

**UNIVERSITÉ DE CORSE – PASQUALE PAOLI
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES**

THÈSE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE CORSE
ÉCOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ**

Spécialité : Informatique

présentée par

Dominique URBANI



知らぬが仏

**Elaboration d'une approche hybride SMA-SIG pour la
définition d'un système d'aide à la décision;
application à la gestion de l'eau**

Sous la direction de

Jean-François SANTUCCI et Marielle DELHOM

Soutenue publiquement à l'Université de Corse le 29 novembre 2006 devant le jury composé de :

Rapporteurs : Jean Jacques CHABRIER, Professeur, Université de Bourgogne
Bernard ESPINASSE, Professeur, Université d'Aix Marseille
Examineurs : Antoine AIELLO, Professeur, Université de Corse
Jean François SANTUCCI, Professeur, Université de Corse
Marielle DELHOM, MCF, Université de Corse
Jean-Christophe SOULIE, MCF, Université du Littoral

**UNIVERSITÉ DE CORSE – PASQUALE PAOLI
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES**

THÈSE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE CORSE
ÉCOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ**

Spécialité : Informatique

présentée par

Dominique URBANI



知らぬが仏

**Elaboration d'une approche hybride SMA-SIG pour la
définition d'un système d'aide à la décision;
application à la gestion de l'eau**

Sous la direction de

Jean-François SANTUCCI et Marielle DELHOM

Soutenue publiquement à l'Université de Corse le 29 novembre 2006 devant le jury composé de :

Rapporteurs : Jean Jacques CHABRIER, Professeur, Université de Bourgogne
Bernard ESPINASSE, Professeur, Université d'Aix Marseille
Examineurs : Antoine AIELLO, Professeur, Université de Corse
Jean François SANTUCCI, Professeur, Université de Corse
Marielle DELHOM, MCF, Université de Corse
Jean-Christophe SOULIE, MCF, Université du Littoral

A mes parents

Remerciements

Je tiens à remercier,

Jean François Santucci, Professeur à l'Université de Corse, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire SPE dès mon année de DEA, puis pour m'avoir donné la chance de faire cette thèse, et de l'avoir encadrée. Ses conseils et son expérience m'ont guidé tout au long de ma thèse, et je lui en suis reconnaissant.

Marielle Delhom, Maître de Conférences à l'Université de Corse, pour m'avoir conseillé depuis mon année de DEA. Je la remercie tout particulièrement pour l'attention qu'elle m'a portée et son soutien inconditionnel au cours de ces années. Nos nombreuses discussions et nos échanges de points de vue et d'idées m'ont permis d'avancer dans mes recherches.

Les membres de mon Jury,

Jean Jacques CHABRIER, Professeur à l'Université de Bourgogne, pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Bernard ESPINASSE, Professeur à l'Université d'Aix Marseille, pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Antoine AIELLO, Professeur à l'Université de Corse, pour avoir accepté d'être membre du jury.

Jean-Christophe SOULIE, Maître de Conférences à l'Université du Littoral, pour avoir accepté d'être membre du jury.

Elaboration d'une approche hybride SMA-SIG pour la définition d'un système d'aide à la décision; application à la gestion de l'eau

Résumé

Les décideurs sont de plus en plus souvent confrontés à des problèmes complexes qui touchent des millions de personnes. Ils souhaitent faire face à ces problèmes avec le maximum d'éléments objectifs et prendre leur décision en tenant compte des intérêts de toutes les parties prenantes. Ces éléments doivent leur permettre de choisir rationnellement la meilleure solution, d'être en mesure d'expliquer et de justifier leur choix. Dans ce document, nous examinons dans un premier temps les systèmes informatiques d'aide à la décision et les liens qui existent entre la modélisation du problème et l'aide à la décision. Nous proposons une nouvelle approche des systèmes informatiques d'aide à la décision qui est basée sur l'utilisation combinée d'un modèle individus centrés construit suivant le paradigme multi-agents et d'un système d'informations géographiques. Après avoir mis en évidence les avantages de cette approche hybride, nous examinons les connaissances qui sont mobilisées dans un processus de prise de décision. Nous précisons quelles sont les relations qui existent dans ce cadre entre le modèle multi-agents et le système d'informations géographiques. Poursuivant nos travaux, nous proposons une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision dédiés aux problèmes ayant une composante spatiale qui prend en compte les comportements individuels. Nous implémentons cette architecture en utilisant une plateforme multi-agents et un système d'informations géographiques existants. Nous validons nos travaux en développant suivant notre approche hybride un système informatique d'aide à la décision dédié au problème de l'eau.

Mots clefs: aide à la décision, systèmes multi-agents, systèmes d'informations géographiques, systèmes informatiques d'aide à la décision, modèle, modélisation, simulation, connaissance, eau.

Development of a new MAS GIS hybrid approach for Decision Support Systems; application to water management

Abstract

Decision makers are always more confronted with environmental problems which affect million people. They wish to face these problems with the maximum of objective elements in order to decide rationally by taking account of all the part's interests. Thus they need arguments to explain and justify their choices. In this document, we examine first the decision support systems and the links which exist between the modeling of problem and the decision-making aid. We propose a new approach of the decision support systems which is based on the combined use of a geographical information system and individuals based models built following the multi-agents paradigm. Then we highlight the assets of such a hybrid approach, and we examine which knowledge is required in the decision-making process. According to this approach, we specify which links exist between the multi-agents model and the geographical information system, two representations of the same system cohabiting in one software. Pursuing our research, we propose a new platform's architecture dedicated to the development of decision support systems with a spatial dimension. We implement this platform's architecture reusing an existing multi-agents platform and a standardized geographical information system. According to our hybrid approach, using our platform, we develop a decision support system specially dedicated to the water problem. Thus we validate our work.

Keywords: decision-making, decision support system, multi-agents system, geographic information system, model, modeling, simulation, knowledge, water.

Sommaire

Résumé	7
Abstract	8
1 Introduction	12
1.1 L'aide à la décision aujourd'hui	13
1.2 Le contexte et la problématique	13
1.3 Motivations et objectifs	15
1.4 Démarche et problématique	16
1.5 Organisation du document	18
2 Etat de l'art	20
2.1 L'aide à la décision	21
2.1.1 Définition	21
2.1.2 Les systèmes interactifs d'aide à la décision	22
2.2 Modélisation et Simulation	25
2.2.1 La modélisation aujourd'hui	25
2.2.2 Modèle et simulation	25
2.2.3 Les différents types de modèles	27
2.2.4 Les modèles individu centré	28
2.3 Les systèmes multi-agents	29
2.3.1 Bref Historique	29
2.3.2 La notion d'agent	30
2.3.3 Le concept de système multi-agents	32
2.3.4 La notion d'environnement	32
2.3.5 Les agents situés	33
2.3.6 Application des SMA	34
2.3.6.1 Atelier de peinture	34
2.3.6.2 Surveillance de patients	34
2.3.6.3 Utilisation de la technologies multi-agents	35
2.3.7 Classification des agents	36
2.3.7.1 Les agents réactifs	36
2.3.7.2 Les agents cognitifs	36
2.3.7.3 Les agents hybrides	37
2.3.8 Architectures des agents	37
2.3.8.1 Architecture BDI	37
2.3.8.2 Architecture de subsumption des agents réactifs	39
2.3.8.3 Architecture des agents hybrides	40
2.3.9 Agent ou objet ?	42
2.3.10 Interactions entre agents	42
2.3.10.1 Communication entre les agents	43
2.4 Les Systèmes d'Informations Géographiques	46
2.5 Aide à la Décision et SIG	49
2.6 Conclusion	49
3 SMAG, une nouvelle architecture SMA - SIG	50
3.1 Une approche hybride originale	51
3.2 Avantages d'une approche hybride SMA - SIG	52
3.3 Quelles connaissances pour l'aide à la décision ?	56
3.3.1 Les connaissances de domaine	57
3.3.2 Les connaissances de résolution	58
3.4 Connaissances et SIAD	58

3.5	Connaissances et SIG	59
3.6	Connaissances et SMA	60
3.6.1	Niveau connaissances du problème et résolution	62
3.6.2	Niveau connaissance du système	63
3.6.3	Niveau connaissance des agents	63
3.6.4	Niveau connaissance des croyances des agents	64
3.7	Dimensions spatiale, sociale et temporelle d'une simulation	65
3.8	Contraintes d'un couplage SMA-SIG	66
3.9	L'architecture SMAG	72
4	Implémentation	77
4.1	Plateforme SMA CORMAS	78
4.1.1	Les plateformes SMA	78
4.1.2	Présentation de CORMAS	79
4.1.3	Le langage SmallTalk	81
4.2	ARCGIS	82
4.3	La plateforme CORMGIS	84
4.3.1	Implémentation du module SIG de CORMGIS	85
4.3.2	Implémentation du module SMA de CORMGIS	85
4.3.3	Couplage des modules SMA et SIG de CORMGIS	90
4.3.4	Aide à la décision avec CORMGIS	91
4.4	Conclusion	94
5	Application à la gestion de l'eau	95
5.1	Le défi de notre futur approvisionnement en eau	96
5.2	Présentation des modèles et simulateurs informatiques existants :	97
5.2.1	Logiciels de la classe « hydrologique »- scientifiques	97
5.2.2	Logiciels d'ingénierie	98
5.2.3	Les logiciels dédiés	101
5.2.4	Etat des lieu et critique de l'existant	102
5.2.5	Des approches partielles	103
5.3	Spécification d'un nouvel outil d'aide à la décision	104
5.4	Apports d'une approche SMA-SIG pour la gestion de l'eau	107
5.4.1	Pertinence d'une approche multi-agents	107
5.4.2	De l'utilité d'un SIG pour l'étude de cas réels	108
5.5	Présentation du système insulaire	108
5.6	Etude du Cap Corse	111
5.6.1	Modélisation du système	112
5.6.2	Expérimentations dans le Cap Corse	117
5.6.3	Solidarité et coupures d'eau	120
5.6.4	Quelle police de l'eau ?	122
5.7	Codage	124
5.8	Prochains travaux sur les îles	125
6	Conclusion & Perspectives	126
7	Références	130
8	Publications issues de nos recherches	138
9	Annexes	139
9.1	Annexe 1 : Procédure d'installation de CORMGIS	140
9.2	Annexe 2 : Utilisation de CORMGIS en mode Analyse	145
9.3	Annexe 3 : Utilisation de CORMGIS en mode jeu de rôle	148
9.4	Annexe 4 : Structure de la base de données géographique	154

Table des Figures

Figure 1 : Composition d'un système interactif d'aide à la décision	23
Figure 2 : Architecture d'un SIAD [Courbon 86].....	24
Figure 3 : La simulation informatique selon [Fishwick 97].....	26
Figure 4 : Modélisation et Simulation d'après Ziegler [Ziegler 00]	26
Figure 5 : Interactions d'un agent [Ferber 1995]	31
Figure 6 : Principe d'une architecture BDI.....	38
Figure 7 : Architecture de Subsumption	39
Figure 8 : Architecture en couches horizontale TouringMachines	40
Figure 9 : Architecture InteRRaP	41
Figure 10: Composantes d'un SIG.....	46
Figure 11 : Couches d'un SIG	48
Figure 12: Vérification et de la validation d'un processus de simulation [Sargent 01]	53
Figure 13: Initialisation à partir du SMA et du SIG.....	54
Figure 14 : Validation des modèles grâce au SIG	55
Figure 15 : Niveaux de connaissances dans un SIAD basé sur un modèle multi-agents	61
Figure 16 : Les 3 dimensions d'une expérimentation	66
Figure 17:Deux représentations du système.....	67
Figure 18 : Plusieurs représentations dans un SMA	69
Figure 19 : Morphismes et SIAD	69
Figure 20 : Morphismes dans un SIAD utilisant un SIG et un SMA.....	70
Figure 21 : Architecture SMAG.....	72
Figure 22 : Echanges de données dans un SIAD conforme à l'architecture SMAG	73
Figure 23 : Architecture fonctionnelle de SMAG	74
Figure 24 : Architecture d'ArcGIS 9	83
Figure 25 : Architecture logicielle CORMGIS	84
Figure 26 : Diagramme de classe du paquetage "Entities" de CORMAS [CORMAS]	88
Figure 27 : Classe AgentCommLocation de CORMAS [CORMAS].....	89
Figure 28 : Diagramme de classe des interfaces de CORMAS [CORMAS].....	89
Figure 29 : Diagramme des classe spécifiques à CORMGIS.....	90
Figure 30 : Couplage SMA - SIG par les données dans CORMGIS	91
Figure 31: Interface de contrôle de l'initialisation.....	93
Figure 32 : Délimitation des bassins versants avec le logiciel WMS7	99
Figure 33 : WATSYS, pression dans un réseau d'adduction d'eau	100
Figure 34 : Profil 3D d'une portion de rivière avec le logiciel HEC-RAS	101
Figure 35 : Modèle simplifié du cycle de l'eau.....	109
Figure 36 : Diagramme de classe UML du SIAD	114
Figure 37 : Diagramme de classe UML du modèle du système insulaire.....	115
Figure 38 : Fenêtre de contrôle des agents.....	116
Figure 39 : Interface de contrôle du climat	116
Figure 40 : Vue relief du Cap Corse - Altitude & Couvert.....	118
Figure 41 : Interfaces graphiques du logiciel d'aide à la décision.....	119
Figure 42 : Nombre d'agents stressés vs valeur du seuil de changement de comportement ..	121
Figure 43 : Evaluation de différentes stratégies de contrôle	123

1 Introduction

1.1 L'aide à la décision aujourd'hui

Quels que soient leurs domaines d'activité les décideurs, élus, chefs d'entreprises, gestionnaires, financiers, ingénieurs, utilisent déjà, ou sont à la recherche d'outils d'aide à la décision. Ces outils permettent aux décideurs de rationaliser la prise de décisions et d'expliquer leurs choix. Aujourd'hui l'aide à la décision et à la résolution de problème s'appuie sur l'utilisation de modèles informatiques. Les décideurs prennent leurs décisions après avoir analysé les données générées grâce à de puissants simulateurs qui leurs permettent d'évaluer les conséquences de chacune des options envisagées.

L'aménagement du territoire, le développement durable, la préservation de l'environnement, la gestion des ressources renouvelables, sont des problématiques de long terme auxquelles les décideurs souhaitent faire face avec le plus d'éléments objectifs leur permettant de rationaliser et d'explicitier leurs choix. Pour répondre à ce besoin d'outils d'aide la décision, de nombreuses recherches sont maintenant orientées vers la modélisation et la simulation des systèmes complexes.

Ces nouveaux modèles prennent en compte les dimensions environnementales, économiques, sociales et anthropiques de la réalité. Ils permettent de mieux comprendre le fonctionnement du monde et d'anticiper les changements prévisibles. Parallèlement à ces efforts de modélisation, d'importantes recherches théoriques sont engagées pour proposer de nouveaux paradigmes et des nouvelles approches de la modélisation des systèmes complexes et du développement d'outils d'aide à la décision.

Nous présentons dans ce mémoire une approche originale du développement d'outils d'aide à la décision. Notre approche, hybride, est basée sur l'utilisation d'un système d'informations géographiques couplé à un système multi-agents.

1.2 Le contexte et la problématique

Nous présentons maintenant le contexte méditerranéen et les problématiques environnementales qui sont le champ d'application naturel des recherches sur l'aide à la décision présentées dans notre mémoire.

- ***Un environnement à préserver***

Les institutions chargées de la préservation de l'environnement, de l'étude des écosystèmes et de la gestion des ressources renouvelables souhaitent s'appuyer de plus en plus sur des modèles et des outils qui puissent leur apporter une aide à la décision.

Dans le bassin méditerranéen, les autorités doivent faire face à d'inquiétantes perspectives de changements climatiques et à une pression anthropique croissante sur des écosystèmes fragiles. Les décideurs sont donc à la recherche d'outils et d'éléments leur permettant de choisir rationnellement une politique de gestion de l'environnement, puis d'expliquer leur décision aux citoyens.

Pour répondre à ces besoins, l'Université de Corse a décidé de faire de la modélisation des systèmes environnementaux un de ses principaux axes de recherches. Dans le cadre de ces travaux scientifiques l'eau tient une place de première importance.

- ***La problématique de l'eau***

Parmi les problèmes environnementaux à l'origine de nos travaux, la problématique de l'eau est probablement le plus grand défi auquel continuent à être confrontés les habitants du pourtour de la méditerranée. En effet, l'eau a toujours été une préoccupation majeure dans le bassin méditerranéen [Dugot 01].

Aujourd'hui en de nombreux points du bassin, la consommation humaine a atteint la limite des précipitations annuelles et l'eau est devenue un frein au développement de ces territoires. Pour faire face à une pénurie en passe de se généraliser et aux perspectives de changements du climat, les autorités ont lancé de nombreuses études pour trouver des solutions innovantes, repenser leurs politiques, et planifier le développement économique.

La principale cause des tensions sur l'eau est l'augmentation continue de la demande. Plusieurs facteurs se conjuguent pour nourrir cette hausse : accroissement de la population, augmentation de la consommation domestique moyenne par habitant, modernisation des pratiques de l'agriculture (irrigation et cultures à forte valeur ajoutée). A cela s'ajoute le développement de l'industrie du tourisme qui est devenue prépondérante dans l'économie et qui a des besoins importants. Face à la croissance de la demande, les ressources demeurent limitées, et déjà, aujourd'hui, la demande dépasse souvent l'apport des pluies [Erhars 83]. Presque totalement dépourvues de réserves fossiles qui leur permettraient de faire face aux épisodes de sécheresses saisonnières, les îles connaissent fréquemment des ruptures d'approvisionnement l'été. Lorsque la pénurie se prolonge, les autorités sont contraintes de recourir au dessalement de l'eau de mer ou de faire venir de l'eau du continent par tankers.

Confrontées aux coûts extrêmement importants de ces solutions, et à des perspectives de changement du climat, les autorités ont commandé de nombreuses études pour pouvoir faire face à ce problème. L'eau est déjà, et sera plus encore demain, le principal facteur limitant les possibilités de développement des sociétés insulaires méditerranéennes.

Les études entamées portent sur plusieurs aspects de la problématique : une meilleure connaissance de l'environnement et des ressources, la modernisation et la construction d'infrastructures, la modernisation de l'agriculture, la modification des comportements des habitants, la planification du développement économique par secteurs [Redaud 00]. Ces recherches sont menées dans un cadre de réflexion global qui prend en compte l'ensemble des parties concernées par l'eau. Dans le cas des îles, territoires isolés, tous les acteurs sont fortement liés, et lorsque il y a une intervention dans un secteur de la société tous les autres sont à leur tour affectés. Les autorités souhaitent donc disposer d'études et d'outils d'aide à la décision permettant de prévoir les conséquences sur l'ensemble de la société des actions et des politiques qu'elles comptent entreprendre.

Les recherches et les expérimentations menées pour trouver des solutions au problème croissant de l'approvisionnement en eau douce sont mutualisées et coordonnées dans le cadre d'organisations nationales et internationales. Il existe de telles coopérations sur tous les aspects du problème et à tous les niveaux d'organisation. Nous citons à titre d'exemples de coopérations : le programme de recherche européen MEDIS [Medis], la gestion des bassins

versants à l'échelle régionale [SAGE], le partage des eaux entre les états (USA – Mexique pour le Colorado, Israël - Jordanie pour le Jourdain), l'établissement de règles et perspectives au niveau mondial (Forum mondial de l'eau, Plan Bleu) [Bleu].

En Corse, les autorités qui doivent faire face à des pénuries ponctuelles et qui sont inquiètes des changements climatiques annoncés par certains experts, ont décidé de s'associer à plusieurs initiatives de coopérations tant européennes que méditerranéennes. Dans le cadre de cette politique d'échanges, le laboratoire Systèmes Physiques pour l'Environnement (SPE) de l'Université de Corse participe aux recherches sur les conséquences possibles des changements climatiques et les évolutions de la gestion des ressources hydriques qui deviendront nécessaires dans les îles méditerranéennes. Dans le cadre du programme européen MEDIS [Medis] qui regroupe des équipes de recherche des Baléares, de Chypres, de Malte, et de la Sicile, les recherches menées à l'Université de Corse doivent éclairer la Commission Européenne dans son processus de définition des prochaines directives européennes sur l'eau.

Les problématiques de la gestion de l'eau à long terme et de la préservation de l'environnement sont naturellement les premiers champs d'application de nos travaux sur les systèmes informatiques d'aide à la décision.

1.3 Motivations et objectifs

Le laboratoire SPE de l'Université de Corse qui consacre ses activités à l'étude et la modélisation des systèmes environnementaux, a décidé de réfléchir au concept d'une plateforme de développement d'outils d'aide à la décision permettant de faire face à des problèmes environnementaux. Cette plateforme doit permettre de prendre en compte à la fois la dimension spatiale et les intérêts spécifiques et divergents des différentes parties prenantes des problématiques abordées.

Pour répondre à cette exigence, nous décidons d'étudier quels avantages procureraient l'utilisation de modèles individus centrés, construits selon une démarche bottom-up. Nous nous intéressons tout particulièrement à la modélisation des systèmes complexes suivant une approche multi-agents. Les outils d'aide à la décision développés selon notre approche doivent, pour être en mesure d'aborder des situations réelles, utiliser l'ensemble des informations relevées sur le terrain. Nous entreprenons donc d'examiner plus largement quels avantages apporte l'intégration d'un système d'informations géographiques et d'un système multi-agents au sein d'une plateforme de développement d'outils d'aide à la décision.

Nous consacrons nos recherches à définir une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision hybrides qui utiliseraient une approche SMA – SIG. Au cours de notre travail nous cherchons à atteindre trois grands objectifs :

Le premier objectif, consiste à déterminer les avantages des outils d'aide à la décision utilisant des modèles et des simulations issus d'une approche couplant un système d'informations géographiques avec un système multi-agents. Nous souhaitons proposer une architecture générique de plateforme permettant de concevoir des outils d'aide à la décision et à la résolution de problèmes basés sur une approche associant les systèmes multi-agents et les systèmes d'informations géographiques. Pour atteindre cet objectif nous examinons plusieurs

questions théoriques sur l'aide à la décision, les connaissances nécessaires pour résoudre un problème, et les systèmes de représentation des connaissances que sont les SMA et les SIG.

Le deuxième objectif de nos travaux est d'implémenter et de développer une plateforme logicielle conforme à l'architecture que nous avons définie. La plateforme que nous souhaitons développer doit permettre l'étude et la modélisation de systèmes réels et servir de base à la construction d'outils d'aide à la décision et de gestion de systèmes qui comme les systèmes environnementaux se caractérisent par à la fois une forte composante spatiale et une multitude de protagonistes autonomes qui ont des intérêts divergents.

