].....	68
Figure 18: Structure générale du mécanisme de raisonnement. D'après [Pollack et Horty, 1999]	69
Figure 19 : Le cycle d'exécution d'un agent BDI [Winikoff <i>et al.</i> , 2001].....	71
Figure 20: Structure générale de Swarm [SWARM, 2001].....	77
Figure 21: Les différentes catégories de négociation et leurs structures. D'après Muller [Müller, 1996]..	84
Figure 22: Les différents types de négociation [Simos, 1990]	85
Figure 23: Graphe de transition des états de la négociation entre un manager et un contractant dans une extension du CNP. [Aknine <i>et al.</i> , 2000].....	89
Figure 24 L'espace de négociation [Jennings <i>et al.</i> , 2001].....	91
Figure 25 : Protocole de négociation basée sur l'argumentation [Sierra <i>et al.</i> , 1997].....	94
Figure 26: Organismes intervenant dans la distribution de l'eau d'irrigation en France [Montginoul, 1997]	100
Figure 27 : Les différents outils de la gestion de la demande [Feuillette, 2001]	103
Figure 28 : Principes du Simulateur d'irrigation [Attonaty et Leroy, 1997]	113
Figure 29 : Les Objets manipulés par le simulateur [Attonaty et Leroy, 1997].....	114
Figure 30 : Typologie d'agriculteurs.....	121
Figure 31 : Du système Manga à MangaLère : deux approches complémentaires dans l'élaboration d'un outil de simulation	122
Figure 32 Mobilisation du modèle MANGA.....	123
Figure 33: Structure d'un agent cognitif dans le modèle MANGA.....	132
Figure 34: Structure d'un agent réactif dans le modèle MANGA.....	134
Figure 35: Modélisation de la communication [Demazeau, 1995].....	135
Figure 36 : Schéma général de l'organisation du système MANGA.....	136
Figure 37: Modélisation UML simplifiée des différentes classes et objets	138
Figure 38: Courbes de réponse à l'eau des cultures.....	146
Figure 39 : Graphe de transition des états de la négociation	148
Figure 40: Les différentes phases de la négociation entre les agents Agriculteurs et l'agent Fournisseur d'eau.....	149
Figure 41 : De la simulation à l'analyse des résultats.....	153

Figure 42 : Interfaces utilisateurs qui permettent de fournir les données générales concernant l'ensemble des agents en début de simulation.	155
Figure 43 : Les différentes phases dans le modèle Manga	157
Figure 44 : Les différentes phases du modèle MANGA et les messages échangés.....	159
Figure 45 : Interfaces qui représentent les différents résultats des simulations.....	161
Figure 46 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (100% de type A).....	163
Figure 47 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (100% de type A).....	163
Figure 48 : Rendements obtenus par types d'années (100% de type A).....	164
Figure 49 : Quantités d'eau accordée, consommée, et restante par types d'années.....	164
Figure 50 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (100% de type B)	165
Figure 51 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (100% de type B).....	165
Figure 52 : Rendements obtenus par types d'années (100% de type B).....	166
Figure 53 : Quantités d'eau accordée, consommée, et restante par types d'années.....	166
Figure 54 : Besoin en eau et eau accordée par type d'année (50%A+50%B)	167
Figure 55 : Production globale en maïs irrigué par types d'années (50%A+50%B).....	167
Figure 56 : Disparités de rendements obtenus par types d'années (50%A+50%B)	168
Figure 57 : Evolution de la quantité globale produite et des disparités de rendements selon un scénario climatique.	169
Figure 58 : Schéma général représentant les agents BDI (Agents Agriculteurs, Fournisseur d'eau).....	174
Figure 59 : Grammaire (Backus-Naur Form)	179
Figure 60 : Diagramme de classes UML (simplifié)	180
Figure 61 : Architecture de l'agent Fournisseur d'eau (ASA)	182
Figure 62 : Caractéristiques, historique et définition d'un plan.....	183
Figure 63: Séquencement d'exécution d'un plan.....	184
Figure 64 : Plans exécutés en parallèle.....	185
Figure 65 : Plans exécutés en parallèle et en séquentielle	186
Figure 66 : Modèle agronomique dans IRMA [Leroy <i>et al.</i> 1996].....	189