Le troisième objectif de nos recherches est de réfléchir aux apports d'un outil d'aide à la décision basé sur une approche SMA-SIG dans le cadre d'une gestion intégrée des ressources hydrologiques des îles méditerranéennes. Ainsi après avoir examiné les outils informatiques actuellement disponibles pour gérer l'eau, nous souhaitons définir les spécifications d'un nouvel outil d'aide à la décision prenant en compte la globalité de la problématique. En utilisant notre plateforme de développement d'outils d'aide à la décision, nous prévoyons de développer un logiciel prototype d'aide à la décision adapté à la problématique de l'eau avec lequel nous étudierons la région du Cap Corse. Ces expérimentations doivent nous permettre d'évaluer la pertinence de notre approche SMA – SIG de l'aide à la décision et de valider nos travaux.

Les trois grands objectifs que nous nous assignons nous conduisent à examiner l'ensemble du domaine de l'aide à la décision, depuis ses concepts théoriques, jusqu'à l'étude d'une situation réelle.

1.4 Démarche et problématique

Ce mémoire présente un travail transversal qui se situe au carrefour de plusieurs domaines : aide à la décision, systèmes informatiques d'aide à la décision, modélisation, systèmes multi-agents, systèmes d'informations géographiques, connaissances et systèmes de représentation, gestion de l'eau et de l'environnement.

La problématique de nos travaux consiste dans la définition, le développement et la concrétisation d'une nouvelle approche hybride des systèmes informatiques d'aide à la décision qui combinent systèmes multi-agents et systèmes d'informations géographiques.

Plusieurs étapes clefs jalonnent la démarche scientifique que nous retraçons dans ce document :

1. Le point de départ de notre travail est notre volonté de développer des outils informatiques d'aide à la décision dédiés aux problèmes environnementaux. L'approvisionnement en eau des îles de méditerranée doit constituer le premier champ d'application de nos travaux théoriques sur les systèmes informatiques d'aide à la décision. Nous souhaitons tout particulièrement que puissent être pris en compte dans l'élaboration de l'aide à la décision les comportements individuels de toutes les parties prenantes du système.

2. Nous élargissons nos recherches à l'étude et au développement d'outils d'aide à la décision et à la résolution de problèmes qui utilisent des modèles individus centrés, spécialement adaptés aux problématiques ayant une forte composante géographique sans nous limiter aux seuls problèmes environnementaux.
3. La volonté d'étudier des situations réelles, à partir des données collectées sur le terrain, nous conduit à envisager l'utilisation d'un système d'informations géographiques. Afin de prendre également en compte le comportement individuel de toutes les parties prenantes, nous choisissons de modéliser les systèmes réels en développant des modèles individus centrés, construits en suivant une approche multi-agents. Ceci nous conduit donc à étudier l'architecture et le développement d'outils d'aide à la décision hybrides basés sur l'utilisation combinée d'un système multi-agents et d'un système d'informations géographiques.
4. Ayant défini le champ de notre réflexion, nous nous intéressons au développement d'outils d'aide à la décision qui sont basés sur une approche hybride couplant systèmes multi-agents et systèmes d'informations géographiques. Nous examinons tout particulièrement plusieurs questions théoriques :
 - Quels sont les avantages d'une approche SMA - SIG ?
 - De quelles connaissances a-t-on besoin pour apporter une aide à la décision ?
 - Définir les contraintes d'un couplage SMA – SIG ?
5. Après avoir examiné les aspects théoriques de l'aide à la décision nous définissons une nouvelle architecture de plateforme, baptisée SMAG, permettant le développement d'outils d'aide à la décision et à la résolution de problèmes utilisant une approche hybride SMA – SIG.
6. Ayant ainsi défini SMAG, une nouvelle architecture de plateforme, nous développons CORMGIS, la première implémentation de l'architecture SMAG. Afin de bénéficier des dernières avancées de la recherche, nous recherchons parmi les plateformes multi-agents et les systèmes d'informations géographiques existants, quels sont ceux qui peuvent servir de base à l'implémentation de l'architecture SMAG.
7. Disposant maintenant de CORMGIS, une plateforme logicielle de développement d'outils d'aide à la décision SMA – SIG, nous décidons naturellement d'étudier la problématique de l'eau dans les îles de méditerranées. En utilisant CORMGIS, nous développons un outil informatique permettant aux décideurs de choisir la meilleure politique de prévention des pénuries d'eau en période de sécheresse.

L'étude du problème de l'eau dans le Cap Corse par laquelle nous terminons nos recherches nous permet d'illustrer et de valider nos travaux théoriques sur les systèmes informatiques d'aide à la décision. Au cours de notre démarche nous proposons et implémentons une nouvelle architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision construits suivant une nouvelle approche SMA – SIG.

1.5 Organisation du document

Ce mémoire est organisé en six parties qui exposent le cheminement de notre recherche : comment après avoir développé une approche originale de la définition d'outils d'aide à la décision basée sur l'utilisation conjointe des systèmes multi-agents et des systèmes d'informations géographiques, nous avons finalement choisi d'utiliser nos travaux théoriques pour étudier le problème de l'eau dans la région du Cap Corse.

- **Première partie : Introduction**

Dans la première partie nous exposons le contexte à l'origine de nos recherches et nous présentons notre problématique.

- **Deuxième partie : Etat de l'Art**

Dans cette partie, consacrée à l'Etat de l'art, nous présentons les principaux concepts liés à nos recherches et à notre problématique :

- L'aide à la décision.
- Les concepts clefs de la simulation et de la modélisation.
- L'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents.
- Les systèmes d'informations géographiques.

Nous accordons ici une large place à la présentation des principaux concepts liés aux systèmes multi-agents qui constituent une des spécificités de notre approche de l'aide à la décision.

- **Troisième partie : SMAG, une nouvelle architecture**

Dans cette partie nous présentons notre démarche théorique vers des outils d'aide à la décision hybrides SMA-SIG. Notre démarche s'articule autour de quelques points principaux :

- En quoi une approche SMA-SIG est elle originale ?
- Quels sont les avantages d'un couplage SMA - SIG ?
- Quelles sont les connaissances nécessaires pour apporter une aide à la décision ?
- Quelles connaissances intègre le SIG ?
- Quelles connaissances intègre le SMA ?
- Quelles sont des données qui constituent une simulation?
- Définir les contraintes imposées par le couplage de deux représentations de la réalité ?
- Quelle architecture pour les outils d'aide à la décision hybrides SMA – SIG ?

Notre démarche nous conduit à proposer, SMAG, une architecture de plateforme dédiée au développement d'outils d'aide à la décision et à la résolution de problèmes suivant une approche hybride SMA- SIG.

- ***Quatrième partie : Implémentation***

Dans cette partie nous présentons notre plateforme logicielle CORMGIS qui est une implémentation de l'architecture SMAG, basée sur la plateforme multi-agents CORMAS [CORMAS], et le logiciel de gestion des systèmes d'informations géographiques ArcGIS [ArcGIS]. Nous y explicitons les éléments qui nous ont conduit à choisir les plateformes logicielles CORMAS et ArcGIS pour servir de base à l'implémentation d'une plateforme ayant une architecture de type SMAG.

- ***Cinquième partie : Application à la gestion de l'eau***

Dans cette partie nous utilisons notre plateforme logicielle CORMGIS pour développer un outil d'aide à la décision permettant une meilleure gestion de l'eau dans les îles de méditerranées.

Après avoir rappelé les points clefs de la problématique de l'eau dans les îles et présenté les principaux outils informatiques existants pour faire face aux problèmes liés à l'eau, nous exposons les avantages d'une approche hybride SIG - SMA dans une perspective d'aide à la décision. Nous présentons le système informatique d'aide à la décision que nous avons développé en utilisant CORMGIS et les études que nous avons conduites sur la région du Cap Corse.

Cette étude du problème de l'eau dans les îles méditerranéennes nous a permis de valider nos travaux théoriques et de juger des atouts et des faiblesses de notre démarche.

- ***Sixième partie : Conclusion & Perspectives***

Dans cette partie nous faisons le bilan de nos travaux et présentons les perspectives de continuations de nos recherches.

2 Etat de l'art

Dans cette partie nous exposons les principaux concepts que nous utilisons pour proposer une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision basée sur une approche couplant un système d'informations géographiques avec un système multi-agents.

Cette partie est consacrée à un état de l'art dans lequel nous abordons successivement plusieurs domaines :

- L'aide à la décision : nous examinons tout particulièrement les concepts de décision et d'aide à la décision.
- Les systèmes informatiques d'aide à la décision : nous examinons ensuite comment l'informatique peut aider un décideur dans sa tâche. Nous précisons le champ d'application des logiciels d'aide à la décision, les principes sur lesquels ils se basent, et finalement leur architecture.
- Les principaux concepts de la modélisation et la simulation : la prise de décision dépendant fortement de la représentation du problème auquel est confronté un décideur, nous examinons les concepts clefs de la modélisation et les différents types de modèles. Dans ce cadre, nous examinons tout particulièrement les liens existant entre un système et son modèle ainsi que les caractéristiques des modèles individus centrés.
- Les systèmes multi-agents : après avoir rappelé l'origine des systèmes multi-agents, nous présentons en détail les concepts d'agent et de système multi-agents. Nous nous attachons à présenter les différents types d'agents, les architectures existantes, la notion d'environnement ainsi que les concepts d'agent situé et d'agent localisé.
- Les systèmes d'informations géographiques : nous présentons cet outil informatique, son architecture, ses fonctionnalités et ses principales applications.

Ces recherches bibliographiques ont nourri notre réflexion sur les systèmes informatiques d'aide à la décision et nous ont conduit ensuite à faire des propositions théoriques qui ont abouti à la réalisation d'une plateforme logicielle et à des études de cas.

2.1 L'aide à la décision

2.1.1 Définition

La décision est perçue comme l'exercice d'un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné. Ceux qui réalisent ce choix sont « les décideurs ». Comme le définit Roy [Roy 00] *"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"*. Cette approche monocritère suppose que le système soit suffisamment simple pour qu'il soit possible d'évaluer les différentes possibilités d'action en utilisant un seul indicateur.

Le choix de ne considérer qu'un seul critère revient à réduire explicitement la réalité à une seule dimension. Dans le cas des systèmes complexes où plusieurs dimensions doivent être prises en compte, l'aide à la décision change pour devenir selon Roy [Roy 00] *"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".

L'aide à la décision s'appuie aujourd'hui sur la théorie de la modélisation et les systèmes informatiques pour apporter par la simulation des éléments permettant d'aider le décideur dans sa tâche.

2.1.2 Les systèmes interactifs d'aide à la décision

Les systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) sont conçus pour résoudre des problèmes de décision peu ou mal structurés [Eierman 95]. Ces problèmes possèdent les ou l'une des caractéristiques suivantes [Klein 71] :

- Les préférences, jugements, intuitions et l'expérience du décideur sont essentiels.
- La recherche d'une solution implique un mélange de recherche d'information, de formalisation ou définition et structuration du problème, du calcul et de la manipulation de données.
- La séquence des opérations de recherche d'une solution n'est pas connue à l'avance parce qu'elle peut être fonction des données, être modifiée, peut ne donner que des résultats partiels, ou encore peut être fonction des préférences de l'utilisateur.
- Les critères pour la décision sont nombreux, en conflit et fortement dépendant de la perception de l'utilisateur.
- La solution doit être obtenue en un temps limité.
- Le problème évolue rapidement.

Checroun [Checroun 92] définit les SIAD comme étant "*des systèmes d'information interactifs (donc sur ordinateur) destinés à aider les décideurs à exploiter des données et des modèles pour résoudre des problèmes peu ou non structurés*".

Les termes clefs de cette définition : système, interactif, données et modèles, problèmes non structurés, aider, doivent selon Checroun être interprétés de la façon suivante :

Système : ensemble complexe et maîtrisable (au sens pilotable).

Interactif : couplage homme-machine qui sous-entend ergonomie et contrôle par l'utilisateur. Utilisation conversationnelle de l'ordinateur. Dialogue dirigé par le système et non par l'homme.

Données et modèles : le système d'information comporte non seulement les informations brutes mais aussi les traitements nécessaires à une mise en forme compréhensible (tris, sélections, calculs, éditions...), de même que les outils élaborés pour analyser, comprendre, communiquer, démontrer...

Problèmes non structurés : c'est le lot commun à tous les problèmes posés par le management. Une grande part est faite à l'intuition, au tâtonnement, à l'expérience du décideur. Le SIAD ne constitue qu'un élément du processus de décision.

Aider : il s'agit de fournir au décideur une amplification du pouvoir de raisonnement et non pas de se substituer à ce raisonnement par une modélisation des processus qui caractériseraient ce dernier.

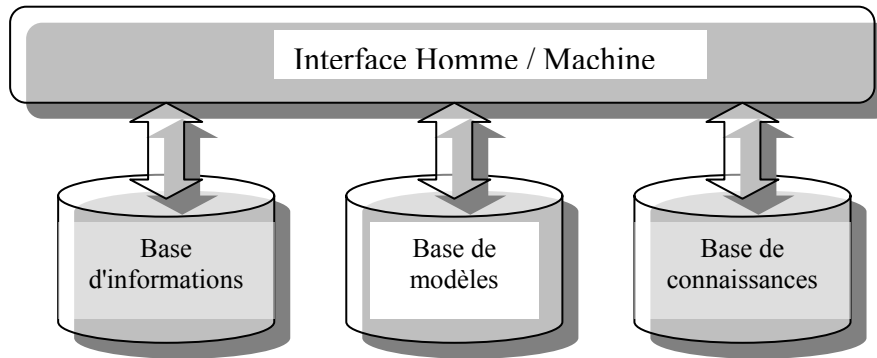


Figure 1 : Composition d'un système interactif d'aide à la décision

La Figure 1 présente la composition d'un système interactif d'aide à la décision qui comprend :

- Une base d'informations regroupant les données sur le système.
- Une base de modèles décrivant le comportement du système.
- Une base de connaissances peut être un système indépendant apportant une expertise supplémentaire spécifique au système étudié.
- Une interface Homme / Machine pour interagir avec le système.

Grâce à l'interface Homme / Machine le décideur peut gérer et interroger le système d'aide à la décision et intégrer des connaissances heuristiques qui ne sont pas explicables dans un langage informatique.

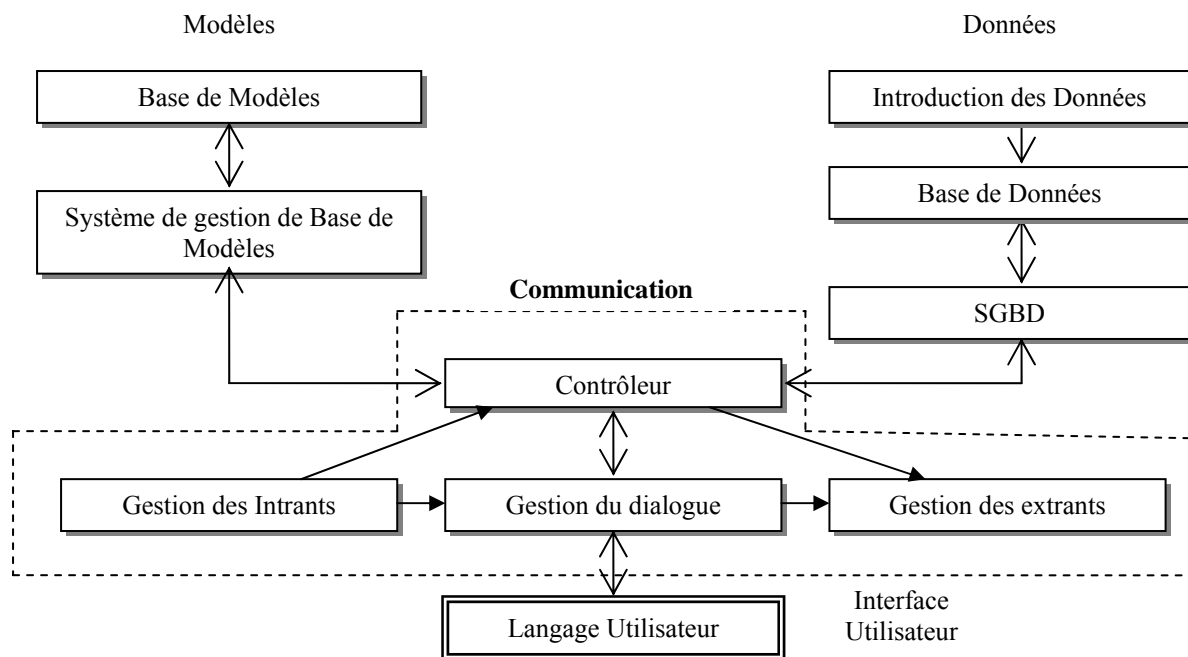


Figure 2 : Architecture d'un SIAD [Courbon 86]

L'architecture fonctionnelle proposée par Courbon [Courbon 86] présentée Figure 2 détaille les relations entre les différents composants d'un SIAD.

Le processus de développement "classique" d'un SIAD se compose selon Nykanen [Nykanen 00] suivant en sept phases :

- La planification, l'évaluation des besoins, le diagnostic du problème, la définition des objectifs et des buts du système ;
- L'identification des besoins de l'utilisateur et des ressources disponibles et la définition de l'environnement du SIAD ;
- Le choix de la meilleure approche de conception, la définition des ressources requises, l'étude de faisabilité ;
- La conception détaillée cible la conception des composants, de la structure, des interfaces, du dialogue, des bases de données et de la gestion des connaissances du système ;
- La construction correspond à l'implémentation technique et à l'intégration ;
- Le développement intègre les tests et évaluations, les démonstrations, les entraînements, et le déploiement ;
- La maintenance, la documentation sont nécessaires pour adapter le système en fonction des évolutions de l'environnement ou des besoins des utilisateurs.

Le processus développement de Nykanen est spécifique aux SIAD car il introduit la notion de problème et traite la gestion des connaissances seulement dans la partie conception détaillée.

2.2 Modélisation et Simulation

Les modèles et la simulation des systèmes réels sont au coeur des outils informatiques d'aide à la décision. Au delà du seul domaine de l'aide à la décision, nous présentons maintenant les principaux concepts liés à la modélisation et à la simulation des systèmes réels.

2.2.1 La modélisation aujourd'hui

Aujourd'hui la modélisation et la simulation sont devenues des éléments essentiels dans de nombreux domaines scientifiques, industriels et politiques. Quels que soient les domaines, la réalité n'est plus considérée qu'à travers des représentations abstraites et simplifiées : les modèles.

Cette approche par modélisation et simulation procure de nombreux avantages expliquant sa large utilisation :

- Les modèles sont utilisés pour réaliser des simulations et permettent de détecter des erreurs bien en amont des phases de réalisation et de test. Les simulations permettent de réduire les coûts, diminuer les dangers, explorer plusieurs hypothèses.
- Dans un processus de prise de décision, la construction de modèles oblige les décideurs à préciser et expliciter le problème étudié. Ils doivent notamment déterminer quelles sont les contraintes, les hypothèses envisagées, les objectifs... La phase de modélisation est l'occasion d'examiner systématiquement des solutions jusqu'alors inexplorées, les conséquences d'actions encore inenvisageables. Cette étape permet de porter un regard neuf sur un problème et de faire émerger de nouvelles solutions.
- Les problèmes étudiés en utilisant des modèles conduisent au développement de méthodes de résolution abstraites et génériques qui sont réutilisables pouvant apporter des solutions à de nombreux autres problèmes relevant de problématiques similaires.

Aujourd'hui il n'est pas de domaine où l'on ne puisse trouver d'outils informatiques de modélisation et de simulation. La phase de construction d'un modèle est devenue une étape essentielle des processus de prise de décision.

2.2.2 Modèle et simulation

Pour M.L. Minsky [Minsky 68] un modèle peut être défini de la façon suivante : *"pour un observateur A, β est un modèle de B si A peut, à partir de β , apprendre quelque chose d'utile sur le fonctionnement de B"*. Fishwick [Fishwick 97] donne la définition suivante du concept de simulation informatique: *"Computer simulation is the discipline of designing a model of an actual or theoretical physical system, executing the model on a digital computer, and analyzing the execution output"* (cf. Figure 3).

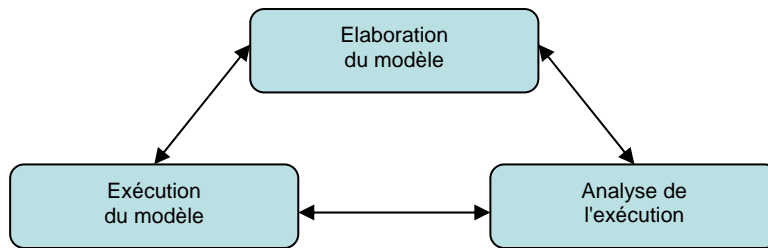


Figure 3 : La simulation informatique selon [Fishwick 97].

Le processus qui conduit du problème à la simulation se décompose selon Ricordel et Demazeau [Ricordel 00] en quatre étapes :

1. **L'analyse.** A ce stade le système est considéré dans sa globalité et sont clairement explicités le type et le domaine d'application du problème.
2. **La modélisation.** Elle correspond au processus d'étude rationnelle et scientifique du système qui doit aboutir à la production d'une représentation abstraite du réel, c'est-à-dire un modèle. Le modélisateur choisit avec l'aide d'un expert du domaine les aspects de la réalité qui doivent être pris en compte et explicite les règles qui régissent le système considéré.
3. **L'implémentation informatique.** Au cours de cette phase le modèle abstrait est traduit en langage informatique puis implanté dans un simulateur.
4. **La simulation.** Elle correspond à la phase de génération de données en utilisant le modèle implémenté pour apporter des solutions à des problèmes concrets.

Dans la théorie de la modélisation et de la simulation, une "expérience de simulation" se compose de plusieurs entités. Nous allons identifier, définir et expliciter les composantes et les relations entre les entités qui selon Bernard Zeigler [Zeigler 00] composent une expérience de simulation :

- Le système source et sa base de données comportementale.
- Le cadre expérimental.
- Le modèle.
- Le simulateur.
- La relation de simulation.
- La relation de modélisation.