Annexes

Annexe 1 : Zone du Contrat de Rivière Lère - Aveyron

Annexe 2 : Les Classes et méthodes de MANGA

Annexe 2.1 : La classe Agent

Définition de la Classe Agent

```
class CL_Agent
{
    CL_Agent();
    CL_Agent(int type,int no);
    int Type;                //Type de l'agent (Agriculteur, fournisseur d'eau,...)
    int No;                  // Le numéro dans le type considéré
    TList* LstBal;          // La boîte aux lettres contenant l'historique des messages reçus
    TList* LstPhotoc;       // Une liste constituant la mémoire des messages envoyés
};
```

Annexe 2.2 : La classe Message

Définition de la Classe Message

```
class CL_Message
{
    CL_Message(TObject *origine,int typeOrigine,int date, TObject *contenu,int typeContenu);
    CL_Message(CL_Message* message);

    TObject *Origine;       // Emetteur du message
    int TypeOrigine;        // nature du message (Demande eau, ...)
    TObject *Contenu;
    int TypeContenu;       //Contenu du message
    int Date;              //date de l'envoi du message
};
```

CLASS CL_DEMANDEEAU

```
{
    CL_DemandeEau(float eau,float surfMI);
    CL_DemandeEau (CL_DemandeEau* formEau);
    float QuantiteDemandee; // quantité d'eau demandée
    float SurfMAisIrrig;    //surface en maïs irrigué
};
```

Annexe 2.3 : La classe Agriculteur

Définition de la Classe Agriculteur

```
class CL_Agri:public CL_Agent
{
    CL_Agri();
    CL_Agri(int typeAgri,int no,float surface,int nbParcelle,char comportement);
```

```

int  TypeAgri;           //type de l'agriculteur (céréalier, maïsiculteur, ...)
int  No;                 //numéro de l'agriculteur
float Surface; //surface totale
int  NbParcelle;        // nombre de parcelles
char *Comportement;     // type de comportement de l'agriculteur
bool AFaitDemande;

bool  *Irrigant;        //irrigant oui / non
TList *LstParcelle;    // ensemble de ses parcelles
TList *LstNegocEau;
TStringList *SLLesSurface;

int  *NbParcIrrigable; //nombre de parcelles irrigables
int  *NbParcIrrigue;  // nombre de parcelles irriguées

// Calcule au moment de la demande Eau Initiale
float SurfMaisT;      //surface totale en maïs
float SurfMaisI;      //surface totale en maïs irriguée
float SurfI;          //surface irriguée

//Méthodes
int  DemandeEau (int phaseNegoc);           // demande en eau
int  DemandeEauIni (void);
int  DemandeEauIniSansVisibleImme (void); //Sans négociation modif après 3 ans
int  DemandeEauIniSansVisibleLent (void); // progressive
int  DemandeEauIniSansNonVisible (void); // répète les mêmes demandes
int  DemandeEauIniAvec (int typeAnnee); //Avec négociation

int  DemandeEauSuiivante (int phaseNegoc); //demande en eau suivante
int  AccepteEau (int phaseNegoc); //
int  RefaitDemandeEau(int phaseNegoc,float baisse);

void  EnvoiMessageEau(float qEau, float surfMaisI,int phaseNegoc); // envoie message
void  AssolDepart (void); //assolement de départ
void  Assolement(void);
void  CalculProduction(void); // calcul de production
void  TotalSurface(void);
void  CreerSimu(void);
void  DeciderParcelleIrrigue(void); // choix des parcelles irriguées
};
Méthode qui permet à chaque agriculteur de faire sa demande initiale en eau

CL_Agri::DemandeEauInitiale
{
// Calcul de la surface total en maïs
  laSurfaceMais=(float*)SLLesSurface->Objects[index];
  SurfMaisT=laSurfaceMais[t];

// Calcul de la surface irrigable
  SurfI=(Surface/NbParcelle)*NbParcIrrigable[t];
//Calcul de la surface irriguée
  SurfMaisI=min(SurfMaisT,SurfI);

```

```

switch(TypeNegociation)
{
  case 9:          //avec négociation en fonction de la surface en maïs irriguée
    switch(Comportement[t]) //en fonction du comportement de l'agriculteur
    {
      case 'A' :rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
      case 'B' :rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
      default : rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
    }
    break;
}
return rep;
}

```

Méthode de choix des parcelles irriguées

```

CL_Agri::DeciderParcelleIrrigee
{
  for (int i=0;i<LstParcelle->Count;i++) //pour l'ensemble des parcelles
  {
    if(parcelle->LaCulture[t]==Mais)      //si la parcelle a une culture de type maïs
    {
      parcelle->Irrigue[t]=true;          //l'agriculteur irrigue cette parcelle
      NbParcIrrigue[t]++;
      n--;
      if(n==0)return;
    }
  }
}

```

//Si nombre de parcelles irriguées est différent de zéro alors l'eau disponible par parcelle est égale à l'eau accordée par le fournisseur d'eau en fonction du nombre de parcelles irriguées. Pour l'ensemble des parcelles, on va chercher le rendement minimal, le rendement maximal et le besoin en Eau. En fonction de la surface de la parcelle et si elle est irriguée, on calcul pour une culture donnée la quantité produite .

Annexe 2.4 : La classe Fournisseur d'eau

Définition de la classe fournisseur d'eau

```

class CL_Syndic:public CL_Agent
{
  float* EauDispo;    // eau disponible
  float* DemandeIni;  // quantité d'eau initiale
  float* DemandeFin;  //quantité d'eau finale
  float* EauConso;    // quantité d'eau consommée
  float* EauAccord;   // quantité d'eau accordée
  float* QEauDispo;   //quantité d'eau disponible
  float* EauRestante; // quantité d'eau restante
  float* EauInutilisee; // quantité d'eau inutilisé

  void DemandeTotEau (int phaseNegoc); //calcul de l'eau total en fonction de la phase de
  négociation
}

```

```

void RepSurfIrrig(int phaseNegoc);           // réponse en fonction de la surface irriguée
void RepSurfIrrigPetits(int phaseNegoc);    // réponse favorisant les petits irriguants
void RepRegleDe3(void);                     // réponse au prorata de la demande
void TotalEauConso(void);                   // calcul de l'eau consommée
void CalculEauRestante (void);              // calcul de l'eau restante
};

```

Méthode pour attribuer l'eau en fonction de la surface irriguée

```

//1- Calcul total des surfaces en mais irrigué
//2- Calcul total des demandes en eau
//3-Si disponible > Total des demandes
// alors accorder toutes les demandes
//sinon
// accorder au prorata des surfaces en mais irrigué
//-----

```

```

CL_Syndic::RepSurfIrrig(int phaseNegoc)
{
    //calcul le total des demandes
    for (int i=0;i<LstBal->Count;i++)
    {
        if (demande->TypeContenu!=FORMEAU)continue;
        surfTotalM+= formEau->SurfMI;
        besoinTotEau+= formEau->Eau;
    }
    //répond en fonction de l'eau disponible
    for (int i=0;i<LstBal->Count;i++)
    {
        if (demande->TypeContenu!=FORMEAU)continue;

        if (besoinTotEau<=EauDispo[a])
            eauAccord=formEau->Eau;
        else
        {
            eauAccord=EauDispo[a]/surfTotalM*(formEau->SurfMI);
        }
        message=new CL_Message((TObject*)this,SYNDIC,An,(TObject*)qEau,QEAU); //envoi de la
        quantité d'eau allouée à chaque agriculteur
        agri->LstBal->Add(message);
    }
}

```

Annexe 2.5 : La classe Culture

Définition de la Classe Culture

```

class CL_Culture
{
    CL_Culture(AnsiString nom);

    AnsiString Nom;           //nom de la culture
    float RMinH,RMaxH;       / rendement min et max en année humide