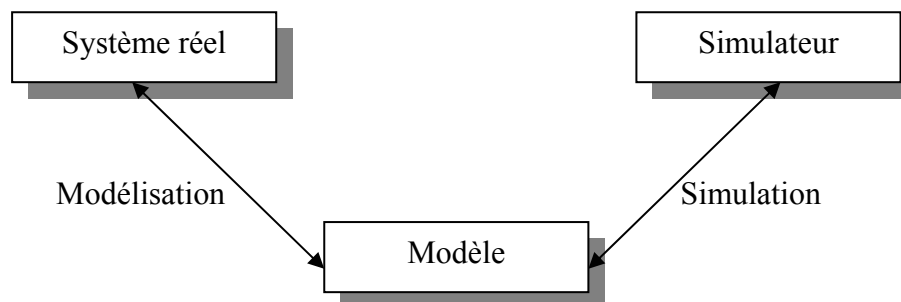


Figure 4 : Modélisation et Simulation d'après Zeigler [Zeigler 00]

La Figure 4 illustre les liens qui existent entre chacune des 3 entités et des 2 relations qui composent une expérience de simulation que nous explicitons maintenant. Ainsi :

- Le système réel est la source des données et constitue la référence.
- Le cadre expérimental définit les limites de validité de la démarche entamée. Il est défini par les objectifs de la simulation, les éléments pris en compte dans le modèle, et les possibilités de validation des simulations par l'expérimentation sur le système réel.
- Le modèle décrit les méthodes de génération de données comparables à celles issues du système réel. La structure du modèle est fixée par la suite des instructions qui constituent les méthodes. Le comportement du système est la suite des données qui peuvent être générées en exécutant les instructions définissant le modèle.
- Le simulateur exécute les instructions qui définissent le modèle et génère les données reconstituant le comportement du système réel.
- La modélisation est la relation qui lie le système réel au modèle et définit comment la réalité doit être représentée. Un modèle est considéré comme valide si dans le cadre de l'étude réalisée les données générées lors de l'exécution du modèle sont en accord avec les informations issues de l'observation du système.
- La relation entre le modèle et le simulateur explicite les méthodes dont dispose le simulateur pour exécuter les instructions constituant le modèle.

2.2.3 Les différents types de modèles

Nous reprenons la classification des modèles que Patrick Coquillard expose dans son ouvrage consacré à la modélisation et à la simulation des écosystèmes [Coquillard 97]. Ce choix s'explique par la similitude de nos approches de la modélisation et la similitude des systèmes que nous sommes amenés à modéliser dans le cadre de nos travaux sur les problématiques environnementales. Selon Coquillard, il existe trois types de modélisation :

1. La modélisation analytique.
2. La modélisation probabiliste.
3. La modélisation par simulation.

► **La modélisation analytique** abouti à la production de modèles mathématiques déterministes continus dans le temps et dans l'espace. Ces modèles prennent la forme de systèmes d'équations qui peuvent parfois être résolus. Ces modèles ne permettent pas de prendre en compte facilement les effets spatiaux et impliquent une démarche de modélisation réductionniste et globalisante.

► **La modélisation probabiliste** fait appel aux probabilités. L'analyse de Markov est l'exemple type de modèle obtenu en suivant cette démarche [Coquillard 97]. La modélisation probabiliste a pour limite l'indépendance du modèle vis à vis du temps et de l'espace.

► **La modélisation par simulation** se subdivise en deux groupes :

1. Des simulations à composante analytique qui comprend :
 - Les modèles théoriques.
 - Les modèles à compartiments.
 - Les systèmes dynamiques asservis à l'équilibre.
2. Des simulations discrètes sans composantes analytiques qui comprend :
 - Les simulations aléatoires, ou méthode de Monte Carlo.
 - Les simulations à évènements discrets.
 - Les simulations de vie artificielle, basées sur des approches orientées objet ou multi-agents.

Les simulations de vie artificielles sont les plus complexes mais aussi les plus puissantes [Coquillard 97]. Ce type de modèle s'appuie sur une approche individus centrés des systèmes réels. Les modèles orientés "vie artificielles" sont en pleine extension car ils profitent des progrès de l'informatique et peuvent être à la base de lucratives activités sur Internet.

2.2.4 Les modèles individu centré

Les simulations individu centré sont basées sur une description individuelle des processus et des interactions. Construire un modèle individu centré consiste à représenter explicitement les individus ou les entités qui composent le système. Ces modèles consistent typiquement en un environnement ou un cadre global dans lequel les interactions se passent et un certain nombre d'individus définis par leur comportement (règles comportementales) et des paramètres caractéristiques. Dans ce type de modèle les caractéristiques de chaque individu peuvent être suivies de façon continue. Ceci contraste avec les techniques de modélisation par agrégation où le modèle simule les changements des caractéristiques moyennées d'une population globale. Cette focalisation à un niveau "microscopique" aboutit à la construction d'un modèle de ces entités, de leur environnement, et de leurs interactions entre elles ou avec l'environnement.

Grimm [Grimm 99] observe principalement deux motivations à l'utilisation de cette approche.

La première est "pragmatique" : l'approche individu centré permet de simuler la variabilité interindividuelle, ce que l'approche agrégée par variables d'état ne permet pas.

La deuxième est "paradigmatique" : l'approche individu centré permet de corriger la théorie apparemment en partie défectueuse provenant de la modélisation par variables d'état.

Les modèles individu centré permettent tout particulièrement d'étudier le passage des dynamiques individuelles aux dynamiques globales par le jeu complexe des interactions entre individus. Dans cette optique Conte et Castelfranchi [Conte 92] distinguent ainsi conceptuellement deux approches classiques qui s'appliquent à la modélisation :

- L'approche top-down, où à partir d'observations macroscopiques, le modélisateur détaille les phénomènes microscopiques, les buts ou les motivations individuelles.
- L'approche bottom-up pour laquelle, au contraire, où à partir d'hypothèses sur le comportement des individus, sur leurs motivations ou leurs modalités d'interactions, le modélisateur cherche à reproduire le comportement macroscopique. Le comportement collectif des individus est alors comparé aux phénomènes macroscopiques observés dans le système réel pour valider les hypothèses réalisées au niveau microscopique [Epstein 96].

L'approche bottom-up est caractéristique de la plupart des approches individu centré qui proposent des modèles individuels pour l'explication ou la caractérisation des comportements collectifs observés.

Les simulations individu centré sont très utilisées pour la formalisation et la vérification de théories sociale, la simulation prédictive pour l'aide à la décision, le test de scenarii, le jeu et l'entraînement. Elles permettent également d'étudier les phénomènes émergeant de l'impact des actions des hommes sur leur environnement [Gimblett 02].

2.3 Les systèmes multi-agents

Dans cette partie de l'état de l'art nous présentons le paradigme multi-agents que nous avons choisi d'adopter pour construire les modèles utilisés pour apporter une aide à la décision. L'approche multi-agents est issue des derniers développements de l'intelligence artificielle distribuée.

Après avoir rappelé l'origine de cette approche nous présenterons les principaux concepts utilisés dans le monde multi-agents.

2.3.1 Bref Historique

La recherche sur les systèmes multi-agents s'inscrit dans la quête perpétuelle qui depuis Prométhée, voit les hommes essayer de construire des objets à son image. A travers les âges les résultats de ces tentatives ont toujours été le reflet de l'avancement technologique et théorique de leur époque. Ainsi se sont succédés des automates joueurs d'échecs, des animaux mécaniques, des robots anthropomorphes.

Deux évolutions majeures, une théorique et l'autre technologique, ont marqué cette entreprise :

- Au début du 19ième siècle, Babbage inventa le concept d'un automate capable d'exécuter tout type de programme. Hélas, il ne put construire une telle machine avec la technologie mécanique disponible à son époque.
- A la fin des années 1930, les progrès technologiques permirent la construction des premières machines universelles capables d'exécuter tous les types de programmes.

Les allemands construisirent à partir de relais téléphoniques le calculateur Z3, tandis que les Etats Unis développèrent le premier calculateur à tubes, l'ENIAC.

A partir des années 1960 la multiplication des ordinateurs dans les laboratoires s'accompagna d'une explosion des recherches sur l'Intelligence Artificielle (IA). Ces travaux ont abouti à la construction d'agents informatiques cognitifs centralisés susceptibles de résoudre toutes sortes de problèmes. A cette époque les recherches visent à rendre les ordinateurs capables de jouer aux échecs, diagnostiquer une maladie, contrôler le trafic aérien, planifier et superviser la production de biens. A terme, l'objectif est de rendre les ordinateurs capables d'effectuer tous les types de travaux aussi bien ou mieux qu'un homme formé à cette tâche. Le but ultime de cette entreprise étant la création d'une machine passant avec succès le test de Turing : un expérimentateur ne pourra pas, à la suite d'un dialogue, faire la distinction entre un opérateur humain et une machine.

Au début des années 1980 des chercheurs en Intelligence Artificielle (IA) qui avaient jusque là presque uniquement concentrés leurs travaux sur les composants internes élémentaires d'un agent intelligent ont commencé à réunir leurs travaux pour construire un agent autonome doté de capacités cognitives semblables à celles des êtres humains.

Une partie des chercheurs en IA se sont alors intéressés à l'étude de problèmes complexes mettant en présence plusieurs agents autonomes. Ils donnèrent ainsi naissance à l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Les progrès de l'IAD ont conduit à la naissance d'une communauté autonome, spécialisée dans l'étude des systèmes distribués comprenant plusieurs agents autonomes. Cette émancipation s'est traduite par l'abandon du terme d'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) au profit des celui de Systèmes Multi-Agents (SMA). Les systèmes Cammarata [Cammarata 83] destiné à résoudre les problèmes de trafic aérien et DVMT [Corkill 83] destiné à superviser le trafic de véhicules terrestres, développés en 1983 sont deux des premières applications importantes qui ont été développées en adoptant une approche multi-agents.

De nombreux auteurs tels que Ferber [Ferber 95] et Jennings [Jennings 01] pensent que les systèmes multi-agents seront le prochain paradigme de la programmation pour le génie logiciel. *"A la programmation orientée objet d'aujourd'hui succédera demain la programmation orientée agent"*[Ferber 95].

2.3.2 La notion d'agent

La définition du concept d'agent et ses caractéristiques diffèrent suivant les écoles et les auteurs. Seule la notion d'autonomie est reconnue presque universellement comme essentielle, les autres attributs caractérisant un agent sont encore en discussion. Après avoir exposés plusieurs définitions du concept d'agent, nous précisons celle que nous avons retenue dans le cadre de notre travail.

Jacques Ferber propose une des premières définition d'agent : *"Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et de ses interactions avec les autres agents"* [Ferber 95].

Michael Wooldridge propose la définition suivante : "An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives" [Wooldridge 01].

Wooldridge propose une définition plus large de l'agent que celle de Ferber : pour lui le caractère communicant des agents n'est pas impératif, ce qui témoigne d'une différence d'approche des systèmes multi-agents. Ferber, et plus généralement la communauté française des SMA, accordent une grande importance à la communication entre les agents et à leur socialisation. Wooldridge insiste sur l'importance des objectifs individuels, constitutifs de l'agent, qui guident chacune de ses actions tandis que Ferber intègre cette notion qu'il considère comme moins primordiale dans le caractère d'autonomie. Ces deux approches des agents se rejoignent naturellement sur la notion d'autonomie et sur celle d'agent immergé dans son environnement.

En nous inspirant de Ferber nous appellerons agent une entité physique ou virtuelle :

1. Qui a la possibilité d'agir dans son environnement.
2. Qui peut communiquer directement avec d'autres agents.
3. Qui est mue par un ensemble de tendances (sous forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser).
4. Qui possède des ressources propres.
5. Qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement.
6. Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune).
7. Qui possède des compétences et offre des services.
8. Qui peut éventuellement se reproduire.
9. Dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte de ses ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

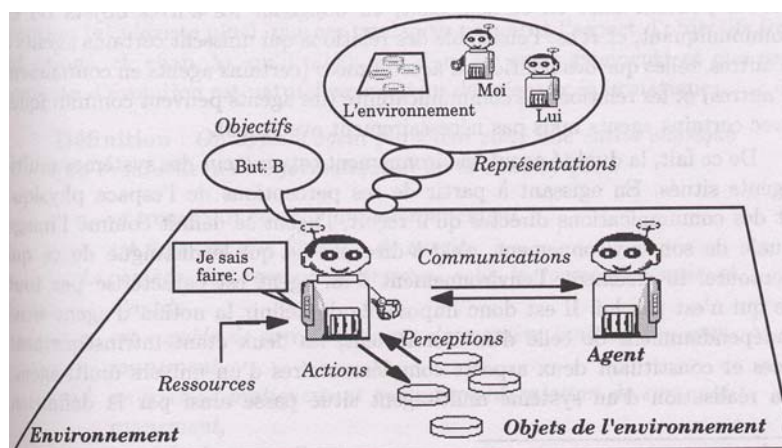


Figure 5 : Interactions d'un agent [Ferber 1995]

La Figure 5 représente les interactions qui existent entre un agent, son environnement et les autres agents [Ferber 95]. L'agent représenté qui dispose de compétences et de représentations tente d'atteindre ses objectifs.

2.3.3 Le concept de système multi-agents

Après avoir précisé la notion d'agent nous allons maintenant expliciter le concept de système multi-agents.

Un système multi-agents (SMA) est généralement défini comme étant un ensemble d'agents, évoluant dans un environnement, en interaction les uns avec les autres et avec l'environnement. Les agents interagissent entre eux et peuvent se comporter les uns vis-à-vis des autres comme des collaborateurs, des concurrents, des ennemis ou des étrangers [Chaib-Draa 94b]. Les agents évoluent dans un environnement qu'ils perçoivent, dans lequel ils peuvent se déplacer et qu'ils peuvent modifier. Dans un SMA, les agents agissent de manière autonome et asynchrone, le contrôle du système est décentralisé et tous les agents sont une source potentielle de contrôle.

La recherche sur les systèmes multi-agents est au carrefour de nombreux domaines :

- Philosophie.
- Mathématiques.
- Logique.
- Informatique.
- Sciences cognitives.
- Ecologie.
- Sociologie.

Les systèmes multi-agents sont des systèmes individus centrés dont le comportement global émerge de l'ensemble des comportements individuels, des interactions inter agents et de celles existant entre les agents et leur environnement.

2.3.4 La notion d'environnement

Pour former un système multi-agents les agents doivent être immergés dans un environnement. En effet, l'ensemble des perceptions et des actions qu'un agent est susceptible de réaliser est entièrement défini par rapport à l'environnement où celui-ci va opérer. L'environnement définit ainsi les conditions d'existence de ce genre d'entités [Odell 02]. Autrement dit, il n'est pas possible de parler d'agent sans parler d'environnement [Weyns 05].

Dans un système multi-agents l'environnement peut être selon les cas un médium d'interaction, un lieu d'interaction, un ensemble de contraintes, un espace de déplacement, un lieu où des ressources sont disponibles, un moyen de structuration.

Pour Russell [Russell 03] les propriétés permettant de caractériser les environnements sont les suivantes :

- **Accessible / inaccessible** : un environnement est dit accessible lorsqu'un agent peut obtenir la totalité des informations sur l'environnement où plus simplement l'ensemble

de celles qui lui sont nécessaires pour décider et agir. Généralement les agents n'ont qu'une perception limitée de leur environnement et la portée de leur action reste locale.

- **Déterministe / stochastique** : dans un environnement déterministe il n'y a pas de place pour les phénomènes aléatoires, une action aura toujours les mêmes conséquences.
- **Statique / dynamique** : un environnement est dit statique lorsqu'il ne possède pas de dynamique propre, dans ce cas les agents sont les seuls à pouvoir le modifier.
- **Discret / continu** : un environnement est discret lorsqu'il existe seulement un nombre fini et fixe de perceptions et d'actions possibles sur lui.

A ces propriétés Ferber [Ferber 95] ajoute une propriété supplémentaire permettant de caractériser un environnement. Celui ci peut être :

- **Centralisé** : un environnement est centralisé lorsque tous les agents ont accès à la même structure de données contenant toutes les informations environnementales. Un environnement centralisé est un bloc monolithique qui est de fait accessible au sens de Russel.
- **Distribué** : un environnement est distribué lorsqu'il est composé d'un ensemble de cellules disposées en réseau. Chaque cellule se comporte comme un mini environnement centralisé. Dans un environnement distribué les cellules interagissent avec leurs voisines, propagent des signaux, hébergent des agents et permettent de modéliser des phénomènes liés au voisinage.

2.3.5 Les agents situés

Nous explicitons ici le concept d'agent situé qui est trop souvent réduit au simple positionnement d'agents physiques dans l'espace. Les interactions entre les agents et leur environnement sont un des points clefs des systèmes multi-agents.

Les agents perçoivent leur environnement et interagissent avec lui. Les relations entre les agents et leur environnement sont de trois types :

- Les perceptions que les agents ont de leur environnement. C'est parce que chaque agent possède sa propre perception/représentation de son environnement qu'il peut avoir un comportement autonome.
- Les actions que les agents peuvent entreprendre sur l'environnement. Dans un système multi-agents, les agents sont dotés de compétences qui leur permettent d'agir sur leur environnement et de le modifier.
- Les actions que l'environnement peut entreprendre sur les agents. Dans un système multi-agents les agents sont sensibles aux modifications de leur environnement et peuvent en subir les conséquences.

Favier [Favier 04] fait la distinction entre les agents localisés dans leur environnement et qu'un observateur peut localiser dans l'espace, et les agents situés dans leur environnement dont le comportement dépend de leur position dans l'espace. Pour saisir la nuance, considérons un agent simple : une montre. Cette dernière perçoit les interactions simples que

sont les manipulations de ses boutons (mise à l'heure, réglage d'une alarme...) et agit en réaction (selon un modèle très simple !). Quel que soit l'endroit où se trouve cette montre dans l'environnement virtuel, elle indiquera l'heure ou sonnera de la même manière : son comportement n'est pas modifié en fonction de sa position, elle n'est pas située dans l'espace. Cependant, une entité qui souhaite consulter l'heure ou régler une alarme sur cette montre devra se trouver à proximité : la montre est localisée dans l'environnement [Favier 04].

Un agent situé est donc un agent qui prend en compte sa situation, et non pas une entité qu'un observateur peut situer dans l'environnement [Favier 04].

2.3.6 Application des SMA

Le paradigme multi-agents est de plus en plus utilisé dans les services, l'industrie et la recherche. Les deux exemples suivants illustrent l'apport du paradigme SMA dans l'industrie et la santé.

2.3.6.1 Atelier de peinture

Parunak [Parunak 1993] décrit le système Flavor Paint Shop, utilisé pour peindre des camions. A la sortie d'une chaîne de montage, des camions doivent être peints d'une couleur particulière en fonction des désirs des clients. Le nombre de postes de peinture est inférieur au nombre de couleurs disponibles. Cela impose de changer la couleur d'un poste, ce qui est coûteux en temps et en peinture. Le système initial centralisé était très coûteux, imposait une planification rigoureuse et prenait mal en compte les pannes. Le système a alors été réécrit sous la forme d'un système multi-agents dans lequel chaque poste de peinture a été représenté sous la forme d'un agent. Lorsqu'un agent est libre il accepte un nouveau camion à partir d'une file d'attente contenant une centaine de camions attendant d'être peints. Cette sélection se fait à partir des trois règles suivantes :

1. Prendre le premier camion de la file qui réclame la même couleur que celle qui est disponible actuellement.
2. S'il n'y a pas de camion de cette couleur, prendre le plus prioritaire et affecter au poste la couleur du camion.
3. S'il n'y a pas de camion prioritaire, prendre le camion suivant dans la file et affecter au poste la couleur du camion.

Ce système simple a réduit de moitié le nombre de changements de couleur par rapport au système centralisé, prend mieux en compte les pannes, et a permis une économie de plus d'un million de dollars par an.

2.3.6.2 Surveillance de patients

Le système GUARDIAN [Roth 89] a pour but de gérer les soins aux patients d'une unité chirurgicale de soins intensifs. Les principales motivations de ce système sont:

1. Le modèle des soins d'un patient dans une unité de soins intensifs est essentiellement celui d'une équipe, où un ensemble d'experts dans des domaines distincts coopèrent pour organiser les soins des patients.
2. Le facteur le plus important pour donner de bons soins aux patients est le partage d'informations entre les membres de l'équipe de soins critiques. Particulièrement, les médecins spécialistes n'ont pas l'opportunité de superviser l'état d'un patient minute par minute; cette tâche revient aux infirmières qui, quant à elles, ne possèdent pas les connaissances nécessaires à l'interprétation des données qu'elles rassemblent.

Le système GUARDIAN répartit donc le suivi des patients à un certain nombre d'agents de trois types différents. Les agents perception/action sont responsables de l'interface entre GUARDIAN et le monde environnant, établissant la relation entre les données des capteurs et une représentation symbolique que le système pourra utiliser, et traduisant les requêtes d'action du système en commandes pour les actionneurs. Les agents en charge du raisonnement sont responsables d'organiser le processus de prise de décision du système. Finalement, les agents en charge du contrôle (il n'y en a habituellement qu'un seul) assurent le contrôle de haut niveau du système.

2.3.6.3 Utilisation de la technologies multi-agents

La technologie multi-agents se diffuse dans de nombreux secteurs:

- Dans le but de proposer des jeux plus attractifs (Aibo, Tamagotchi, WOW...), l'industrie des jeux vidéo et des loisirs utilise de plus en plus l'approche multi-agents pour créer des personnages plus vraisemblables et réalistes. Ainsi afin de bénéficier des derniers développements de la technologie SMA, des éditeurs de jeux vidéo ont noué des partenariats avec les équipes de recherche.
- Les principaux acteurs de télécommunications mènent actuellement d'intenses activités de recherche sur la technologie agent : British Télécom, France Télécom, Deutch Telekom, NTT, Nortel, Siemens [Jarras 02].
- Le commerce électronique utilise de plus en plus la technologie multi-agents dans le but de personnaliser les relations avec les consommateurs. Les services amazon.com et ebay.com sont deux exemples de démarche de personnalisation des relations avec les clients dans le but de leur proposer les produits les plus adaptés à leur profil.

De nombreux colloques spécialisés organisés par des association telles que l'American Association for Artificial Intelligence (AAAI), International Joint Conferences on Artificial Intelligence (IJCAI) et International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR) permettent aux chercheurs d'exposer leurs travaux.

2.3.7 Classification des agents

Les agents dépendent du système étudié, ceux-ci peuvent être virtuels ou physiques, être ou non situés dans leur environnement, mobiles ou statiques, communicants ou non.

La classification des agents pourrait comporter une multitude de catégories. Les recherches menées conduisent la communauté des SMA à classer les agents en fonction de la nature de leur comportement et à ne plus retenir aujourd'hui que trois grandes catégories :

- Les agents réactifs.
- Les agents cognitifs.
- Les agents hybrides.

Nous allons maintenant préciser les attributs et les caractéristiques qui permettent de classer les agents dans une de ces trois catégories.

2.3.7.1 Les agents réactifs

Les agents réactifs agissent en fonction de leur perception des changements de leur environnement, des messages qu'ils reçoivent, de leur état mental et de leurs buts. Ils se caractérisent par une absence de représentation de leur environnement. Leurs actes ne sont pas déclenchés à la suite d'un raisonnement complexe, de l'exécution d'un plan, de l'expérience qu'ils auraient pu acquérir. Ils réagissent simplement de manière "réflexe" en fonction de stimuli extérieurs et de leurs besoins immédiats.