```

```

float RMinS,RMaxS;           // rendement min et max en année sèche
float RMinTS,RMaxTS;        // rendement min et max en année très sèche
float BesoinEauH;           //besoin en eau en année humide
float BesoinEauS;           //besoin en eau en année sèche
float BesoinEauTS;          //besoin en eau en année très sèche

void Parametres(float &rMin,float &rMax,float &besoinEau);
float Rdt(float eauDispoParHa,float &eauConsoParHa); //méthode de calcul rendement

```

```

};
Méthode de calcul du rendement en fonction de la culture

```

```

CL_Culture::Rdt(float eauDispoParHa,float &eauConsoParHa)
{
    switch(TypeAn->Climat[An])    en fonction du cliamt
    {
        //cas d'une année humide , rendement min, rendement max, besoin eau
        case 0:rMin=RMinH;rMax=RMaxH;besoinEau=BesoinEauH;break;
        case 1:rMin=RMinS;rMax=RMaxS;besoinEau=BesoinEauS;break; // cas année sèche
        case 2:rMin=RMinTS;rMax=RMaxTS;besoinEau=BesoinEauTS;break; // cas année très sèche
    }
    if (eauDispoParHa==0) return  rMin;    // si pas d'eau disponible alors rendement sera égal au
    rendement min

    if(eauDispoParHa>besoinEau) eauConsoParHa=besoinEau;
    else          eauConsoParHa=eauDispoParHa;
    if(besoinEau==0)
    {
        return rMin;
    }
    rdt=rMin+(rMax-rMin)*eauConsoParHa/besoinEau;
    return rdt;
}

```

Annexe 2.6 : La classe Climat

Définition de la Classe Climat

```

class CL_TypeAn
{
    int NbTypeAn;
    int *Climat;
    int *ProbaTypeAnnee;
    int *ProbaCumTypeAnnee;
    void TirerAnnee(void);
};

```

Méthode qui permet de définir le type d'année climatique

```

CL_TypeAn:: TirerAnnee(void)
{
    //Climat =0 H 1 S 2 TS
    ProbaCumTypeAnnee[0]=ProbaTypeAnnee[0];

    for (i=1;i<NbTypeAn;i++)
        ProbaCumTypeAnnee[i]=ProbaCumTypeAnnee[i-1]+ProbaTypeAnnee[i];
}

```

```

for(t=0;t<AnMax;t++)
{
  a=random(100)+1;
  for(i=0;i<NbTypeAn;i++)
  {
    if(a<=ProbaCumTypeAnnee[i])
    {
      Climat[t]=i;
      break;
    }
  }
}
}
}

```

Annexe 2.7 : La Négociation entre agriculteurs et fournisseur d'eau

Demande d'eau initiale

```

CL_Agri::DemandeEauInitiale
{
// Calcul de la surface total en maïs
  laSurfaceMais=(float*)SLLesSurface->Objects[index];
  SurfMaisT=laSurfaceMais[t];

// Calcul de la surface irrigable
  SurfI=(Surface/NbParcelle)*NbParcIrrigable[t];
//Calcul de la surface irriguée
  SurfMaisI=min(SurfMaisT,SurfI);

  switch(TypeNegociation)
  {
    case 9:      //avec négociation en fonction de la surface en maïs irriguée
      switch(Comportement[t]) //en fonction du comportement de l'agriculteur
      {
        case 'A' :rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
        case 'B' :rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
        default : rep=DemandeEauIniAvec(SEC);break;
      }
      break;
  }
  return rep;
}

//-----
//demande en eau avec négociation (phase initiale)

int CL_Agri::DemandeEauIniAvec (int typeAnnee)
{
  //objectif rendement max en année sèche pour les agriculteurs de comportement A
  switch(typeAnnee) // en fonction du type d'année
  {
    case HUMIDE: // si l'année est humide
      objRdt=Mais->RMaxH;
      rdtMin=Mais->RMinH;