Les agents réactifs sont, du fait de la simplicité de leur comportement, les plus faciles à concevoir. Les agents réactifs servent à modéliser des entités aux comportements simples tels que des oursins, des fourmis, une climatisation ou un firewall.

2.3.7.2 Les agents cognitifs

Les agents cognitifs sont dotés de capacités de raisonnement importantes. Leur comportement ne se limite pas à répondre immédiatement aux stimuli venant de l'extérieur. Ils disposent d'une représentation de leur environnement et accumulent de l'expérience. Pour atteindre leurs buts, ces agents sont capables d'échafauder des plans et de coopérer. Ils utilisent l'expérience qu'ils ont acquise pour prendre des décisions. Dans de nombreux systèmes, ces agents sont insérés dans des réseaux sociaux et cherchent à coopérer avec d'autres agents pour arriver à atteindre leurs fins. Les agents cognitifs suivent le plan qu'ils ont établi jusqu'à son terme avant d'entreprendre une nouvelle délibération. Cette rigidité dans leur comportement leur fait préférer les agents hybrides qui sont capables de se détourner provisoirement de leur plan pour saisir une opportunité.

Les agents cognitifs peuvent représenter des entités aussi diverses qu'un client de supermarché, un négociateur, un lobby ou un routeur IP.

2.3.7.3 Les agents hybrides

Au début des années 1990 il apparaît que certains problèmes ne peuvent trouver de solution en intégrant uniquement des agents strictement cognitifs ou purement réactifs.

Des auteurs tels que Ferber [Fergusson 92], Georgeff [Georgeff 87], Chaib-Draa [Chaib-Draa 94a] proposent alors de prendre en considération une nouvelle catégorie d'agents au comportement hybride.

Les agents hybrides sont un compromis entre les agents cognitifs purs qui suivent imperturbablement le plan qu'ils ont établi, et les agents strictement réactifs qui ne prennent leurs décisions qu'en fonction des données provenant de ses senseurs. Les agents hybrides possèdent une représentation partielle de leur environnement, ils savent élaborer et suivre un plan pour arriver à satisfaire leurs désirs. De plus ils disposent d'une souplesse comportementale qui leur permet d'abandonner temporairement l'exécution de leur plan pour saisir les opportunités qui s'offrent à eux.

Les agents hybrides sont ceux qui possèdent le comportement le plus proche du comportement naturel de l'homme et des animaux supérieurs qui sont capables d'abandonner pour un temps leur tâche principale pour profiter d'une opportunité.

2.3.8 Architectures des agents

Bien que les agents soient classés en fonction de la nature de leur comportement en trois catégories, il existe plus de trois architectures pour construire des agents. Les équipes de chercheurs proposent un nombre toujours plus grand d'architectures internes pour implémenter les agents et "fabriquer" leur comportement. Nous nous limitons donc à présenter les architectures les plus importantes pour la communauté des SMA, les autres n'étant le plus souvent que des déclinaisons de ces dernières.

2.3.8.1 Architecture BDI

Dans le cadre du raisonnement pratique, un raisonnement orienté vers la prise en compte des états mentaux, les chercheurs ont développé l'architecture BDI [Bratman 87], [Bratman 88], [Georgeff 87], [Rao 91a], [Rao 91b], [Rao 92], [Singh 94] (de l'anglais Belief, Desire, Intention pour croyance, désir, et intention), une architecture bâtie autour du raisonnement pratique. Les agents BDI sont représentés par un "état mental" ayant les attitudes mentales suivantes :

- Les *croyances* d'un agent sont ce qu'il connaît de son environnement. Il maintient en mémoire un réseau d'objets formant une image, reproduction partielle de son environnement, des autres agents.
- Les *désirs* sont les états possibles envers lesquels l'agent peut vouloir s'engager. Les désirs associés aux agents de type BDI correspondent tout à la fois à des visions du

monde futur, à des buts ou des objectifs cohérents (la cohérence étant ici symbolique d'un désir rationnel), et à des plans [Rao 92] pour la réalisation des buts et objectifs de l'agent.

- Les *intentions* sont les états envers lesquels l'agent s'est engagé, et envers lesquels il a engagé des ressources. Elles sont obtenues à partir des buts par la notion d'engagement [Cohen 88].

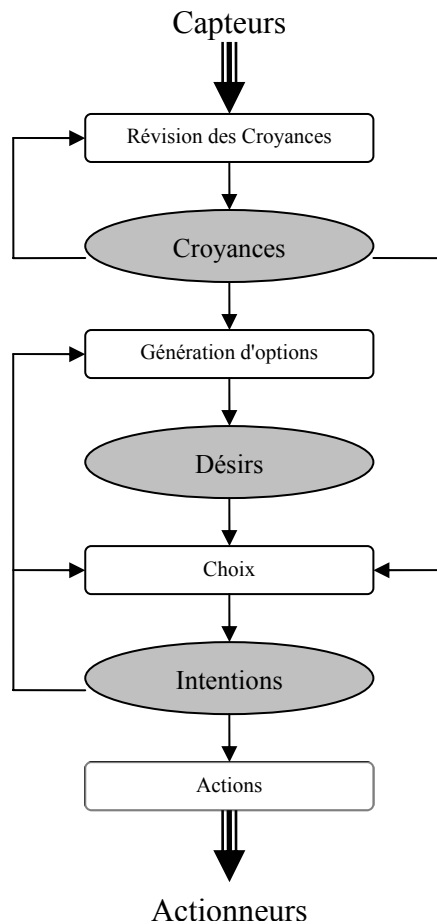


Figure 6 : Principe d'une architecture BDI

Un agent ayant une architecture BDI (cf. Figure 6) utilise continuellement le flux d'informations provenant de ses capteurs pour mettre à jour les croyances qui constituent sa représentation de l'univers. La révision de ses croyances s'accompagne de la possibilité de saisir de nouvelles opportunités, la mise au jour de nouvelles intentions et la sélection par l'agent BDI des actions à entreprendre en fonction de ses intentions. L'architecture BDI est très utilisée pour construire des agents ayant un comportement cognitif ou hybride.

2.3.8.2 Architecture de subsumption des agents réactifs

Brooks [Brook 86, 91a, 91b] propose une architecture alternative au modèle symbolique/logique basée sur une représentation abstraite de l'environnement, une logique symbolique et des communications parfaites entre les agents (IA symbolique). Cette nouvelle approche est aujourd'hui appelée IA réactive.

Brooks émet trois hypothèses qui fondent son approche :

- Un comportement intelligent peut être généré sans qu'il soit nécessaire de faire appel à une représentation explicite telle que celle utilisée en IA symbolique.
- Un comportement intelligent peut être généré sans qu'il soit nécessaire de faire appel à un raisonnement abstrait tel que celui utilisé en IA symbolique.
- L'intelligence est une propriété qui émerge de certains systèmes complexes.

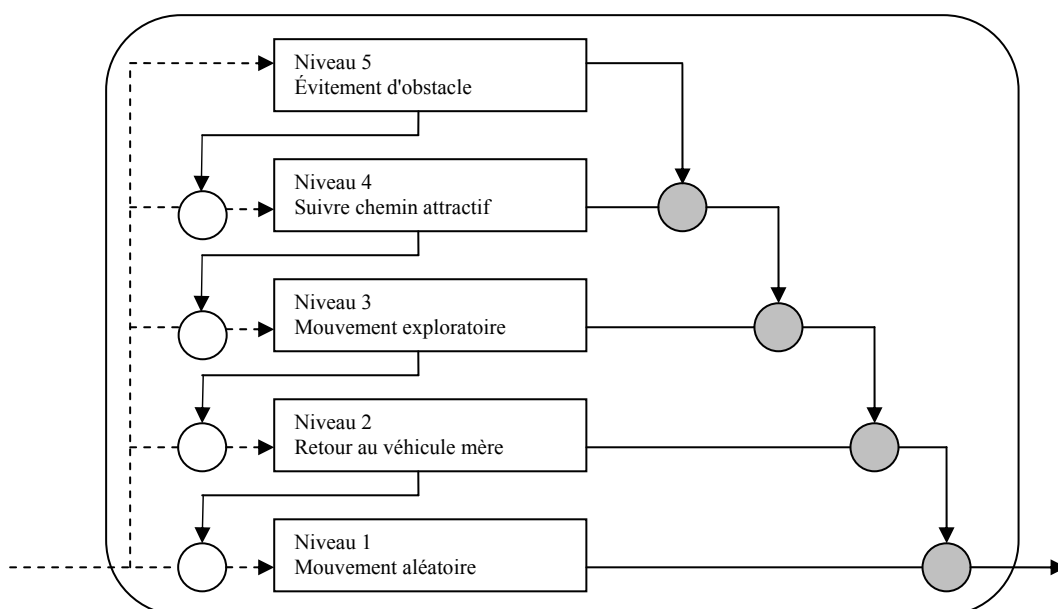


Figure 7 : Architecture de Subsumption

La Figure 7 reproduit l'architecture de subsumption d'un agent réactif chargé de collecter un minerai sur Mars [Steels 89]. Les comportements des niveaux supérieurs inhibent les comportements des niveaux inférieurs.

Brooks propose l'architecture de subsumption pour des agents réactifs. Dans cette approche le comportement d'un agent résulte de la compétition entre plusieurs comportements réactifs élémentaires. Ainsi à chaque stimulus correspond un comportement élémentaire (une action). L'ensemble des comportements élémentaires permet à un agent d'accomplir une tâche complexe. L'architecture des agents répondant à ce paradigme est généralement représentée par un ensemble hiérarchisé de couches comportementales. Les comportements hiérarchiquement inférieurs sont dédiés à tâches moins abstraites que les supérieurs. Les

comportements supérieurs inhibent les comportements appartenant aux couches de niveaux inférieurs.

2.3.8.3 Architecture des agents hybrides

Les agents hybrides disposent de ressources limitées, interagissent avec les autres agents et alternent entre un comportement réactif et un comportement cognitif. Une approche élémentaire consiste à faire dépendre chacun des comportements d'un sous système différent. Ceci conduit naturellement à considérer des architectures de couches hiérarchisées qui interagissent les unes sur les autres. Nous examinons maintenant l'architecture en couches horizontales TouringMachines et l'architecture InteRRaP basée sur une structure verticale.

2.3.8.3.1 Architecture hybride TouringMachines

L'architecture TouringMachine proposée par A. Ferguson [Ferguson 92] utilise une structure en couche horizontale. Un premier sous système traite les informations provenant des capteurs pour alimenter le sous système qui va proposer des actions susceptibles d'être entreprises.

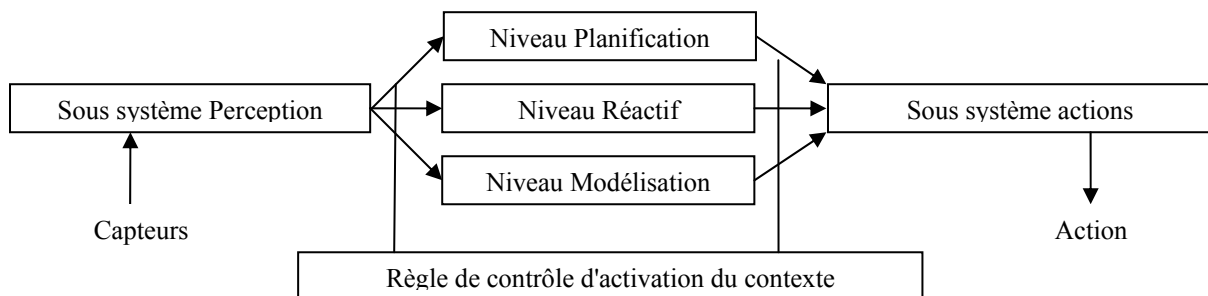


Figure 8 : Architecture en couches horizontale TouringMachines

L'architecture TouringMachines est caractérisée par l'existence de trois couches produisant simultanément des propositions d'actions (cf. Figure 8). Une couche réactive suggère des réponses aux changements immédiats de l'environnement de l'agent. La couche de planification programme les actions quotidiennes que doit faire l'agent, cette couche contient une bibliothèque de séquences permettant à l'agent d'atteindre des buts. Une couche de modélisation stocke les représentations abstraites de l'environnement, des autres agents et de l'agent lui-même. La couche modélisation permet d'anticiper les conséquences des actions que va entreprendre l'agent et de fixer de nouveaux buts que la couche de planification s'efforcera d'atteindre en usant de sa bibliothèque de plans. Le "sous système actions" sélectionne la couche qui prend le contrôle effectif de l'agent.

2.3.8.3.2 Architecture hybride InteRRaP

L'architecture InteRRaP ("Integration of Reactive Behavior and Rational Planning") développée par Muller [Muller 96] est un exemple d'architecture d'agent hybride verticale comportant trois couches de contrôle (cf. Figure 9). Chacune de ces couches est associée à une base de connaissances relative à son niveau. La première couche gère le comportement réactif de l'agent. La seconde couche permet de planifier des actions et d'exécuter des plans pour atteindre les buts de l'agent. La couche supérieure gère les interactions avec les autres agents. Lorsque l'agent doit entreprendre une action ou réagir face à un événement la première couche réactive est activée, si elle n'est pas en mesure d'apporter une réponse la couche de planification est à son tour activée, et finalement si celle-ci ne peut résoudre le problème c'est la couche supérieure qui est à son tour activée.

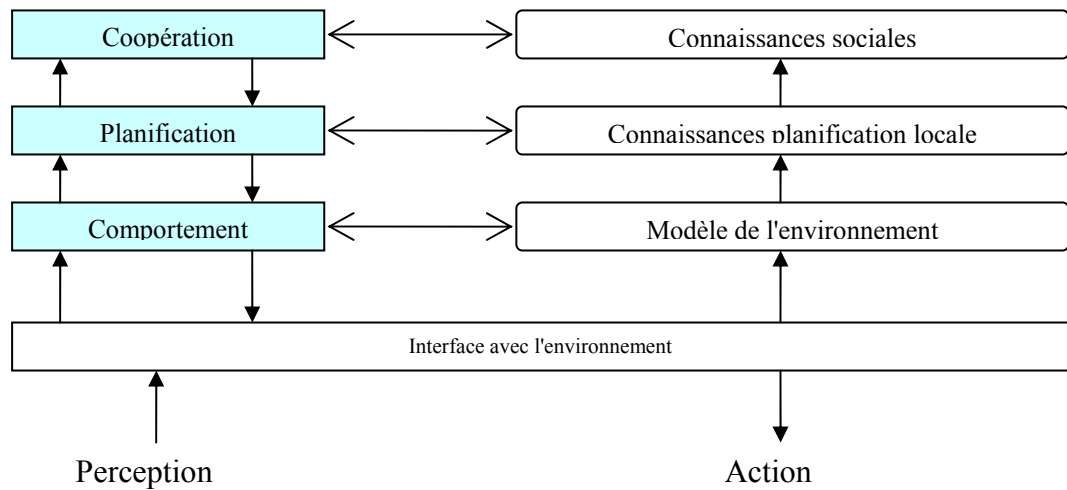


Figure 9 : Architecture InteRRaP

A la différence de l'architecture TouringMachine, les couches de l'architecture InteRRaP ne sont pas en concurrence pour prendre le contrôle de l'agent mais coopèrent pour atteindre le même but. Lorsqu'une couche a choisi un but, elle délègue à la couche de niveau immédiatement inférieur, l'exécution du plan permettant de l'atteindre.

2.3.9 Agent ou objet ?

Les personnes familiarisées avec la notion d'objet informatique peuvent au premier abord ne pas faire de distinction entre un agent et un objet informatique. En effet les objets comme les agents possèdent des attributs et des méthodes pour les manipuler.

Wooldridge [Wooldridge 01] recense trois différences principales entre l'approche objet et l'approche multi-agents :

1. Contrairement aux objets, les agents sont autonomes. Ainsi lorsqu'un objet reçoit un message, une méthode est exécutée, alors que dans le cas d'un agent la réception d'un message n'entraîne pas systématiquement l'exécution d'une action. L'agent est libre de ses actions et ne réagit que si une action le rapproche de ses buts.
2. Un agent est caractérisé par son comportement flexible (réactif, proactif - il agit pour atteindre ses buts, social – il interagit avec d'autres agents) et autonome. Ce type de caractéristique n'est pas nécessaire à la définition d'un objet. Bien qu'il soit possible de développer des programmes orientés objet qui intègrent cette notion de comportement autonome, cette notion est étrangère au standard de la programmation objet.
3. Les agents disposent en général de leur propre Thread, ils agissent tous en même temps : ils mènent leurs activités en parallèle. Les objets partagent en général un seul et même Thread, l'exécution d'un programme orienté objet est fondamentalement séquentielle.

De plus, dans un système orienté objet, un objet exécute une méthode lorsque un autre objet y fait appel. Dans les systèmes orienté objet, il y a une seule et unique source de contrôle. Ils sont intrinsèquement centralisés. Dans un système multi-agents, tous les agents sont une source potentielle de contrôle et peuvent déclencher l'exécution d'actions par d'autres agents qui à leur tour activeront d'autres actions. Dans un SMA, les sources de contrôle sont multiples, un système multi-agents est intrinsèquement décentralisé.

2.3.10 Interactions entre agents

L'aptitude à communiquer et les interactions mutuelles des agents sont deux caractéristiques fondamentales de l'approche multi-agents. Ces deux aspects sont étroitement liés : en effet, deux agents seront incapables de coopérer ou d'échanger si les canaux de communication ne leurs permettent pas de fixer les termes d'un accord. Les interactions entre les agents dépendent de leur aptitude à communiquer. En effet, comment deux agents partageant le même but ou possédant des compétences complémentaires pourraient ils coopérer si chacun ignore tout des intentions de l'autre ?

Dans un système multi-agents, les agents interagissent entre eux et peuvent se comporter les uns vis-à-vis des autres comme des collaborateurs, des concurrents, des ennemis ou des étrangers [Chaib-Draa 94b]

Les interactions entre les agents, leurs façons de communiquer, ont fait l'objet d'importants travaux dont nous allons maintenant présenter les principales avancées.

2.3.10.1 Communication entre les agents

La communication entre les agents est un point central de la théorie des systèmes multi-agents. En effet, sans communication entre les agents le comportement global du système ne serait que la somme des comportements individuels sans prendre en compte les résultats des interactions qui permettent l'émergence de nouveaux phénomènes.

La littérature présente de nombreux protocoles de communication entre les agents. Nous ne considérons ici que ceux qui nous paraissent être les plus importants.

2.3.10.1.1 Communication indirecte via l'environnement

L'environnement commun à tous les agents peut être utilisé comme support de communication, le nombre de messages pouvant ainsi être émis est limité. Les agents capables d'utiliser ce type de communication doivent intégrer les informations transmises par leurs senseurs pour décider de leurs actions. Les agents purement cognitifs poursuivant quoi qu'il arrive le plan qu'ils ont arrêté sont par nature exclus de ce type de communication.

Le système multi-agents MANTA développé par Drogoul [Drogoul 92] est un exemple spectaculaire du potentiel offert par la communication entre les agents via leur environnement. MANTA reproduit le fonctionnement d'une fourmilière où les fourmis sont incarnées par des agents purement réactifs, tous identiques, qui se coordonnent exclusivement par les phéromones qu'elles déposent sur le sol.

2.3.10.1.2 Communication à l'aide d'un tableau noir

Le principe du tableau noir, appelé blackboard [Engelmore 88], est basé sur deux éléments :

- Un ensemble d'entités qui produisent et sont sources de savoir, chacune étant spécialisée dans un type de connaissance,
- Un espace structuré de partage des données utilisé par les entités pour communiquer.

Les entités produisent des informations qui sont stockées dans un espace commun, le tableau noir. Les agents qui sont concernés par ces informations en prennent possession pour les modifier ou produire de nouvelles informations qui sont à leur tour déposées dans l'espace commun. Ce principe simple peut être perfectionné en partitionnant le blackboard en différents niveaux. Les données d'un niveau ne sont alors accessibles que par les agents appartenant au même niveau ou à ceux adjacents [Nii 89].

2.3.10.1.3 *Communication directe par échange de messages*

Les agents peuvent communiquer en s'adressant directement des messages comme le font des humains. Des études importantes menées sur les messages et les conversations ont abouti à la théorie des actes du langage fondée par Austin [Austin 62] et Searle [Searle 69].

Austin a établi que toute émission d'un énoncé en contexte, permet la réalisation d'un acte qui, en tant que tel, est destiné à accomplir un acte appelé acte de langage. L'élément qui le caractérise est sa valeur illocutoire qui représente le "faire" essentiel de l'énonciation. Une énonciation contient aussi une valeur locutoire (signification) et une valeur perlocutoire (effets attendus sur soi et sur les autres). Pour Austin, la valeur illocutoire d'un message est fondamentalement plus importante que sa valeur locutoire.

La théorie des actes du langage établit que tout message, en plus de son contenu propositionnel, contient un acte illocutoire qui appartient à l'un des cinq types suivants :

- Acte assertif : l'émetteur envoie des informations.
- Acte commissif : l'émetteur s'engage à accomplir une action.
- Acte directif : le locuteur essaie d'obtenir du récepteur une action.
- Acte expressif : l'émetteur expose son état mental face à une situation.
- Acte déclaratif : l'émetteur accomplit au moment de l'énonciation l'action qu'il dit accomplir comme c'est le cas lors de l'énoncé de définitions ou de condamnations.

Un acte est noté F(P), où F est sa force illocutoire, sa composante intentionnel, et P son contenu propositionnel, sa composante représentationnelle. La force illocutoire d'une énonciation est décomposée en six composantes primaires : but illocutoire, mode d'atteinte du but, conditions sur le contenu propositionnel, conditions préparatoires, conditions de sincérité, degré de puissance des conditions de sincérité.

La taxonomie des verbes performatifs (ceux qui permettent de décrire l'action réalisée par le locuteur) a été proposée à partir des valeurs possibles des composantes de la force illocutoire. Les verbes performatifs ont été classés selon le type d'acte qu'ils permettent de réaliser :

- Assertifs, comme les verbes dire, penser, informer.
- Directifs, comme les verbes avertir, demander, exiger.
- Déclaratifs, comme les verbes déclarer, reconnaître, ratifier.
- Commissifs, comme les verbes promettre, acquiescer, garantir, approuver.
- Expressifs, comme les verbes approuver, féliciter, excuser.

Un message peut donc être structuré de la façon suivante :

JE « verbe performatif » « contenu propositionnel ».

La théorie des actes du langage, tout particulièrement son aspect taxonomique, a été reprise par la communauté des chercheurs SMA qui ont développé des langages et des protocoles pour la communication entre les agents.

Parmi l'ensemble langages destinés aux systèmes multi-agents deux se détachent :

- KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) [Finin 93] proposé par la DARPA inclut à son origine en 1993, 41 performatifs répartis en 11 types.
- ACL (Agent Communication Language) proposé par la Foundation for Intelligent Physical Agents [FIPA 99] en 1999 bénéficie de l'expérience apportée par KQML.

Les communications entre les agents sont l'objet de nombreux travaux théoriques et de normalisation principalement coordonnés par deux organisation : l'Object Management Group (OMG) et la FIPA. La norme proposée par la FIPA tend à s'imposer comme la référence des langages de communication entre les agents.

2.4 Les Systèmes d'Informations Géographiques

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) sont de plus en plus utilisés par des utilisateurs aux besoins très différents: gestion de réseaux, cadastre, urbanisme, messagerie, aménagement du territoire, protection de l'environnement. Chacun de ces utilisateurs tend à développer sa propre définition des SIG. Afin de pouvoir utiliser des données provenant de sources très différentes dans le cadre de nos recherches, nous allons préciser notre définition du concept de système d'informations géographiques.

Définition: Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées [De Blomac 94].

Les systèmes d'informations géographiques proposent une représentation de l'espace en utilisant des primitives géographiques telles que des points, des arcs, des polygones (vecteurs) ou des grilles (raster). Des informations qualitatives, les meta-données (données sur les données), sont associées à ces primitives.

L'information géographique peut être définie comme l'ensemble de la description d'un objet et de sa position géographique à la surface de la Terre. Le but d'un SIG est souvent de fournir une aide à la décision. Il peut aussi servir à produire des cartes pour répondre à des besoins spécifiques : organisation de tournées, circuits touristiques, prévention des incendies...



Figure 10: Composantes d'un SIG

Les SIG se composent de 5 parties (cf. Figure 10):

1. Le logiciel qui offre les fonctions élémentaires suivantes :

- Saisie des informations géographiques sous forme numérique (Acquisition).
- Gestion de base de données (Archivage).
- Manipulation et interrogation des données géographiques (Analyse).
- Mise en forme et visualisation (Affichage).
- Représentation du monde réel (Abstraction).

2. Les données :

Les données constituent la partie la plus importante des SIG. Les données géographiques peuvent être importées à partir de fichiers ou saisies par un opérateur.

3. Les matériels :

Le traitement des données à l'aide des logiciels se fait en utilisant un ordinateur. Pour faciliter la diffusion des résultats produits par un SIG, de plus en plus de systèmes adoptent une architecture client serveur.

4. Les savoir-faire :

Un SIG fait appel aux connaissances, savoirs, savoir-faire de nombreux domaines: géographie, cartographie, analyse des données et des processus (analyse Merise, Unified Modeling Language), informatique, statistique, urbanisme, hydrologie... Cette approche pluridisciplinaire impose la collaboration d'experts appartenant à des domaines très différents.

5. Les utilisateurs :

Les utilisateurs de SIG, architectes, maires, paysagistes, techniciens EDF, n'étant pas forcément des spécialistes, un SIG doit proposer une série de boîtes à outils simple et intuitive que l'utilisateur utilisera pour réaliser son projet. Toutefois seule une bonne connaissance des données manipulées et de la nature des traitements effectués par les logiciels permettra d'interpréter correctement les résultats obtenus.

Quel que soit le domaine d'utilisation, un SIG permet de répondre à 5 questions :

- Où : Où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
- Quoi : Quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- Comment : Comment les objets sont répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? C'est l'analyse spatiale.
- Quand : Quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- Et si : Que se passerait-il s'il se produisait tel événement ?

L'information géographique se compose :

- De données descriptives (ou sémantiques, ou tabulaires ou attributaires).
- D'objets géographiques.
- De méta données.

Les données attributaires

Les données attributaires décrivent un objet géographique : nom d'une route, type d'un bâtiment, nombre d'habitants d'un immeuble, débit d'un cours d'eau, tension d'une ligne de transport d'énergie, type d'arbres dans un verger. Les attributs ne sont pas stricto sensu des informations géographiques, mais contribuent à les qualifier les objets.

Les objets géographiques

Les objets géographiques sont organisés en couches. Chaque couche fait référence à un thème, par exemple, couvert végétal, voies de navigation.

Trois types d'entités géographiques peuvent être représentés :

- Le point (x,y).
- La ligne ((x1,y1), ..., (xn, yn)).
- Le polygone.

Deux modes de représentations des données sont possibles :

- Vectoriel (format vecteur) : les objets sont représentés par des points, des lignes, des polygones ou des polygones à trous ;
- Matriciel (format raster) : il s'agit d'une image, d'un plan ou d'une photo numérisés et affichés dans le SIG en tant qu'image.

Dans un SIG, un système de coordonnées terrestres (sphérique ou projectif) permet de référencer les objets dans l'espace et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres. Les objets sont généralement organisés en couches (cf. Figure 11), chaque couche rassemblant l'ensemble des informations se rapportant à un même thème.

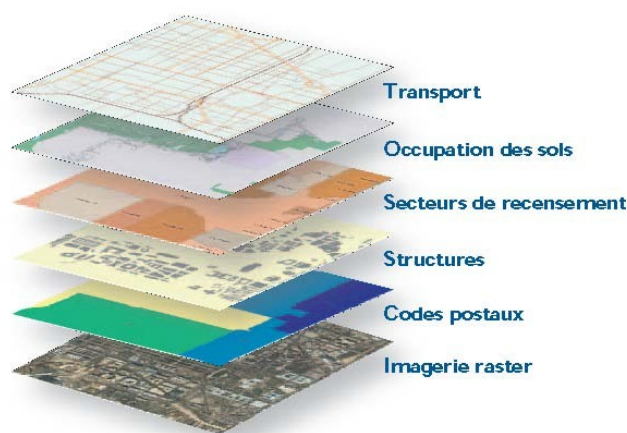


Figure 11 : Couches d'un SIG

Avec un SIG, les relations entre les objets peuvent être calculées et donner naissance à des points d'intersection afin d'éviter la répétition d'objets superposés. Ainsi une parcelle bordant une route aura les mêmes sommets que ceux définis pour la route.

Les meta-données

Un SIG manipule des données provenant de différentes sources, aussi celles-ci sont accompagnées d'informations caractérisant la source elle-même, soit encore de données sur les données : des méta-données. Les meta-données apportent, par exemple, des informations sur la nature des données, le système de projection, l'étendue géographique, date de saisie.

2.5 Aide à la Décision et SIG

A partir du milieu des années 90 les décideurs ont commencé à utiliser les SIG comme des outils d'aide à la décision dans le but de mettre en évidence des faits spécialisés, de chercher des solutions à des problématiques, de réaliser des analyses, de comparer des scénarii. Dans le cadre de l'aide à la décision, les SIG sont souvent utilisés pour mener des études permettant de valider des hypothèses, de confirmer une présomption ou de comprendre un phénomène localisé [Bordin 02].

Parmi les domaines où les SIG apportent une aide à la décision, nous citerons les cas suivants où plus aucune décision ne se prend aujourd'hui sans leur utilisation :

- Géomarketing,
- Implantations de dépôts et de magasins.
- Aménagement du territoire, implantation d'équipements collectifs.

Les décideurs utilisent les SIG pour répondre à des questions de type "comment": comment les objets sont répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? Les décideurs font appels aux fonctions d'analyse spatiale des logiciels pour manipuler des données géographiques qui constituent un modèle factuel de la réalité.

2.6 Conclusion

A l'issue de cette partie nous avons présenté les concepts de décision, d'aide à la décision, de modèles, de systèmes multi-agents et de systèmes d'informations géographiques qui servent de base à nos recherches sur l'aide à la décision, il apparaît que les questions de représentations sont au coeur du travail d'élaboration d'une approche hybride SMA-SIG pour la définition d'un système d'aide à la décision.

3 SMAG, une nouvelle architecture SMA - SIG

Après avoir présenté dans l'Etat de l'art les principaux concepts liés à l'aide à la décision, à la modélisation et aux systèmes multi-agents, nous proposons maintenant un cadre théorique pour le développement de systèmes informatiques d'aide à la décision qui exploitent simultanément deux représentations de la réalité. Dans l'approche hybride que nous avons choisi pour modéliser les systèmes réels, nous avons couplé un système d'informations géographiques à un système multi-agents.

Nous privilégions une approche globale des systèmes informatiques d'aide à la décision qui s'étend de l'analyse du problème jusqu'au codage des modèles. Nos recherches, qui s'appuient sur la théorie de la résolution de problèmes, aboutissent à la présentation d'une nouvelle architecture de plateforme, destinée au développement d'outils d'aide à la décision, qui exploitent simultanément deux représentations de la réalité. Ces deux représentations sont construites, pour l'une, suivant une approche individu centré de type multi-agents et selon un point de vue de géographe pour l'autre.

Notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision s'articule autour de quelques points principaux :

- En quoi notre démarche SMA-SIG est elle originale ?
- Quels sont les avantages d'un couplage SMA - SIG ?
- Quelles sont les connaissances nécessaires pour apporter une aide à la décision ?
- Quelles connaissances intègre le SIG ?
- Quelles connaissances intègre le SMA ?
- Quelles informations constituent une simulation dans une approche SMA – SIG ?
- Définir les contraintes qu'impose l'utilisation de deux représentations de la réalité ?
- Quelle architecture pour une plateforme de développement d'outils d'aide à la décision qui utilisent une approche hybride SMA – SIG ?

Nos recherches nous conduisent à examiner quelles sont les connaissances nécessaires pour apporter une aide à la décision en utilisant simultanément les deux représentations de la réalité que sont un SIG et un SMA. Nous explicitons la nature des connaissances qui sont respectivement agrégées par les systèmes d'informations géographiques et par les systèmes multi-agents dans le cadre d'une assistance à la prise de décision.

3.1 Une approche hybride originale

Nous proposons de développer de nouveaux outils d'aide à la décision basés sur une approche nouvelle couplant SMA et SIG. Les outils informatiques d'aide à la décision décrit dans l'Etat de l'art utilisent des modèles prédictifs pour générer des données à partir des hypothèses à explorer. Les modèles utilisés dans ce cadre sont classiquement des modèles analytiques qui sont construits en utilisant une démarche descendante de modélisation "top-bottom" : les systèmes sont décomposés en sous systèmes qui sont à leur tour décomposés.

La première originalité de notre approche tient du fait que nous choisissons une démarche de modélisation qui part des systèmes élémentaires. Ainsi le comportement global du système n'est pas seulement l'addition de l'ensemble des comportements individuels, mais aussi le résultat des interactions entre les agents. Le comportement global du système émerge de

l'ensemble des comportements individuels. Cette approche ascendante, multi-agents, bottom-up, commune en intelligence artificielle distribuée, n'est pas fréquemment utilisée pour construire les modèles employés dans les outils d'aide à la décision.

La seconde originalité de notre approche tient à l'utilisation simultanée d'un système multi-agents et d'un système d'informations géographiques. La littérature offre peu d'exemples de couplage de ces deux types de représentations de la réalité. Intrinsèquement, les logiciels de gestion d'informations géographiques ne disposent pas des primitives de modélisation qui permettraient la construction de modèles suivant le paradigme multi-agents. Et les différentes plateformes multi-agents n'intègrent pas les outils de base indispensables à la gestion des informations géographiques. Dans le domaine de l'aide à la décision, l'utilisation conjointe d'un SMA et d'un SIG est un nouvel objet de recherches, peu de réalisations ont à ce jour été dévoilées.

La troisième originalité de notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision vient de la décentralisation du contrôle de la dynamique des systèmes modélisés, qui est héritée de la nature multi-agents des modèles que nous choisissons d'utiliser. Comme il a été précisé dans l'état de l'art (cf. 2.3.9 Agent ou objet ?), les SMA sont caractérisés par l'existence de multiples sources de contrôle : tous les agents sont potentiellement une source de contrôle asynchrone. Cette caractéristique constitue une différence majeure entre notre approche et l'approche classique des systèmes informatiques d'aide à la décision qui utilisent des modèles dont le contrôle est à la fois synchrone et centralisé.

3.2 Avantages d'une approche hybride SMA - SIG

Les systèmes d'informations géographiques permettent de saisir, stocker, gérer, visualiser et manipuler des informations sur des objets géoréférencés. Ces fonctionnalités sont très utiles pour saisir et traiter les données collectées sur le terrain. Les SIG offrent également de nombreux outils d'analyse spatiale et peuvent intégrer des modèles des objets référencés. Leurs capacités de modélisation sont suffisantes pour modéliser des acteurs aux comportements simples, de type réactifs. En revanche, de part leur nature, ils ne permettent pas de modéliser des systèmes complexes dans lesquels interagissent des agents cognitifs communicants qui ont des comportements complexes [Gonçalves 04]. La construction de modèles suivant le paradigme multi-agents nécessite de disposer de primitives de modélisation spécifiques qui sont aujourd'hui absentes des logiciels d'information géographique, l'utilisation d'une plateforme multi-agents permet de disposer de ce types de primitives.

La modélisation d'un système est un long processus interactif qui nécessite une étroite coopération entre le modélisateur et des experts. De nombreux auteurs proposent des processus incrémentaux [*modélisation – simulation – analyse – modélisation*] qui permettent de construire et de valider des modèles. La Figure 12 illustre le processus de validation des modèles et à partir des résultats obtenus par simulation qui a été proposé par Sargent [Sargent 01]. Tous les processus de construction et de validation de modèles sont basés sur la comparaison des données obtenues par l'utilisation des modèles avec celles relevées sur le terrain.

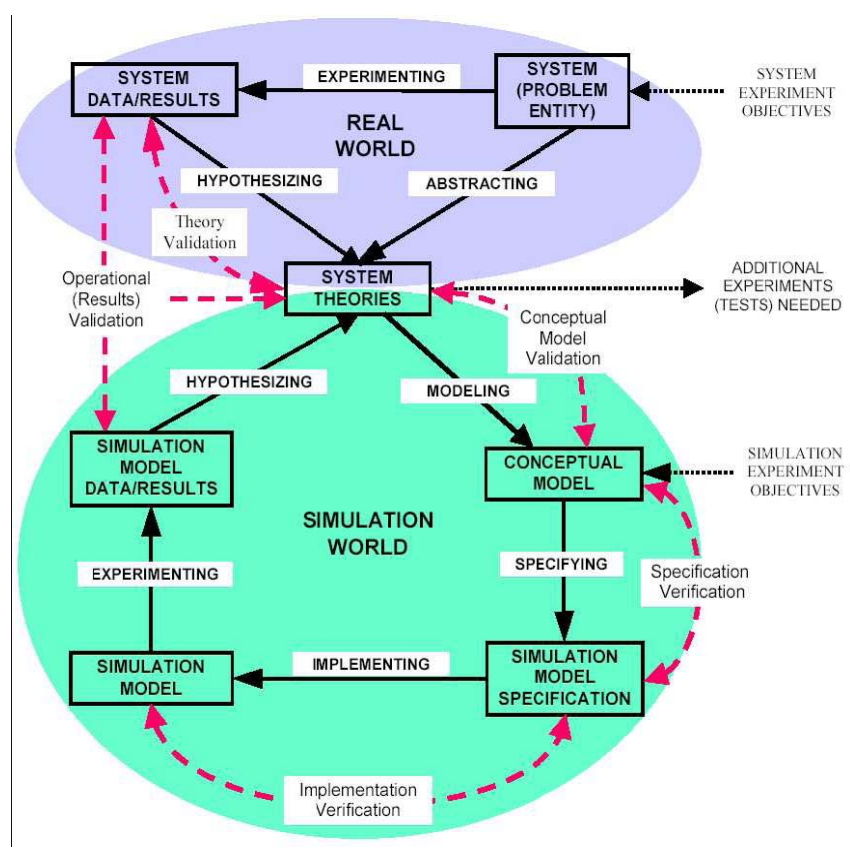


Figure 12: Vérification et de la validation d'un processus de simulation [Sargent 01]

Dans notre approche, nous assignons au système d'informations géographiques la gestion des données relevées sur le terrain et de celles obtenues par simulation. Les données stockées dans le SIG sont utilisées lors de la première phase des expérimentations : l'initialisation. Au cours de cette première phase, d'initialisation, le système informatique d'aide à la décision crée une image informatique de chacun des éléments constituant le système réel à partir des données enregistrées dans le SIG et des modèles comportementaux "multi-agents".

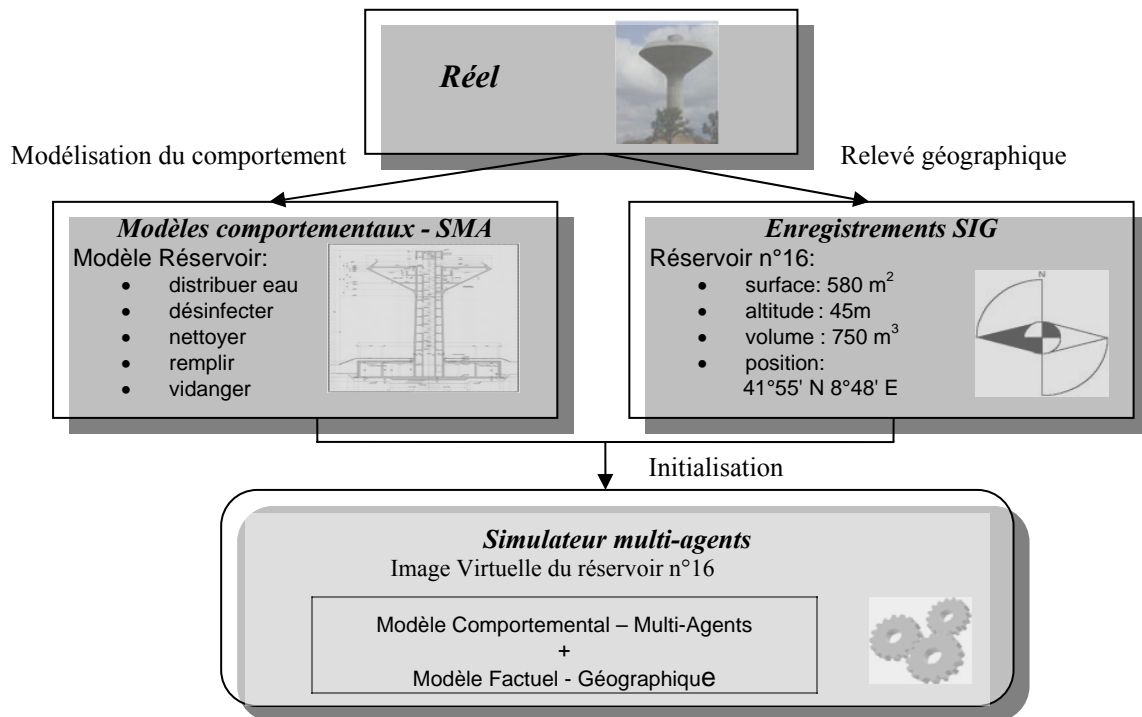


Figure 13: Initialisation à partir du SMA et du SIG

La Figure 13 illustre la phase d'initialisation du système informatique d'aide à la décision au cours de laquelle un agent *réservoir* est instancié à partir des données collectées sur le terrain enregistrées dans le SIG et de son modèle comportemental orienté agent.

L'utilisation d'un SIG permet d'initialiser des expériences à partir de données réelles gérées à l'aide de systèmes d'informations géographiques. Ainsi, alors que souvent les simulations multi-agents sont initialisées à partir de données issues d'un monde numérique virtuel, qui ne permettent pas de valider les résultats obtenus en les comparant aux observations d'un système réel; l'utilisation d'un SIG permet la validation des modèles en comparant données obtenues par le calcul et la simulation avec les relevés effectués sur le terrain. Cette approche implique un couplage dynamique du système multi-agents et du système d'information géographique où la base de données géographiques est interrogées et augmentées au cours des expérimentations [Westervelt 02].

La Figure 14 illustre l'utilité d'un système d'informations géographiques pour valider des modèles. Le SIG s'avère particulièrement adapté lorsqu'il s'agit de modéliser de grands systèmes complexes ayant une forte composante environnementale (au sens de Favier cf. 2.3.5 Les agents situés) et dans lesquels des centaines d'agents situés (au sens de Favier) interagissent.

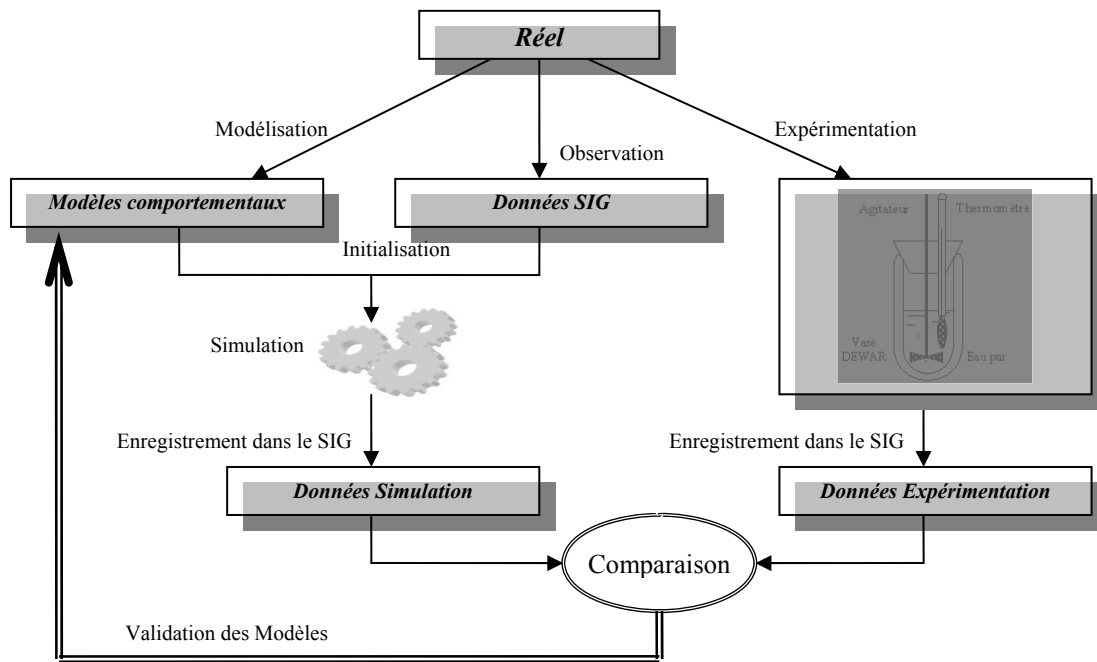


Figure 14 : Validation des modèles grâce au SIG

En plus des possibilités qu'offre l'utilisation d'un SIG pour valider le travail de modélisation, l'utilisation du SIG permet de mieux impliquer les acteurs concernés lors des enquêtes de terrain préalables à la modélisation. En effet, les acteurs qui sont concrètement interviewés sur leur problème, se montrent beaucoup plus coopératifs pour expliciter leurs pratiques et commenter les résultats obtenus par simulation. Les fonctions cartographiques du SIG permettent, également, de réaliser d'excellents documents de présentation des résultats obtenus par le calcul.