```

```

        rdtMax=Mais->RMaxH;
        besoinEauMax=Mais->BesoinEauH;
        break;
    }

    //Calcul du besoin en eau en fonction de l'objectif de rendement fixé

    if (objRdt>=rdtMax)BesoinEau[t]=besoinEauMax*SurfMaisI;
    else BesoinEau[t]=(objRdt-rdtMin)/(rdtMax-rdtMin)* besoinEauMax*SurfMaisI;

    EnvoiMessageEau(BesoinEau[t], SurfMaisI, phaseNegoc);
    //dire qu'on a envoyé une demande
    return 1;
}

```

//Demande d'eau suivante en fonction de la phase de négociation

```

int CL_Agri::DemandeEauSuivante (int phaseNegoc)
{
    switch(TypeNegociation)      // choix de négociation ou non
    {
        //case AVEC:      // cas avec négociation
        case 9:
            switch(Comportement[t])
            {
                case 'A' :rep=RefaitDemandeEau(phaseNegoc,0.1);break;
                case 'B' :rep=RefaitDemandeEau(phaseNegoc,0.2);break;
                default : ShowMessage("AgriNegoc DemandeEauSuivante Oubli" );break;
            }
            break;
        //case SANS:      //cas sans négociation
        case 2:

    }
    return rep;
}

```

Méthode qui permet de refaire une demande en eau si la quantité d'eau proposée ne le satisfait pas

```

CL_Agri::RefaitDemandeEau(int phaseNegoc,float baisse)
{
    //regarder quantité attribuée par le fournisseur d'eau

    //si satisfaisant-> ne pas envoyer message au syndicat
    //satisfaisant au moins 90% de la demande
    //La méthode renvoie 0. ...aucune nouvelle demande!
    //sinon soit modifier objectif rendement, soit assolement
    //pour A diminue ses exigences de 10%
    //envoyer nouvelle demande au syndic

    // la méthode renvoie 1.

    // reception du message de la part du fournisseur d'au

```

```

reponse=(CL_Message*)LstBal->Items[phaseNegoc-1];
qteProposee=qEau->Q; //quantité d'eau proposée

//mémoire de la négociation
negocEau=(CL_NegocEau*)LstNegocEau->Last();
negocEau->Accord=qteProposee;

//regarder la photocopie du dernier message de demande d'eau
noPhotoc=LstPhotoc->Count-1;
demande=(CL_Message*)LstPhotoc->Items[noPhotoc];
demEau=(CL_DemandeEau*)demande->Contenu;
qteDemandee=demEau->Eau;

if(qteProposee>=qteDemandee*0.9) //réponse satisfaisante , c'est à dire au moins 90% de la
demande
{
    EauAccordee[t]=qteProposee;
    message=new CL_Message((TObject*)this,AGRI,phaseNegoc, (TObject*)accordEau,QEAU);
    //envoie un message au fournisseur d'eau pour dire qu'il accepte la quantité d'eau attribuée
    Syndic->LstBal->Add(message);
    DeciderParcelleIrrigue();
    return 0;
}
else //sinon nouvelle demande
{
    coef=1-baisse*phaseNegoc;
    if(coef<0) coef=0;
    nvelleDem=demandeIni*coef;

    EnvoiMessageEau(nvelleDem, SurfMaisI, phaseNegoc); //envoie un message au
fournisseur d'eau avec nouvelle demande d'eau
    return 1;
}
}
}

```

Annexe 3 : Les Classes et méthodes de MANGALERE

Annexe 3.1 :Fichier réservoir en XML

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" standalone="yes" ?>
<MangaLere>
  <annee>11      1991</annee>
  <reservoir>
    <ident> 1      Gouyre </ident>
    <consoM3>      900000 545152 477014 993504 1719897844106 678590
1743000124460813502031366771</consoM3>
    <VolDebutAnneeM3> 0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      </VolDebutAnneeM3>
    <VolPreleveM3>0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      </VolPreleveM3>
    <EvapoMaiOctM3> 0      0      350000 660000 6000000491000
0      0      0      0      0      </EvapoMaiOctM3>
    <DebitMaiOctLparS> 0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      </DebitMaiOctLparS>
    <Capacite>      3300000</Capacite>
    <BesIrrig>      2000000</BesIrrig>
    <BesEP>         0      </BesEP>
    <BesEvapo>      300000 </BesEvapo>
    <BesAPN>        650000 </BesAPN>
    <NbIrrig>       92      </NbIrrig>
    <SurfIrrig>     870     </SurfIrrig>
    <DebitSouscrit> 2166.8799 </DebitSouscrit>
  <plan>
    <Nom>
      </Nom>
    <Documentation>
      </Documentation>
    <Déclencheur>
      </Déclencheur>
    <Mise en Veille>
      </Mise en Veille>
    <Arrêt>
      </Arrêt>
    <Programme>
      </Programme>
  </plan>
</reservoir>
<reservoir>
  <ident> 2      Tordre </ident>
```

```

    <consoM3> 0 0 0 172890 336075 216283 177255
462000 257135 366066 414172 </consoM3>
    <VolDebutAnneeM3> 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 </VolDebutAnneeM3>
    <VolPreleveM3>0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 </VolPreleveM3>
    <EvapoMaiOctM3> 0 0 280000 660000 6000000600000
0 0 0 0 0 </EvapoMaiOctM3>
    <DebitMaiOctLparS> 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 </DebitMaiOctLparS>
    <Capacite> 310000</Capacite>
    <BesIrrig> 0 </BesIrrig>
    <BesEP> 0 </BesEP>
    <BesEvapo> 300000 </BesEvapo>
    <BesAPN> 450000 </BesAPN>
    <NbIrrig> 55 </NbIrrig>
    <SurfIrrig> 380 </SurfIrrig>
    <DebitSouscrit> 960.47998 </DebitSouscrit>
</reservoir>
<reservoir>
    <ident> 3 Gagnol </ident>
    <consoM3> 0 0 0 0 0 0 0
0 61435 151900 168514 </consoM3>
    <VolDebutAnneeM3> 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 </VolDebutAnneeM3>
    <VolPreleveM3>0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 </VolPreleveM3>
    <EvapoMaiOctM3> 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 </EvapoMaiOctM3>
    <DebitMaiOctLparS> 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 </DebitMaiOctLparS>
    <Capacite> 600000 </Capacite>
    <BesIrrig> 250000 </BesIrrig>
    <BesEP> 350000 </BesEP>
    <BesEvapo> 50000 </BesEvapo>
    <BesAPN> 120000 </BesAPN>
    <NbIrrig> 23 </NbIrrig>
    <SurfIrrig> 170 </SurfIrrig>
    <DebitSouscrit> 423 </DebitSouscrit>
</reservoir>
</MangaLere>

```

Annexe 3.2 : La classe Entrée Sortie

Définition de la Classe Entrée Sortie

```

class CL_ES:public CL_Outil
{
    enum {OK,FIN,FINAGENT,AUTRE,IDENT,MANGALERE, ANNEE, AGRI, RESERVOIR};

    CL_ES(){indent=4;}
}

```

```

int indent,niveau;
int NbAnnee,AnneeDebut;
string BaliseFin;
bool Erreur;

// quelques Méthodes pour écrire dans ES (liste non exhaustive)
bool Ecrire(char *nomfich);
void EnteteXml(ofstream &sortie);
void Indenter(ofstream &sortie,int niveau);
void EcrireBaliseDebut( ofstream &sortie,char *balise,int niveau);
void EcrireBaliseFin( ofstream &sortie,char *balise);

// quelques méthodes pour LIRE dans ES(liste non exhaustive)
bool Lire(char *nomfich,bool mangalere);
int Analex(ifstream &entree, string &baliseFin);
int trouverBaliseFin(string balise,ifstream &entree);
string CreeBaliseFin(string balise);
void EcrireAn(TStringGrid *sg, int r, int anDeb,int nbAn);
};

```

Méthode Trouver balise fin XML