L'utilisation d'un logiciel de gestion des informations géographiques permet de gérer les informations relevées sur le terrain avec le meilleur outil possible. En revanche il n'est pas conçu pour réaliser des simulations multi-agents. C'est pourquoi, nous décidons d'utiliser en plus du SIG, une approche multi-agents qui est plus adaptée à notre approche individus centrés. L'utilisation du paradigme multi-agents nous permet d'utiliser l'ensemble des recherches qui ont été menées sur les systèmes multi-agents et plus généralement dans le domaine de l'intelligence artificielle. Nous pouvons ainsi bénéficier des travaux consacrés à la modélisation du comportement des agents qui permettent de prendre en compte les motivations, les buts, la planification et la communication. Si les plateformes de développement multi-agents permettent de modéliser les agents en fournissant des primitives adaptées, elles ne comportent pas d'outils évolués pour gérer des données géoréférencées. Nous avons décidé de combler ces faiblesses en développant une nouvelle architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision qui combinerait les avantages des approches multi-agents et SIG.

Le comportement d'un système modélisé suivant le paradigme multi-agents résulte de l'interaction de l'ensemble des agents (cf. chapitre Etat de l'art). De fait cette approche bottom-up permet de prendre en compte l'influence de tous les agents qui peuvent avoir des buts différents. Utiliser le paradigme SMA pour construire des outils d'aide à la décision nous permet de garantir la prise en compte l'hétérogénéité : dans un système tous les agents n'ont

pas obligatoirement les même intérêts. Cette approche diffère de l'approche traditionnelle, utilisée par les outils d'aide à la décision et à la résolution de problèmes qui postule que l'ensemble des acteurs collabore pour atteindre un objectif commun. L'adoption d'un point de vue multi-agents permet de prendre en compte l'hétérogénéité des comportements individuels dans les systèmes étudiés.

Pour pouvoir utiliser de nombreuses informations géoréférencées et modéliser des acteurs aux comportements complexes, nous avons choisi d'utiliser simultanément les avantages des SMA et des SIG en les couplant.

Cette approche hybride SMA - SIG de l'aide à la décision permet de :

- Utiliser des données réelles et étudier des situations réelles.
- Valider les modèles et les résultats obtenus par simulation.
- Modéliser des agents complexes en utilisant les avancées des systèmes multi-agents.
- Impliquer fortement les acteurs de terrain qui étudient « leur » problème.
- Intégrer l'ensemble des influences individuelles sur la dynamique des systèmes
- Prendre en compte l'hétérogénéité des objectifs des agents.

3.3 Quelles connaissances pour l'aide à la décision ?

Nous abordons ici la nature des connaissances que nous devons prendre en compte pour proposer une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision. Pour cela nous explorons les différentes étapes d'un processus conduisant à la résolution d'un problème.

La plus grande partie des problèmes rencontrés par l'homme sont surmontés par des comportements réflexes ou en appliquant des méthodes empiriques. Il est peu de problèmes quotidiens qui ne puissent être résolus en utilisant des schémas déjà établis. Certains problèmes, nouveaux ou plus complexes, nécessitent la recherche de nouvelles solutions. Cette recherche peut être décomposée en plusieurs étapes :

- Compréhension du problème et explicitation du but à atteindre.
- Identification des contraintes et des ressources disponibles.
- Construction d'une représentation du problème.
- Planification, exécution et suivi du plan.
- Evaluation des résultats, validation.

Une solution à un problème peut correspondre au résultat lui-même, ou à la démarche qui y a conduit.

L'étape clef du processus de résolution (ou d'aide à la décision) décrit ci-dessus est la construction d'une représentation du problème, c'est-à-dire la construction d'un modèle. En fonction de la nature du problème et de la solution recherchée [Ferrand 95], le modèle sera soit :

- Un modèle factuel qui agrège l'ensemble des données brutes décrivant les agents et l'état présent du monde. Les modèles factuels sont des représentations statiques du réel.
- Un modèle prédictif qui agrège l'ensemble des lois et des théories qui régissent le système réel et qui permettent de prédire son évolution.

Pour résoudre un problème il faut rassembler des connaissances très diverses telles que le comportement des parties prenantes, l'environnement, les contraintes, le contexte général et la nature du problème. L'acquisition de telles connaissances se fait à partir de l'observation, de l'appréhension et de la perception du système réel. La construction de la connaissance d'un objet consiste à créer une image de cet objet, c'est-à-dire à sémantiser et à interpréter l'objet aperçue. Au cours de ce processus d'appropriation, l'information perçue est transformée et devient porteuse de sens.

Les connaissances qui sont nécessaires pour résoudre un problème ou apporter une aide à la décision sont de deux catégories [Caplat 02] :

- Les connaissances de domaine.
- Les connaissances de résolution.

Nous présentons maintenant les connaissances de domaine et de résolution qui doivent être prises en compte pour développer une architecture de plateforme de développement d'outils informatiques d'aide à la décision qui utiliserait conjointement un SIG et un SMA pour représenter le système réel.

3.3.1 Les connaissances de domaine

La couche domaine contient par définition l'ensemble des connaissances disciplinaires dont on dispose dans le domaine du problème que l'on cherche à résoudre, elle comprend :

- Les données factuelles décrivant le système.
- Les lois régissant la dynamique du système.
- La nature et les contraintes du problème.

Les connaissances de domaine servent à construire une représentation du système qui sera utilisée pour résoudre un problème ou aider à la décision. La modélisation d'un système, processus impliquant experts du domaine et modélisateurs, doit aboutir à un résultat cohérent, ayant un minimum de complétude et qui soit pertinent pour étudier les problèmes abordés. Les éléments retenus dans la construction d'un modèle dépendent étroitement de l'usage auquel le modèle est destiné. On dit que le modèle doit être *adéquat*.

3.3.2 Les connaissances de résolution

Les systèmes informatiques d'aide à la décision utilisent une traduction de la problématique dans un langage interprétable par un ordinateur. La recherche d'une solution consiste alors à dérouler une suite d'étapes élémentaires fixées par un algorithme de résolution. Le contrôle de la résolution y est totalement figé, on parle de programmation impérative [Caplat 02].

Cette approche algorithmique rencontre plusieurs limites car :

- Elle suppose que l'intégralité du savoir des experts peut entrer dans le cadre normatif d'un langage informatique, ce qui n'est pas le cas. En effet les experts font souvent appel à des processus heuristiques qui sont le fruit de leur expérience.
- Elle conduit parfois à une "explosion combinatoire" qui impose des temps de calcul inenvisageables. Cette explosion ne peut être contenue qu'en faisant appel aux connaissances empiriques, "tacites" [Ermine 03], acquises par un expert.

Les connaissances de résolution sont faites de savoirs, de procédures, de lois et théories qui permettent à partir des connaissances de domaine de trouver une solution ou d'apporter des éléments d'aide à la décision. La modélisation d'un système est toujours entreprise dans un but précis, c'est le but qui va imposer les caractéristiques du modèle. Les connaissances de domaine et de résolution sont liées : pour résoudre un problème il faut "une recette" (les connaissances de résolution) et des ingrédients (les connaissances de domaines).

3.4 Connaissances et SIAD

Dans les systèmes informatiques d'aide à la décision les connaissances de domaine sont constituées de modèles, et d'informations qui ont été relevées sur le terrain et qui sont utilisées pour initialiser les simulations. Grâce aux modèles les ordinateurs génèrent par simulation des données qui seront utilisées par les décideurs.

Les connaissances de résolution sont réparties entre les algorithmes qui vont conduire les simulations et les expérimentateurs qui dirigeront les simulations en utilisant leur savoir heuristique. Tous les SIAD intègrent des interfaces de communication avec les utilisateurs pour pouvoir prendre en compte les connaissances des experts qui ne sont pas explicites dans un langage informatique.

L'architecture des systèmes informatiques d'aide à la décision présentée dans la Figure 2 de l'Etat de l'art prend en compte la nature des connaissances nécessaires en comprenant un module de gestion des modèles, un module de gestion des intrants, et un module spécialisé qui fait l'interface entre les hommes et la machine.

3.5 Connaissances et SIG

Les systèmes d'informations géographiques ayant déjà été présentés en détails dans l'Etat de l'art (cf. 2.4 Les Systèmes d'Informations Géographiques), nous explicitons maintenant quelles sont les connaissances qui sont gérées par le système d'informations géographiques qui sera couplé au système multi-agents pour fournir une aide à la décision.

Les SIG étant intrinsèquement des outils de gestion des informations géographiques, le système d'informations géographiques de notre système hybride a pour fonction essentielle de permettre la gestion des connaissances de domaine. Grâce à ces fonctionnalités il est possible de :

- Gérer la base de données et de permettre l'archivage des informations.
- Manipuler et interroger les bases des données géographiques.
- Saisir les informations géographiques nécessaires à l'étude de situations réelles.
- Fournir une représentation spatiale des systèmes étudiés.
- Mettre en forme et visualiser les données.
- Créer des scénarii des expérimentations.
- Analyser les données générées au cours des expérimentations

Les connaissances de domaine qui sont gérées par le SIG forment une représentation factuelle du système étudié qui est en adéquation avec la problématique. Cette représentation incarne le point de vue qu'aurait sur le réel un géographe.

Le système d'informations géographiques gère l'ensemble des données attributaires des agents qui sont prises en compte lors des simulations. Afin de pouvoir partager et échanger des informations avec d'autres outils et systèmes d'aide à la décision, nous assignons aussi au SIG la gestion des méta-données, qui font partie des connaissances de domaine.

Les données attributaires des agents pris en compte dans les modèles sont traduites dans le langage du système d'informations géographiques. L'utilisation des primitives de description des SIG et de leur syntaxe permet leur manipulation grâce aux outils d'analyse spatiale et statistique du module SIG. Les fonctions d'analyse intégrées au système d'informations géographiques constituent une partie des connaissances de résolution mobilisées pour apporter une aide à la décision et résoudre le problème étudié.

3.6 Connaissances et SMA

Les systèmes multi-agents sont intrinsèquement des systèmes à bases de connaissances. Comme systèmes de représentation des connaissances, ils permettent de modéliser à la fois la manière d'encoder des connaissances et la manière de les utiliser.

La construction d'un système informatique d'aide à la décision utilisant des modèles orientés multi-agents implique la mobilisation de connaissances qui sont réparties sur plusieurs niveaux. Les différents niveaux sont successivement mobilisés au cours du processus de recherche de solutions et d'aide à la décision : de l'analyse de la problématique dans sa globalité, aux états mentaux des agents.

L'ensemble des connaissances mobilisées pour apporter une aide à la décision en utilisant un modèle multi-agents du système peut être hiérarchisé en plusieurs niveaux :

- Le niveau supérieur rassemble les connaissances de résolution globales portant sur le système et sur la problématique. Quelle est la nature du problème ? Quelle démarche adopter pour trouver une solution ?
- Le second niveau regroupe les connaissances de domaine qui existent sur le système. Elles permettent d'appréhender et de décrire l'architecture du système selon une approche multi-agents. Quelles sont les lois qui régissent la dynamique du système ? Quels sont les agents, les objets et les relations qui forment le système ?
- Le troisième niveau est constitué de l'ensemble des connaissances sur les agents et les objets qui constituent le système étudié. Ces connaissances permettent de construire les modèles comportementaux des agents et des objets.
- Le quatrième niveau rassemble les connaissances et les croyances qu'acquièrent dynamiquement les agents au cours des simulations.

La Figure 15 illustre l'imbrication des connaissances, des plus abstraites concernant la démarche de résolution de problème et l'aide à la décision, jusqu'à celles plus concrètes qui sont construites et utilisées par un agent au cours d'une simulation et qui restent confinées dans le système représentationnel de l'agent.

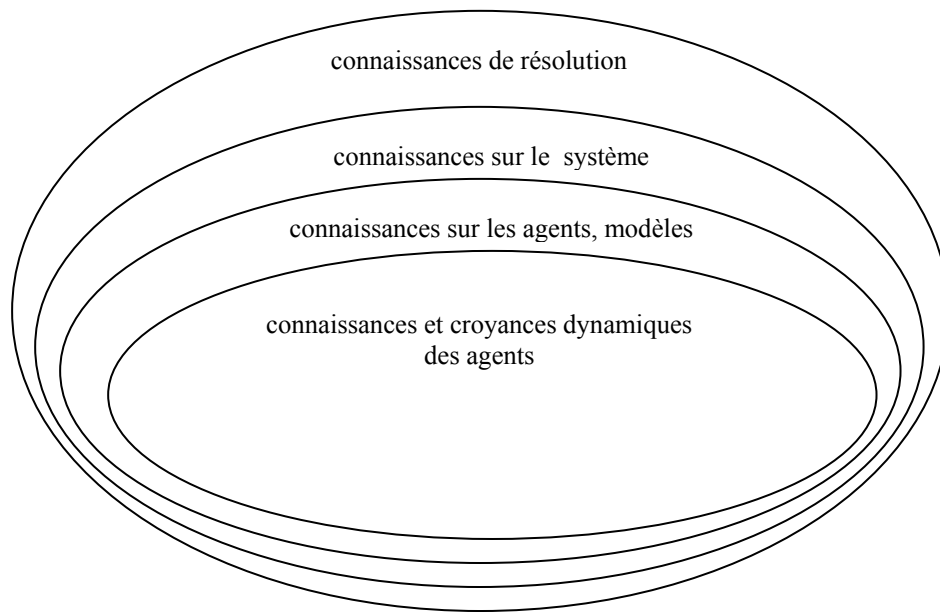


Figure 15 : Niveaux de connaissances dans un SIAD basé sur un modèle multi-agents

Nous allons détailler les différents niveaux de connaissances nécessaires pour apporter une aide à la décision en utilisant un système hybride SMA-SIG.

3.6.1 Niveau connaissances du problème et résolution

Le premier niveau de connaissances rassemble les connaissances sur la nature du problème et la démarche qui sera utilisée pour le résoudre. A ce niveau, il s'agit de connaissances de résolution génériques qui sont utilisées pour faire face à un problème.

Pour développer un outil d'aide à la décision il faut d'abord d'explicitier la nature du problème considéré et celle de la solution espérée. Ainsi, il est nécessaire de savoir si le décideur est à la recherche d'une valeur optimale pour un paramètre du système, d'une combinaison de paramètres, à la recherche d'un optimum, ou à réorganiser efficacement le système ? Le décideur est-il plus intéressé par la solution elle-même ou par la démarche qui y doit y conduire ?

Un outil d'aide à la décision n'est pertinent que si le décideur dispose d'un corpus de connaissances qui lui permettent de décrire, comparer, évaluer les hypothèses, de caractériser les modèles utilisés, et de valider les données obtenues informatiquement.

C'est à ce niveau de connaissances qu'il convient de choisir la méthode de conduite des expérimentations. L'expérimentateur - décideur dispose de deux possibilités pour conduire ses expériences:

- Réaliser automatiquement des séries de simulations pour tester systématiquement toutes les hypothèses, puis déterminer quelle est la meilleure solution en analysant l'ensemble des résultats obtenus par le calcul. Cette méthode nécessite rapidement des moyens de calcul très importants pour faire face à l'explosion combinatoire.
- Utiliser le logiciel de manière interactive. Dans ce mode "jeux de rôles", l'expérimentateur peut à tout moment intervenir dans le déroulement de la simulation. Cette méthode permet de maîtriser l'explosion combinatoire de la première méthode mais mobilise pendant longtemps l'expérimentateur - décideur, ce qui réduit le nombre d'expériences qui peuvent être conduites et limite de fait le nombre d'hypothèses qui sont testées.

L'utilisation d'un système informatique d'aide à la décision basé sur le couplage d'un système multi-agents et d'un système d'informations géographiques, nécessite une approche globale de la problématique et un ensemble de connaissances permettant de :

- Définir et expliciter le problème.
- Définir et expliciter les hypothèses à explorer.
- Définir un plan d'expériences ou un algorithme de résolution.
- Exploiter, comparer, évaluer les données obtenues par le calcul.

Dans notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision, nous incluons des fonctionnalités qui permettent de contrôler interactivement les expérimentations et de suivre un plan d'expériences. Les données obtenues par le calcul sont enregistrées dans des bases de données, pour être ensuite analysées à l'aide des fonctionnalités du système d'informations géographiques et de logiciels d'analyse statistique.

3.6.2 Niveau connaissance du système

Le second niveau de connaissance rassemble l'ensemble du savoir qui est disponible sur le domaine du problème. A ce niveau, le système est considéré dans sa globalité dans le but de construire un modèle de la réalité selon une approche multi-agents.

La construction du modèle utilisé par le système informatique d'aide à la décision se fait en prenant en compte le problème qui doit être résolu : le modèle construit doit être adéquat. Un modèle est adéquat lorsqu'il prend en compte les éléments de la réalité qui sont utiles dans le cadre de la problématique. Pour illustrer le concept d'adéquation d'un modèle, nous prendrons l'exemple du problème de l'érosion des sols où un modèle qui prendrait en compte l'emplacement des supermarchés se révélerait inadéquat.

Au cours de cette phase le concepteur du système informatique d'aide à la décision, assisté d'experts du domaine, rassemble les connaissances sur le système et identifie l'ensemble des agents et des objets qui composent le système et qui doivent être pris en compte pour résoudre le problème. Il établit également l'ensemble des relations et des interactions qui existent entre les agents qui composent le système. Cette phase d'acquisition de connaissances du domaine ne peut se faire qu'en collaboration avec des experts du domaine qui valideront à la fois la démarche et le modèle qui a été construit.

3.6.3 Niveau connaissance des agents

A ce niveau hiérarchique, le système informatique d'aide à la décision doit intégrer un modèle pour tous les agents qui ont été identifiés lors de la phase précédente de construction des connaissances du système. L'explicitation du comportement de chacun des agents et leur modélisation se fait avec l'aide d'experts et en fonction de la problématique.

A ce niveau, la description des agents se fait en utilisant les primitives spécifiques des systèmes multi-agents. Quel que soit le comportement des agents (réactif, cognitif, hybride), le langage de description devra offrir un ensemble de primitives de modélisation suffisamment riche pour permettre l'implémentation des agents. La modélisation du comportement d'un agent peut se faire en utilisant au choix plusieurs types d'architectures internes.

La modélisation d'un agent dans le cadre d'un outil d'aide à la décision hybride SMA-SIG consiste à formaliser dans un langage informatique les connaissances de domaine acquises sur les agents. Au cours de cette phase de modélisation, avec l'aide d'experts, il s'agit de répondre pour chacun des agents aux questions suivantes :

- Quels sont les attributs de l'agent ?
- Quelles sont les actions que l'agent peut entreprendre ?
- Quelle sont les croyances de l'agent et comment sont elles actualisées ?
- Comment l'agent communique et interagit avec les autres ?
- Comment l'agent choisit l'action qu'il va entreprendre ?
- Quelles sont les interactions qui existent entre l'agent et son environnement ?

- L'agent est-il situé ou localisé dans son environnement ?
- Comment l'agent est lié au SIG ?

Les réponses à ces questions sont traduites dans le langage informatique du système multi-agents pour constituer des modèles des agents. Dans notre approche SMA - SIG, ces modèles sont chargés au démarrage du système informatique d'aide à la décision pour instancier les agents à partir des informations extraites du système d'informations géographiques et constituer une image informatique virtuelle du système réel.

3.6.4 Niveau connaissance des croyances des agents

Après avoir décrit les niveaux supérieurs de connaissances qui sont mobilisées dans les systèmes informatiques d'aide à la décision basé sur une approche SMA-SIG, nous détaillons les connaissances qui sont mobilisées par les agents eux-mêmes au cours des expérimentations.

Quelle que soit leur architecture (BDI, InteRRaP...), comme nous l'avons expliqué dans l'état de l'art, le comportement des agents est déterminé par leur système représentationnel. Le système représentationnel des agents évolue dynamiquement au cours de l'avancement des simulations en fonctions de leurs percepts. Le système représentationnel des agents se rapporte à :

- Des désirs.
- Des croyances :
 - environnementales.
 - sociales.
 - relationnelles.
 - personnelles.
- Des intentions.
- Des engagements.

Les désirs, qui correspondent aux besoins fondamentaux que l'agent cherchera à satisfaire, peuvent être déterminés, et fixés, définitivement lors de la phase de modélisation du système. Les croyances, les intentions et les engagements renvoient directement à l'état mental de l'agent, qui évolue en permanence au cours des expérimentations. Cette perpétuelle révision rend inutile la description des croyances des agents.

Le système représentationnel des agents se compose de plusieurs éléments:

- Une représentation de l'univers.
- Une sémantique pour manipuler ces informations.
- Des modèles pour prévoir les conséquences de leurs actions sur leur environnement et prévoir le comportement des autres agents.

Les agents mettent à jour leurs croyances en utilisant leurs percepts : capteurs et informations provenant des autres agents. De plus, pour pouvoir "raisonner" un agent doit disposer en plus de ses croyances d'un formalisme, c'est-à-dire d'une sémantique pour attribuer du sens aux données qu'il manipule et d'une axiomatique.

Il apparaît donc que le développement d'un système informatique d'aide à la décision qui utilise une représentation orientée multi-agents du système réel ne passe pas par la connaissance des états mentaux des agents, mais par la connaissance des mécanismes de leur construction et de leur mise à jour. Le modélisateur ne doit donc pas décrire l'état mental d'un agent, mais le processus qui régissent son évolution à partir de son état initial, ainsi que les règles de son actualisation. Dans notre approche hybride SMA – SIG des systèmes informatiques d'aide à la décision, les connaissances de domaines associées aux systèmes représentationnels des agents sont exclusivement gérées par le système multi-agents.

3.7 Dimensions spatiale, sociale et temporelle d'une simulation

Le développement de systèmes d'aide à la décision hybrides SMA - SIG passe par la prise en compte de la dynamique des systèmes réels.

Dans notre approche multi-agents trois dimensions doivent être prises en compte :

- **Spatiale** : dans notre approche les agents sont localisés dans l'environnement. Ils ont une position définie à l'aide d'un repère et d'un système de coordonnées, leur comportement peut dépendre de leur position (cf. 2.3.5 Les agents situés). De plus l'environnement peut être modifié par des agents ou par certains événements : incendies, inondations, glissements de terrain...
- **Sociale** : les agents communiquent et interagissent. Dans un système multi-agents, le comportement global du système n'est pas seulement la somme de l'ensemble des comportements individuels, il est aussi influencé par les interactions entre les agents. Dans les systèmes multi-agents la composante sociale est essentielle (cf. Etat de l'art).
- **Temporelle** : au cours d'une expérimentation, des agents sont créés, puis disparaissent. Les positions et les relations entre les agents changent dans le temps.