```

CL_ES::trouverBaliseFin(string balise,ifstream &entree)
{
    //Boucle permettant d'analyser la chaîne
    while(1)
    {
        if(!(entree>>chaîne))return FIN;           //Si on a pas une chaîne alors arrêt (FIN)
        if(chaîne==baliseFin) return OK;           // Si la chaîne correspond a une balise de fin alors
OK
        if(chaîne[0]=='<' && chaîne[chaîne.length()-1]==>')
        {
            balise=chaîne;
            return AUTRE;
        }
    }
}
}

```

Annexe 3.3 : La Classe Agent

Définition de la Classe Agent

```

class CL_Agent:public CL_ES
{
    CL_Agent(){};
    string DonneNom(void);
    int DonneNo(void);
    TList *LstPlan;
    int TypeAgent ;
    TList *LstBal;
    string nom;
    string identificateur; //sert pour lecture XML
    int no;
    int typeAgent;

```

```

// Méthodes pour lire données sur fichier (liste non exhaustive)
void CreeBaliseFinAgent( void);
string BaliseFinAgent;
void EcrireBaliseDebut( ofstream &sortie,int niveau);
void EcrireBaliseFin ( ofstream &sortie,int niveau);
void EcrireIdent ( ofstream &sortie,int niveau);
bool LireIdent ( ifstream &entree, const string baliseFin);

// pour communiquer (liste non exhaustive)
CL_Agent* TrouveAgent(int typeAgent,int no);
void EnvoiMessage(CL_Agent* emetteur,CL_Agent* destinataire,
string nature,string langage,string contenu);
void AuTravail(double Val);
};

```

Méthode d'envoi de message.

Dans ce message est défini l'émetteur, le destinataire, la nature du message , le langage utilisé (fait appel à l'ontologie spécifique de l'agent), le contenu du message.

```

void CL_Agent::EnvoiMessage
    message=new CL_Message(emetteur,destinataire,nature,langage,contenu);

```

Annexe 3.4 : La Classe Contrôleur général

Définition de la Classe Contrôleur général

```

class CL_Controlleur:public CL_Agent
{
    CL_Controlleur();
    int AnDeb,AnFin;

//méthode utilisée par un agent pour dire au contrôleur de l'activer à telle date
void Informe(int typeAgent,int noAgent,double Val);
// Permet de définir l'année de début et l 'année de fin pour la simulation
void PrepareSimu(int aDeb,int aFin);

void Gere(void); // Méthode Gère Simulation qui permet au contrôleur général de mettre à jour
son agenda et de réveiller les premiers agents présents sur ce même agenda.
void Reveille(int typeAgent,int noAgent,double val); // Méthode Reveille Agent qui permet au contrôleur
général de réveiller les agents en temps voulu

private:
    TDateTime date; //permet de retourner la date en fonction de val
    list<CL_Agenda>LstAgenda; // liste d'agenda
    TList *LstReveil; //liste de réveils
};

```

Méthode utilisée par un agent pour dire au contrôleur de l'activer à telle date

```

void CL_Controlleur::EstInforme
{

```

```
CL_Agenda agenda(typeAgent,noAgent,Val);
ItAgenda it;
```

```
LstAgenda.push_back(agenda);
LstAgenda.sort();
}
```

Méthode Gère Simulation qui permet au contrôleur général de mettre à jour son agenda et de réveiller les premiers agents présents sur ce même agenda.

```
void CL_Controlleur::GereSimulation
{
    while(1)
    {
        if(LstAgenda.size()==0) break;

        // jusqu'à la date du premier agent à activer
        // rien à faire
        // donc avancer horloge

        it=LstAgenda.begin();
        agenda=*it;

        // a t on dépassé date de fin
        val=agenda.Val;
        date=TDateTime(val);
        date.DecodeDate(&an,&mois,&jour);

        if(an==AnFin) break;

        while(1)
        {
            it=LstAgenda.begin();
            agenda=*it;
            if(agenda.Val==val)
            {
                Reveille(agenda.TypeAgent,agenda.NoAgent,val);
                LstAgenda.erase(it);
            }
            else
                break;
        }
    }
}
```

Méthode Reveille Agent qui permet au contrôleur général de réveiller les agents en temps voulu

```
void CL_Controlleur::ReveilleAgent
{
    switch(typeAgent)
    {
        case AGRI: //cas pour un agent agriculteur
            it=MapAgri.find(noAgent);
            agri=it->second;
```

```

        agri->AuTravail(val); // active la méthode qui permet à l'agriculteur d'exécuter ses
tâches
        break;
    }
}

```

Annexe 3.5 : La Classe agenda

Définition de la Classe Agenda

```

Class CL_Agenda
{
friend bool operator<(const CL_Agenda &A, const CL_Agenda &B);

    CL_Agenda(int typeAgent,int noAgent,double Val);
    CL_Agenda(){};
    double Val; // renvoie la date à laquelle l'agent doit être activé
    int TypeAgent; //type d'agent à réveiller
    int NoAgent; //numéro de l'agent à activer
};
bool operator<(const CL_Agenda &A, const CL_Agenda &B)
{
    return (A.Val<B.Val);
}

```

Annexe 3.6 : La Classe Réveil

Définition de la Classe Réveil

```

class CL_Reveil
{
    CL_Reveil(int type, double val);
    int TypeAgent; //type d'agent à réveiller
    double Val; // renvoie la date à laquelle l'agent doit être activé
    AnsiString AsEcrire(void);
};

```

Annexe 3.7 : La Classe Réservoir

Définition de la Classe Réservoir

```

class CL_Reservoir:public CL_Agent
{
enum fichier {FINAGENT=100,FIN,AUTRE,IDENT,
    CONSOM3,VOLDEBUTANNEEM3,
    VOLPRELEVEM3,EVAPOMAIIOCTM3,DEBITMAIOCTLPARS,
    CAPACITE,BESIRRIG,BESEB,BESEVAPO,BESAPN,
NBIRRIG,SURFIRRIG,DEBITSOUSCRIT,PLAN};
enum plan {NOM,DOCUMENTATION,DECLENCHEUR,MISEENVEILLE,ARRET,PROGRAMME};

    CL_Reservoir(int n,string lib);
    CL_Reservoir();
    void Maz(void);
    int NoBapteme(int n);
}

```

```

//accesseurs
float DonneCapacite(void);
float DonneBesIrrig(void);
float DonneBesEP(void);
float DonneBesEvapo(void);
float DonneBesAPN(void);
float DonneNbIrrig(void);
float DonneSurfIrrigee(void);
float DonneDebitSouscrit(void);

int AnalexFichier(ifstream &entree,string &baliseFin);
AnsiString MemoEcrire(void);
float capacite;
float besIrrig;
float besEP;
float besEvapo;
float besAPN;
float nbIrrig;
float surfIrrig;
float debitSouscrit;
float conso[20];
float volDebutAnneM3[20];
float volPreleveM3[20];
float evapoMaiOctM3[20];
float debitMaiOctLparS[20];

};

```

Annexe 3.8 : La Classe Agriculteur

Méthode qui permet à l'agent agriculteur, une fois réveillé d'exécuter ses tâches.

```

void CL_Agri::AuTravail(double val)
{
//regarder la date
    date=TDateTime(val);
    date.DecodeDate(&an,&mois,&jour);

    EdEcrire("AuTravail ____ "+date.DateString());

    if(mois < 7) //si la date n'a pas atteint le mois de juillet
    {
        //rien à faire

    agent=TrouveAgent(AGRI,2);
    EnvoiMessage(this,agent,"Demande","dialecteAgri","surface"); //envoi message à agriculteur n° 2 pour
    connaître sa surface

//souhaite se faire réveiller à une autre date

    date=TDateTime(an,7,14);
    CG->Informe(AGRI,this->no,date.Val); //Informe le Contrôleur général de la date à laquelle il
    souhaite se faire activer
    }
}

```

Vu : le Président
M

Vu : les suffragants
MM

Vu et permis d'imprimer :
Le Vice-Président du Conseil Scientifique chargé de la recherche de l'Université de
PARIS IX DAUPHINE