Les systèmes d'informations géographiques sont des outils qui sont intrinsèquement dédiés à la gestion et à l'exploitation des informations spatiales, mais qui ne permettent pas de prendre en compte les aspects temporels et sociaux qui sont des composantes essentielles des systèmes multi-agents. Pour pouvoir exploiter efficacement des données issues d'un système d'informations géographiques dans le cadre de simulations multi-agents, il faut être en mesure de décrire dans un scénario les modifications de l'environnement, les apparitions et les disparitions d'agents, les modifications des réseaux sociaux et tous les autres événements susceptibles de s'y produire. Ainsi si un agent doit entrer dans une simulation, il faut préciser non seulement sa position dans l'espace, mais aussi : l'instant de son apparition et l'ensemble des agents avec lesquels il a des accointances. Le simple ajout aux données géographiques de données permettant de décrire des scénarii n'est pas suffisant, il faut aussi prévoir le stockage des informations et des événements résultant des simulations.

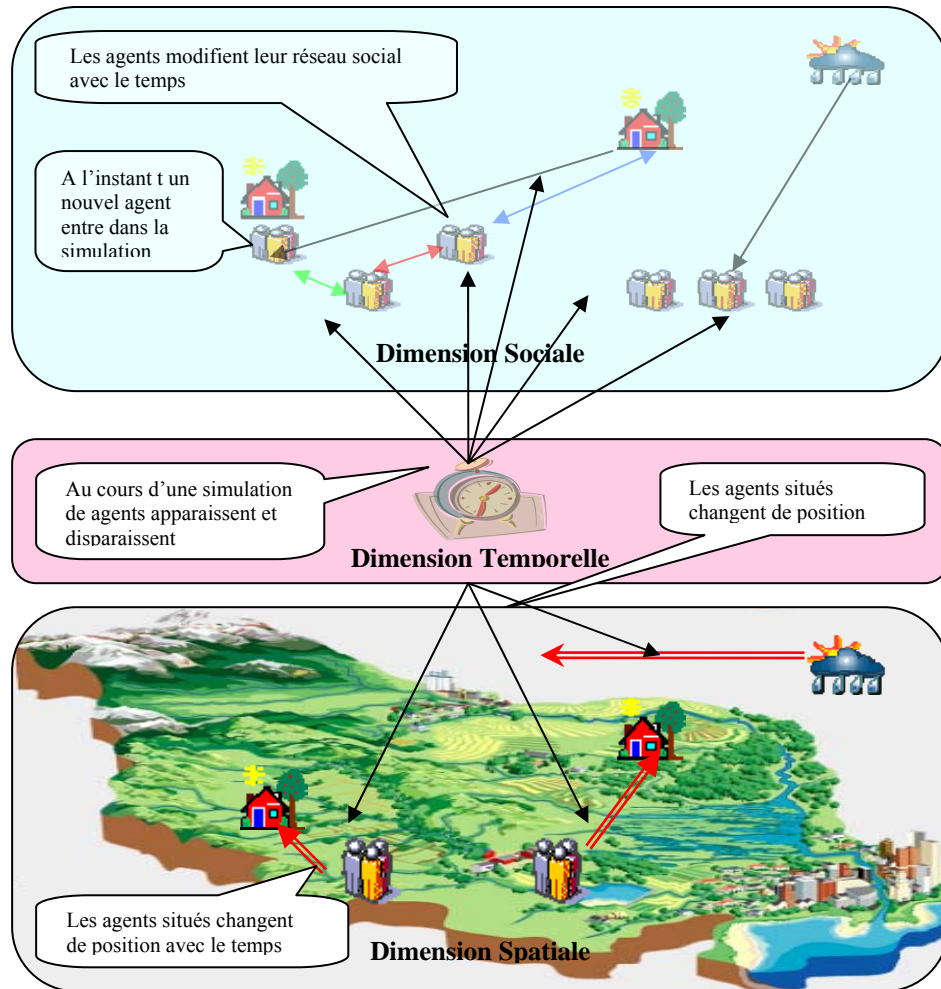


Figure 16 : Les 3 dimensions d'une expérimentation

La Figure 16 présente les trois dimensions que doit prendre un modèle multi-agents qui tient compte de la dynamique du système réel. Les agents peuvent naître, mourir, se déplacer, communiquer, interagir, modifier leur environnement. Dans notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision, nous prenons en compte la dynamique des systèmes réels en utilisant le système d'informations géographiques pour gérer les événements liés aux simulations.

3.8 Contraintes d'un couplage SMA-SIG

Notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision est basée sur l'exploitation de deux représentations de la réalité qui ont été construite en adoptant deux points de vues différents :

- Géographique qui constitue un modèle factuel et forme un SIG.
- Modélisation qui constitue un modèle prédictif suivant une approche SMA.

Dans cette partie nous examinons quels sont les liens et les contraintes qui existent entre ces deux représentations du même système réel.

- **Des modèles adéquats**

Pour que l'exploitation de ces deux représentations de la réalité apporte une aide à la décision, elles doivent être des images des phénomènes et des éléments qui participent à la dynamique du problème. Le système multi-agents et le système d'informations géographiques doivent donc contenir des modèles adéquats de la réalité, qui ont été construits en fonction du problème qui sera traité en utilisant le système informatique d'aide à la décision. Il importe de choisir judicieusement le niveau de complexité des modèles en gardant à l'esprit cette phrase de Paul Valéry "*Tout ce qui est simple est faux, mais tout ce qui ne l'est pas est inutilisable*".

- **Des représentations cohérentes**

Le système d'informations géographiques et le système multi-agents permettent la construction deux descriptions différentes d'une même réalité. Le couplage au sein d'un outil, d'un système d'informations géographiques et d'un système multi-agents soulève des implications théoriques différentes en fonction du point de vue adopté. Les éléments retenus dans chacune des descriptions pour constituer deux images du réel peuvent être identiques, redondants, complémentaires. Le couplage, au sein d'un même système informatique, d'une représentation multi-agents et d'une géodatabase, implique la cohérence des deux représentations de la réalité qui ne doivent pas être contradictoires. La cohérence des représentations n'implique pas une unicité de point de vue : des éléments pris en compte dans une représentation peuvent être absents dans l'autre.

Pour illustrer les relations qui existent entre les deux représentations au sein des systèmes informatiques d'aide à la décision qui sont construits selon notre approche SMA - SIG, nous prenons l'exemple (cf. Figure 17) de la propagation d'une maladie par deux vecteurs hémato-phages.

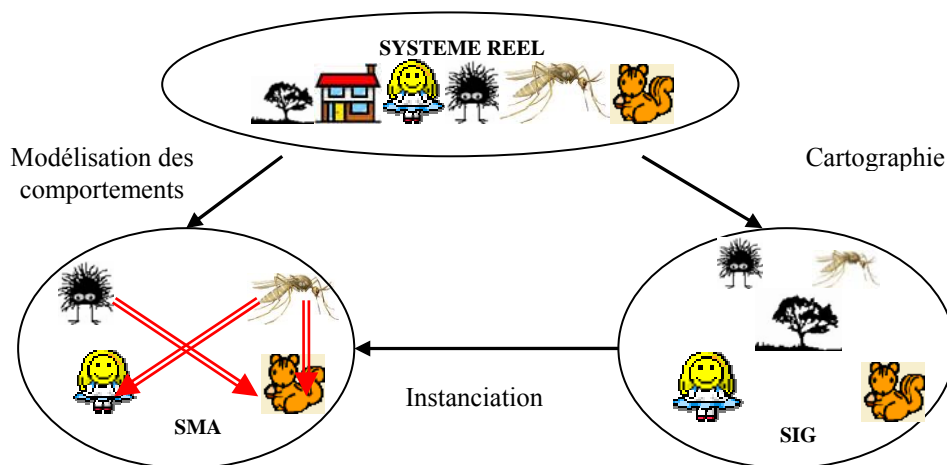


Figure 17: Deux représentations du système

La Figure 17 illustre les différentes représentations du système réel dans le cas de l'étude de la propagation d'une maladie par deux vecteurs : la tique du chien et le moustique. Dans le monde réel, les humains qui habitent dans des maisons et les rongeurs qui vivent dans des arbres sont exposés à une maladie propagée par des insectes suceurs de sang. Le modèle géographique ne prend pas en compte les maisons tandis que le modèle multi-agents ne prend pas en compte ni les maisons ni les arbres.

De plus, ces deux insectes hématophages ont des comportements différents :

- La tique construit sa représentation du monde à partir de trois stimuli : la lumière diffuse, la chaleur et à l'acide butyrique.
- Le moustique est lui sensible au CO₂, à l'acide lactique, aux couleurs et aux formes.

Ces deux parasites n'ont donc pas les mêmes croyances et la même représentation de leur environnement. Placés dans la même situation, un moustique et une tique auront donc des comportements différents:

- Le moustique disposera de deux sources de nourriture : l'homme et les rongeurs.
- La tique n'est en mesure que d'en percevoir qu'une : les rongeurs.

Dans un système multi-agents tous les agents possèdent leur propre représentation de la réalité. De ce fait, au même instant, différentes représentations de la réalité coexistent.

Les agents utilisent leurs croyances pour décider de leurs actions. Les croyances sont par définition des propositions, des faits qui sont admis sans savoir effectivement leur degré de vérité. Les croyances d'un agent se rapportent à deux types de connaissances : la connaissance de ce qui l'entoure et avec qui il interagit [quoi] et la connaissance du comportement des objets et des agents avec lequel il interagit [comment]. Le [quoi] et le [comment] lui sont nécessaires pour faire des prévisions et établir des plans. Les agents doivent disposer de mécanismes leur permettant de réviser leurs croyances à partir des interactions qu'ils ont avec les autres agents et à partir de leur perception de leur environnement.

Dans un système multi-agents (cf. Figure 18) coexistent simultanément plusieurs représentations de la réalité :

- Un premier modèle représente l'environnement dans lequel évoluent les agents.
- Les agents sont l'aboutissement du travail de modélisation des parties prenantes.
- Chaque agent dispose d'une représentation de son environnement.
- Les agents possèdent aussi des représentations des agents avec qui ils interagissent.

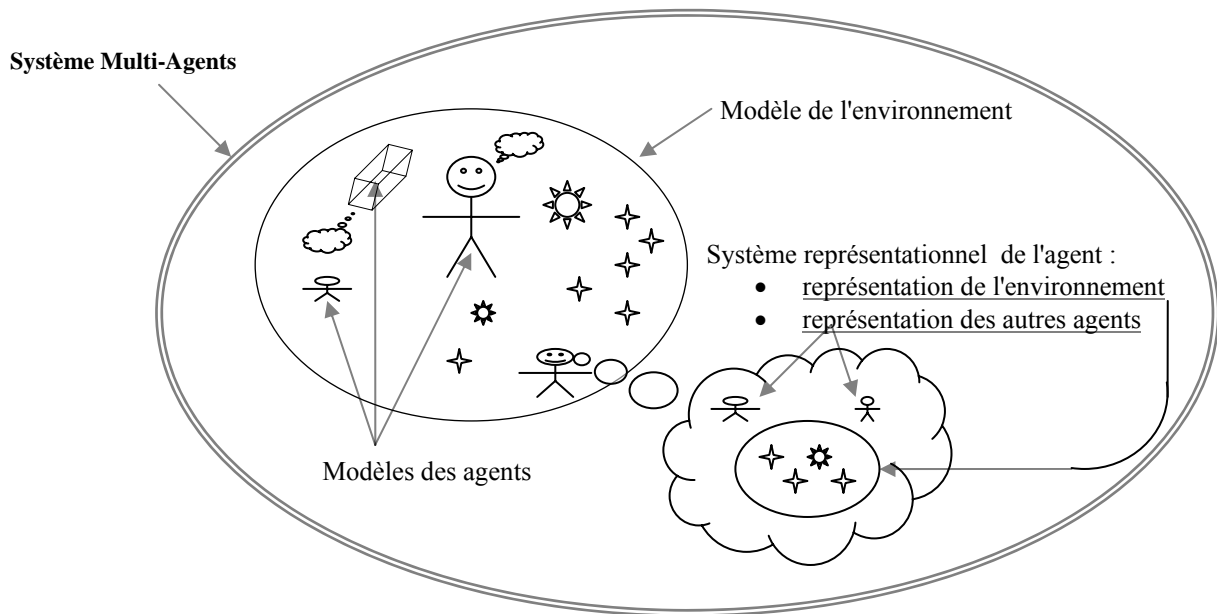


Figure 18 : Plusieurs représentations dans un SMA

• Des modèles imparfaits et incomplets

Tous les systèmes réels peuvent être représentés par plusieurs modèles différents. Ceux-ci décrivent avec plus ou moins de détails ou d'exactitude la réalité. Vidal Cohen [Cohen 95] distingue deux propriétés permettant de caractériser les relations entre un système réel et son modèle :

- Un modèle est **complet** si il prend en compte toutes les propriétés du système réel.
- Un modèle est **parfait** si toutes ses propriétés sont aussi des propriétés du système réel.

Les relations entre le modèle utilisé dans un système informatique d'aide à la décision et la réalité peuvent être formalisées par deux morphismes Ψ_1 , Ψ_2 (cf. Figure 19).

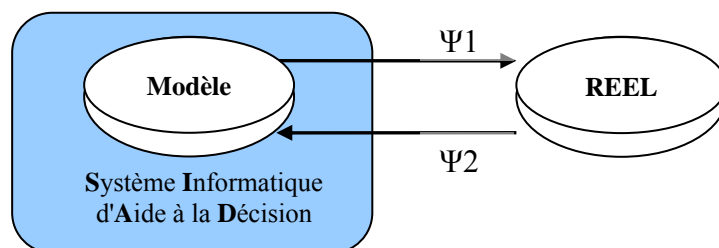


Figure 19 : Morphismes et SIAD

Pour C. Oussalah [Oussalah 88] "*La modélisation est un épimorphisme (morphisme surjectif) entre un système réel (objet) et un modèle dont la finalité est de donner une représentation simplifiée et observable de la structure et du comportement du système réel*".

Cohen souligne que les modèles qui sont utilisés dans le cadre de l'aide à la décision sont rarement *parfaits*. Dans notre conception des systèmes informatiques d'aide à la décision, à la

différence de V. Cohen, nous n'utilisons pas un mais deux modèles : une représentation descriptive du système réel gérée par un système d'informations géographiques et un modèle prédictif construit suivant le paradigme multi-agents.

L'utilisation simultanée d'un SMA et d'un SIG introduit un niveau de modélisation supplémentaire dans les systèmes informatiques d'aide à la décision. Dans un SIAD basé sur l'utilisation de seulement un SMA ou un SIG, il y a un seul modèle de la réalité qui doit être adéquat, c'est-à-dire qu'il doit exister des morphismes entre le modèle et la réalité qui permettent de prendre en compte les phénomènes réels régissant le fonctionnement du système. Dans le cas d'un SIAD qui utilise à la fois un SMA et un SIG, il y a deux modèles du système réel, et donc six morphismes : Φ_1 , Φ_2 , ψ_1 , ψ_2 , ϕ_1 et ϕ_2 (cf. Figure 20).

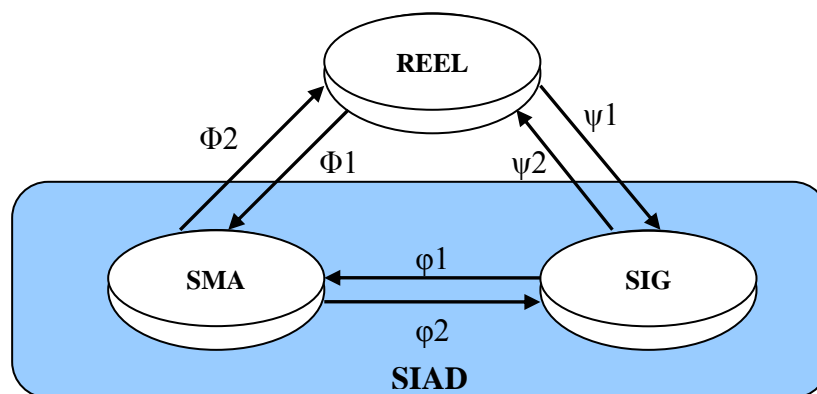


Figure 20 : Morphismes dans un SIAD utilisant un SIG et un SMA

Les contraintes qui existent entre les deux représentations du système réel sont imposées par leurs fonctions respectives dans notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision. La représentation "SIG" est une représentation descriptive de la réalité qui est utilisée pour initialiser le modèle prédictif multi-agents. Le modèle "SIG" doit donc intégrer des données permettant d'instancier chacun des agents, le modèle multi-agents n'étant finalement pas directement l'image du système réel mais une image composite construite à partir de l'observation des comportements réels et d'un relevé géographique construit grâce à un système d'informations géographiques.

Les relations entre les deux représentations du réel utilisées dans notre approche des SIAD peuvent se formaliser ainsi : A et B étant deux éléments du système réel, les morphismes Φ_1 , ψ_1 , et ϕ_1 doivent être tels que :

- $\Phi_1 : \text{réel} \times \text{réel} \rightarrow \text{SMA}$ tel que $\Phi_1(A) \times \Phi_1(B) \rightarrow \Phi_1(A*B)$
- $\psi_1 : \text{réel} \times \text{réel} \rightarrow \text{SIG}$ tel que $\psi_1(A) \times \psi_1(B) \rightarrow \psi_1(A*B)$
- $\phi_1 : \text{SIG} \times \text{SIG} \rightarrow \text{SMA}$: tel que $\phi_1(\psi_1(A)) \times \phi_1(\psi_1(B)) \rightarrow \phi_1(\psi_1(A*B))$

Le simulateur multi-agents du SIAD n'intègre que les éléments du système réel qui sont référencés dans la base de données géographiques. Pour qu'une partie prenante du problème soit prise en compte dans le processus d'aide à la décision il faut qu'elle soit obligatoirement référencée dans la base de données géographiques. D'autre part tous les éléments référencés dans la base de données géographiques ne sont pas obligatoirement utilisés pour initialiser le moteur de simulation multi-agents intégré au SIAD.

Finalement :

- Tous les éléments référencés dans la base de données géographiques ne sont pas obligatoirement pris en compte dans le processus d'aide à la décision.
- Tous les éléments que souhaite prendre en compte le décideur doivent obligatoirement être référencés dans la base de données géographiques et leurs comportements être modélisés suivant le paradigme multi-agents.

En utilisant les travaux de V. Cohen nous pouvons affirmer que dans notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision le modèle multi-agents est un modèle *parfait* mais *incomplet* de la représentation de la réalité qu'est la base de données géographiques.

- ***Omniscience et rationalité***

En couplant un système multi-agents et un système d'informations géographiques au sein d'un système informatique d'aide à la décision il devient possible de créer des agents informatiques disposant d'une représentation complète de leur environnement (ils sont omniscients) et qui utilisent leurs connaissances pour prendre des décisions purement rationnelles. Le système d'informations géographiques peut jouer pour les agents le rôle d'un environnement bis, centralisé (cf. 2.3.4 La notion d'environnement). Ce choix reviendrait à admettre des hypothèses discutables :

- Les agents seraient omniscients, il n'y aurait pas de limite à leur connaissance du monde qui les entoure. Dans la réalité les parties prenantes n'ont qu'une perception partielle et limitée de leur environnement. Un agent ayant la possibilité de se connecter au SIG percevrait la totalité du système et ne pourrait prétendre représenter une partie de la réalité. Faire l'hypothèse de l'omniscience des agents est en contradiction avec le monde réel.
- Les agents situés (cf. 2.3.5 Les agents situés) bâtissent leur raisonnement à partir de leurs croyances, c'est-à-dire de leur représentation de leur environnement. Les agents mettent à jour leur croyances, non à partir de la réalité, mais à partir de ce qu'ils perçoivent et de leurs interactions avec les autres agents. La différence entre ce qui est perçu par un agent et la réalité est due aux défauts de ses capteurs et à ses préjugés qui agissent comme des filtres. Pour cette raison les agents ne doivent pas accéder directement aux données gérées par le système d'informations géographiques.
- La représentation des parties prenantes suivant un paradigme multi-agents s'accompagne d'une rationalisation de leur comportement. Le modélisateur a la possibilité de créer des modèles d'agents informatiques purement rationnels. Cette option serait en contradiction avec la rationalité limitée de tous les acteurs qui est la règle dans la réalité.

La construction du modèle multi-agents utilisé dans un système informatique d'aide à la décision SMA – SIG doit prendre en compte la rationalité limitée des agents [Simon 69] ainsi que la représentation partielle et biaisée qu'ils ont de leur environnement et des autres agents.

3.9 L'architecture SMAG

Nous proposons maintenant une architecture de plateforme permettant de développer des systèmes informatiques d'aide à la décision qui exploitent simultanément une représentation multi-agents du système réel et un système d'informations géographiques. Notre architecture modulaire, présentée Figure 21 est baptisée Système Multi-Agents Géographiques (SMAG). Elle utilise l'analyse que nous venons de développer sur les connaissances qui sont nécessaires pour apporter une aide à la décision en utilisant une approche hybride SMA-SIG.

Pour développer des systèmes informatiques d'aide à la décision suivant une approche SMA-SIG, nous considérons trois entités :

1. Le système réel, lieu de la problématique qui doit être explorée.
2. Un module SMA siège d'un modèle prédictif, orienté multi-agents, du système réel qui permet de générer par simulation des données et de tester des scénarii à partir des informations relevée sur le terrain.
3. Un module SIG qui permet de gérer une base de données géographiques contenant:
 - Les données brutes relevées sur le terrain.
 - Les scénarii qui servent de base pour les simulations.
 - L'enregistrement de tous les événements ayant lieu au cours des expérimentations.
 - L'enregistrement des paramètres pertinents définis par l'utilisateur.

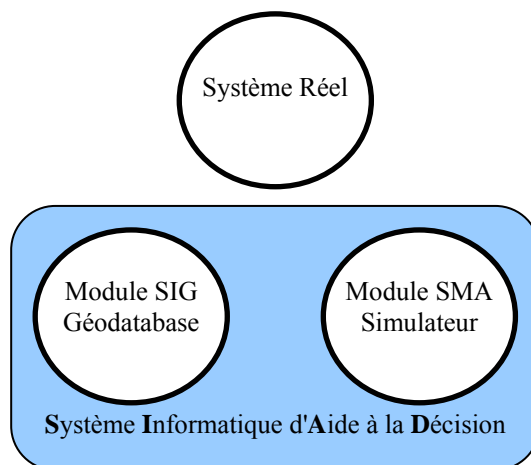


Figure 21 : Architecture SMAG

La Figure 22 représente les flux de données et de connaissances qui existent entre le système réel, le simulateur multi-agents et la base de données géographiques, dans une plateforme ayant une architecture SMAG.

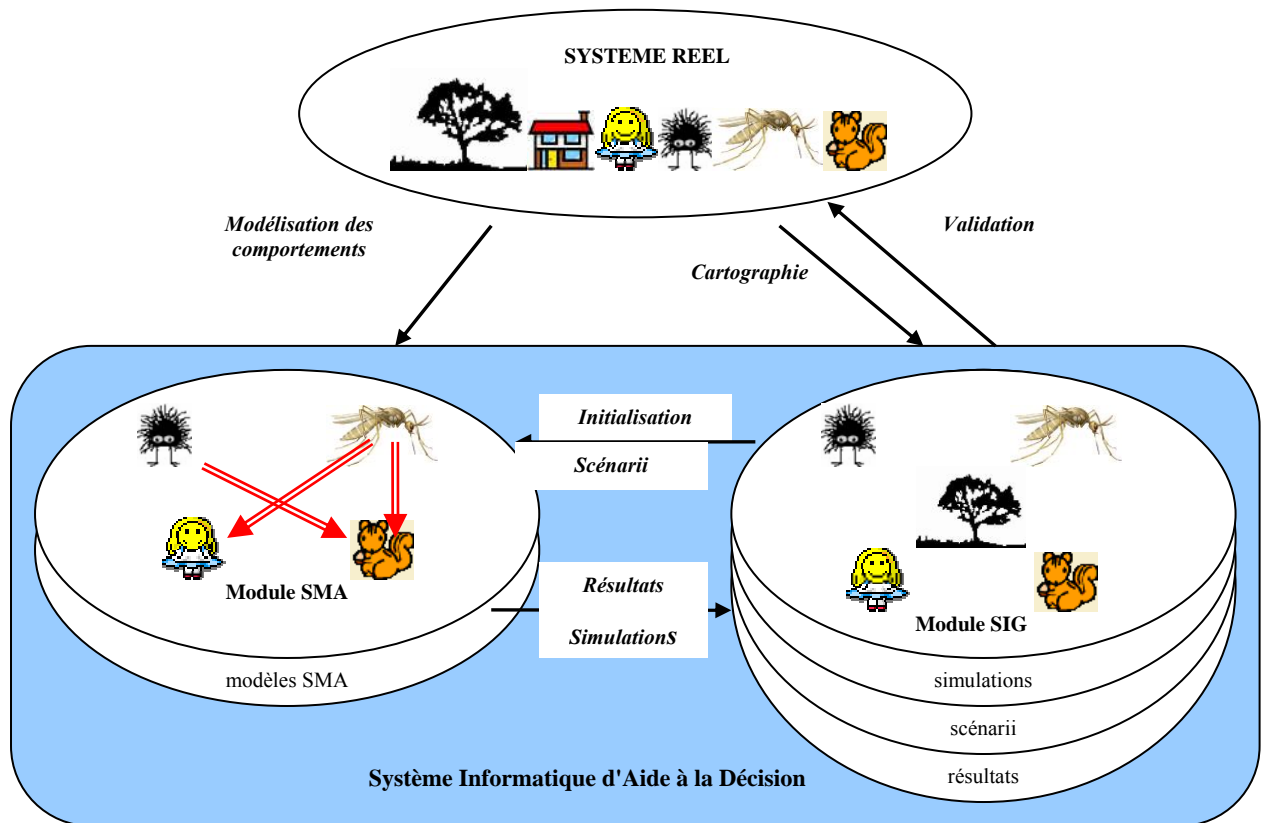


Figure 22 : Echanges de données dans un SIAD conforme à l'architecture SMAG

Le système réel est la référence qui sera utilisée lors des phases de :

- **Modélisation** : le modélisateur développe un modèle adéquat de chaque type d'agent en utilisant les primitives de modélisation du module SMA.
- **Cartographie** : un relevé géographique de l'ensemble des objets et des agents parties prenante de la problématique est effectué. Les données sont consignées dans le SIG.
- **Validation** : avec l'aide d'experts les données obtenues par la simulation sont comparées avec le système réel pour valider la modélisation du système réel.

Les flux entre les modules SMA et SIG correspondent au pilotage de la simulation (**initialisation** et utilisation de **scénarii** prédéfinis) et à l'enregistrement et la gestion des données obtenues durant les simulations (**résultats** et **simulations**).

La Figure 23 présente les détails de l'architecture SMAG utilisée pour développer des outils d'aide à la décision suivant une approche hybride SMA-SIG. SMAG se compose de modules fonctionnels qui permettent de :

- Définir et exécuter un plan d'expériences.
- Communiquer avec les utilisateurs (décideurs, experts, modélisateurs).
- Modéliser et cartographier des systèmes réels.
- Gérer les connaissances et les données.
- Analyser des données obtenues par simulation.

Nous avons pris le parti de ne considérer et de n'utiliser que les fonctions génériques communes à tout les SIG, sans apporter d'ajouts ou de modifications, pour permettre l'implémentation de l'architecture SMAG en utilisant tous les logiciels SIG standards qui sont le plus souvent des solutions propriétaires dont le code source est privé. C'est pourquoi nous ne détaillons pas le module SIG dont les caractéristiques correspondent aux caractéristiques génériques des logiciels SIG qui ont été présentées dans l'état de l'art.

Par soucis de simplicité choisissons un "couplage lâche" entre les modules SMA et SIG qui restent indépendant et communiquent uniquement en s'échangeant des données [Maillé 05]. Ainsi les fonctionnalités SMA et SIG sont bien distinctes. Le choix d'un "couplage étroit" aurait nécessité l'insertion de fonctionnalités SMA au sein du SIG et de fonctionnalité SIG au sein du SMA, dupliquant de fait une partie du code [Maillé 05] et rendant l'évolution du système très lourde. Notre choix d'une "couplage lâche" facilite l'implémentation et la mise à jour des plateformes construites d'après l'architecture SMAG.

Le module multi-agents de l'architecture SMAG, détaillée Figure 23, est spécifiquement conçu pour permettre de construire des outils d'aide à la décision hybrides SMA – SIG. Nous avons décidé de faire supporter au module SMA l'intégralité des fonctionnalités spécifiques de l'architecture SMAG car les plateformes multi-agents sont plus aisément adaptables aux besoins spécifiques des développeurs et leur code source est beaucoup plus ouvert que celui des systèmes d'informations géographiques.

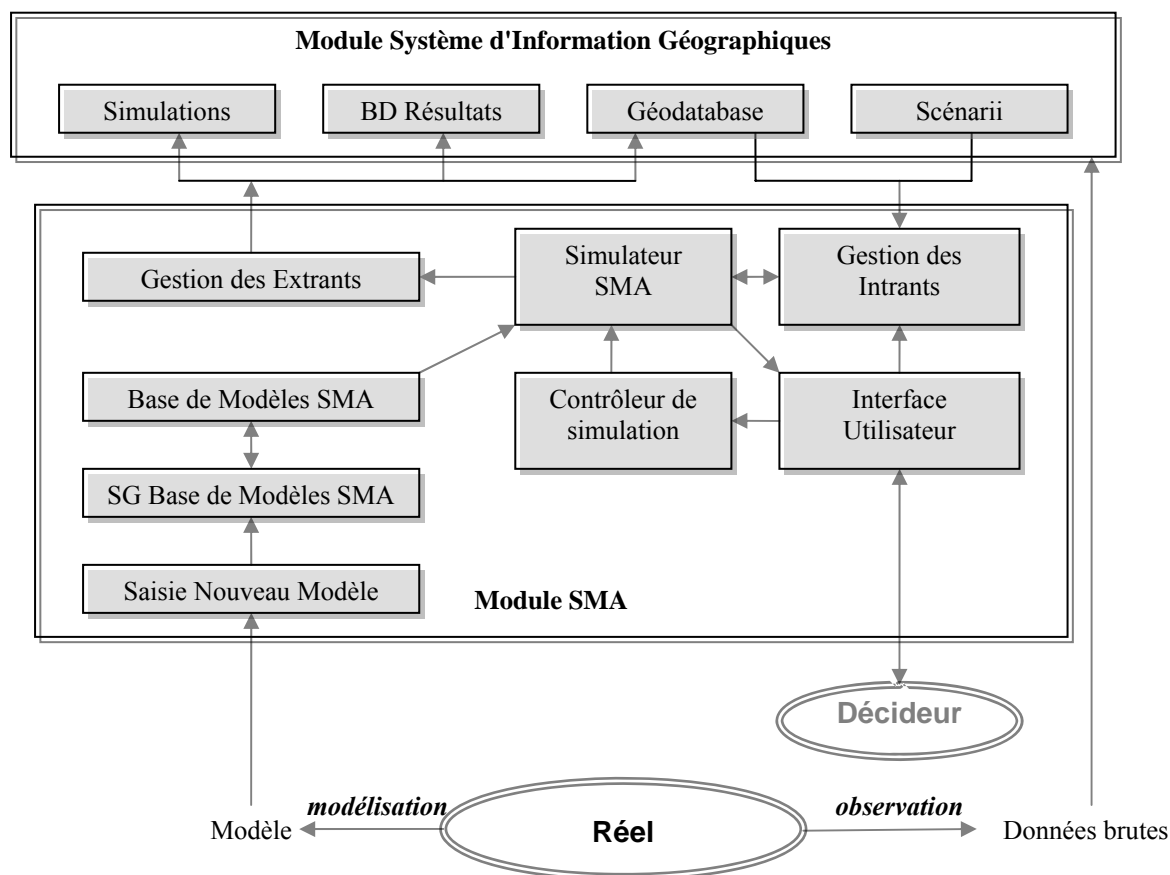


Figure 23 : Architecture fonctionnelle de SMAG

L'architecture SMAG permet de prendre en compte l'ensemble des étapes de la construction d'un logiciel d'aide à la décision hybride SMA-SIG : de l'étude du système réel à l'interface de contrôle des expérimentations. Les différents modules fonctionnels composant l'architecture permettent de :

- Relever des données géographiques sur le terrain grâce au "*module SIG*".
- Construire un modèle informatique orienté multi-agents du système réel en utilisant les primitives de modélisation et l'environnement de développement du module SMA. C'est la fonction qui est assurée par le sous module appelé "*Saisie Nouveau Modèle*".
- Gérer les modèles multi-agents développés avec le module fonctionnel "*SG Base de Modèles*" dédié à la gestion des modèles inclus dans le module SMA.
- Simuler et générer des données expérimentales à partir des modèles multi-agents et en utilisant le moteur de simulation "*Simulateur SMA*" intégré au module SMA.
- Conduire les expérimentations à partir des scénarii et des interventions des décideurs en cours de simulation en utilisant un module dédié "*Gestion des Intrants*" qui est connecté au moteur de simulation multi-agents.
- Créer et gérer des scénarii à l'aide des fonctionnalités standards du "*module SIG*".
- Le module fonctionnel "*Gestion des Extrants*" intégré au module SMA permet de définir des informations à enregistrer au cours d'une expérimentation : les événements, la génération de nouveaux agents en cours de simulations, les sondes.
- Le module fonctionnel "*Interface Utilisateur*" permet de contrôler les simulations, de visualiser en temps réel l'état du système. Grâce à ce module les utilisateurs (décideurs, experts, modélisateurs) peuvent intervenir au cours des expérimentations.
- Gestion et analyse des données obtenues par simulation en utilisant les fonctionnalités de gestion et d'analyse standards que l'on retrouve dans tous les logiciels SIG.

Nous allons expliciter plus en détails certains concepts utilisés dans l'architecture SMAG :

- **Événement** : dans l'architecture SMAG les événements correspondent aux faits majeurs ayant lieu au cours d'une simulation tels que l'arrivée/départ d'agents, les modifications des réseaux sociaux, les changements de l'environnement, les modifications de paramètres clefs, les interventions du décideur - expérimentateur.
- **Scénario**. Un scénario est constitué d'une suite chronologique d'événements, programmés, qui vont avoir lieu au cours d'une expérimentation. Les scénarii sont utilisés par le module de gestion des intrants.
- **Simulation**. Une simulation est l'enregistrement chronologique de tous les événements qui ont eu lieu pendant une expérimentation, quelles que soient leur origine : scénario, intervention de l'expérimentateur, événement probabiliste, évolution "naturelle" du système (ex naissance d'un nouvel agent).

- **Géodatabase.** La géodatabase stocke les attributs de tous les agents répertoriés sur le terrain ou créés au cours des expérimentations. La géodatabase prend également en charge les réseaux sociaux et les données décrivant l'environnement.
- **BD résultats.** Dans la base de données résultats sont enregistrées toutes les informations générées au cours des expérimentations qui ont été fournies par les sondes définies par les décideurs. Ces données numériques servent de matériau pour les analyses et permettent d'apporter une aide à la décision.

L'architecture SMAG prévoit l'implémentation des deux modes de conduite des expérimentations (cf. 3.3.2 Les connaissances de résolution) propres aux systèmes informatiques d'aide à la décision :

- Un mode "*automatique*" où le simulateur est contrôlé à partir des scénarii gérés par le SIG et des différentes plages de variation des paramètres à prendre en considération. Dans ce mode, il est possible d'exécuter un plan d'expériences et de mener des simulations en fonction d'algorithmes prédéfinis.
- Un mode "*jeux de rôles*", où les décideurs, les experts et l'ensemble des parties prenantes peuvent intervenir au cours d'une simulation. Dans ce mode, il est possible d'intégrer les connaissances heuristiques qui n'ont pas pu être formalisées et traduites dans un langage informatique.

Le module fonctionnel "*contrôleur de simulation*" peut intégrer les connaissances de résolutions permettant d'apporter une aide à la décision ou résoudre un problème dans le mode de fonctionnement "*automatique*".

L'architecture SMAG permet de développer des outils d'aide à la décision en prenant en compte l'acquisition des données, la construction des modèles, l'exécution de plan d'expériences, la gestion et l'analyse des données générées par le calcul.

4 Implémentation

Dans cette partie nous présentons la plateforme CORMGIS qui est la première implémentation de l'architecture SMAG. Notre implémentation utilise une plateforme multi-agents et un logiciel de gestion des systèmes d'informations géographiques qui existaient déjà.

Dans ce chapitre nous détaillons les choix qui ont prévalu pour l'implémentation de l'architecture SMAG :

- Choix d'une plateforme SMA existante pour implémenter le module multi-agents.
- Choix d'un logiciel pour implémenter le module SIG.
- Couplage des modules SMA et SIG de l'architecture SMAG.

4.1 Plateforme SMA CORMAS

Deux options sont possibles pour implémenter le module multi-agents de l'architecture SMAG : construire un module SMA à partir de "zéro" ou adapter une plateforme SMA existante. Le développement d'un module multi-agents est un travail lourd, complexe qui requiert un investissement très important, pour finalement aboutir à la création d'une nième plateforme multi-agents. Aussi, pour implémenter le module multi-agents de l'architecture SMAG, nous décidons d'utiliser une plateforme multi-agents existante que nous adaptons à nos besoins. Cette option nous permet de nous concentrer sur le coeur de notre problématique.

Nous présentons maintenant les plateformes multi-agents existantes et justifions le choix de la plateforme CORMAS comme base pour d'implémentation de module multi-agents de l'architecture SMAG.

4.1.1 Les plateformes SMA

Le dynamisme de la recherche sur les systèmes multi-agents se traduit par le développement permanent de nouvelles plateformes SMA. Le site spécialisé <http://www.multiagent.com> recense début 2006 plus d'une centaines d'outils de développement dédiés aux systèmes multi-agents. Nombre de ces plateformes n'ont qu'une durée de vie très courte et une diffusion restreinte. De plus, faute de standards, et en raison de la diversité des usages pour lesquels elles ont été développées, il est très difficile de les comparer. Parmi les travaux qui ont été menés pour établir des critères permettant de classer les plateformes SMA, nous citerons ceux de Ricordel et Demazeau [Ricordel 00] qui évaluent les plateformes en fonction des facilités qu'elles offrent pour franchir chacune des 4 étapes (analyse, modélisation, implémentation, simulation) qui permettent de passer du problème à la simulation. Guessoum et Occello [Guessoum 01] proposent de classer les plateformes en fonction de la finalité de leur développement (création d'agents particuliers, domaine d'application, agents mobiles construction de modèles de simulations) et distinguent 5 catégories d'environnement de développement.

Le dynamisme des chercheurs et la multiplicité de l'offre de plateformes SMA rendent vaine toute tentative de présentation exhaustive. Nous présentons brièvement 5 environnements de développement que nous avons sélectionnées en raison de leur large utilisation: CORMAS, ZEUS, AgentBuilder, Swarm, JADE.

◇ CORMAS [CORMAS] est une plateforme de simulation multi-agents open source développée par le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement [CIRAD] pour simuler la gestion de ressources renouvelables.

◇ ZEUS [ZEUS] est un environnement intégré développé par l'Agent Research Program du British Telecom Intelligent System Research Laboratory. Cette plateforme s'organise à partir des notions suivantes: les agents, leurs buts, leurs tâches (ce que les agents doivent réaliser pour atteindre leurs buts) et les faits (ce que les agents considèrent comme étant vrai). Une version de plateforme est disponible sous licence open source.

◇ AgentBuilder [AgentBuilder] est un environnement de développement qui a été développé par Reticular Systems Inc en JAVA. Cet outil commercial permet de construire des agents intelligents à partir du modèle BDI qui utilisent langage AGENT-0. KQML pour communiquer.

◇ JADE (Java Agent DEvelopment Framework) [JADE] est une plateforme de développement open source implémentée en JAVA, compatible FIPA. JADE se compose de trois modules: DF "Director Facilitator" fournit un service de "pages jaunes" à la plate-forme; ACC "Agent Communication Channel" gère la communication entre les agents; AMS "Agent Management System" supervise l'enregistrement des agents, leur authentification, leur accès et l'utilisation du système. La plateforme est utilisée dans les domaines des applications mobiles, d'Internet, de l'optimisation du fonctionnement d'entreprises, et de la simulation des chaînes de production robotisées. JADE est utilisé par des laboratoires de British-Télécom et Télécom-Italia.

◇ Swarm [SWARM] est un ensemble de bibliothèques Objective_C/Java développées au Santa-Fé-Institute qui sont destinées à la simulation des systèmes complexes modélisés suivant le paradigme multi-agents. Swarm qui est issu de la recherche académique, est distribué sous licence GNU. Le principe de base de Swarm est d'utiliser des processus parallèles pour simuler des collections d'agents concurrents qui interagissent. Cette architecture est suffisamment ouverte et générique pour permettre de simuler toute sortes d'agents et d'aborder de nombreux sujets suivant une approche SMA.

4.1.2 Présentation de CORMAS

Nous choisissons le logiciel Cormas [CORMAS] [Bousquet 98] [Le Page 00] pour servir de base au module multi-agents de notre plateforme de développement d'outils d'aide à la décision. Cette plateforme de développement gratuite, est implémentée en SmallTalk à partir de l'environnement VisualWorks. Elle est proposée par le département TERA du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement [CIRAD]. CORMAS est orientée vers la simulation des systèmes naturels et la gestion des ressources renouvelables. L'encadré ci-dessous reproduit la présentation du logiciel CORMAS qui est disponible sur le site Internet du CIRAD.

Cormas offre un cadre de développement de modèles de simulation des modes de coordination entre des individus et des groupes qui exploitent des ressources en commun. Ce cadre se structure en trois modules:

- *Un premier module permet de définir les entités du système à modéliser, que l'on appelle des agents informatiques, et leurs interactions. Ces interactions s'expriment par des procédures de communication directe (envois de messages), et/ou par le fait plus indirect de partager le même support spatial.*
- *Le second module concerne le contrôle de la dynamique globale (ordonnancement des différents événements d'un pas de temps du modèle).*
- *Un troisième module permet de définir une observation de la simulation selon des points de vue. Cette fonctionnalité autorise l'intégration, dans le processus de modélisation, des modes de représentation.*

CORMAS facilite le travail de construction du modèle en proposant au sein des ces trois modules des éléments prédéfinis. Parmi ces éléments figurent l'entités-type, qui sont des classes SmallTalk génériques à partir desquelles, par spécialisation et affinage, l'utilisateur définit des entités particulières pour les besoins de son application

Plusieurs caractéristiques de la plateforme CORMAS nous amènent à la choisir comme élément de base pour implémenter le module multi-agents de notre plateforme prototype :

- Le code source de CORMAS et celui de son environnement de développement sont ouverts et modifiables. Cette souplesse nous permet de les adapter pour réaliser sans trop de complications la première implémentation d'une plateforme conforme à l'architecture SMAG définie précédemment.
- CORMAS propose des primitives génériques qui permettent de décrire tous les types d'agents (réactifs, hybrides, situés...) et de systèmes. La plateforme intègre notamment des primitives qui permettent de décrire facilement un environnement décentralisé et des agents sociaux situés. Ces éléments servent de base aux primitives de modélisation de notre première plateforme prototype implémentant l'architecture SMAG.
- CORMAS intègre des outils (COM, DDE, drivers ODBC) qui permettent de communiquer avec des logiciels de gestion d'informations géographiques. Le logiciel du CIRAD comprend aussi des éléments de base permettant de représenter un environnement décentralisé et d'importer et d'exporter (grille, fichiers) des informations spatiales et environnementales (au sens multi-agents) vers d'autres outils.
- Le premier module de CORMAS et les fonctionnalités fournies par l'environnement de développement VisualWorks permettent la gestion des modèles développés et le suivi de toutes les modifications des modèles. Ces caractéristiques permettent de gérer la base de modèles utilisés pour simuler les systèmes réels dans le but d'apporter une aide à la décision.
- CORMAS étant implémenté en SmallTalk à partir de l'environnement de développement VisualWorks, il est possible d'intervenir "à chaud" au cours d'une simulation pour modifier des modèles ou des paramètres et reprendre la simulation sans qu'il soit nécessaire de recompiler le code. Cette caractéristique répond à notre

exigence de pouvoir intervenir à tout instant dans une simulation pour modifier des paramètres ou des modèles. Il est également possible de sauvegarder l'état du système pour mener des analyses ou reprendre la simulation à partir des états sauvegardés.

- CORMAS est largement utilisé par la communauté des chercheurs sur les systèmes naturels et les ressources renouvelables. Considérant que la première application de nos recherches est le problème de l'eau, le choix de cette plateforme nous permet de bénéficier des travaux qui ont déjà été entrepris dans ces domaines en utilisant CORMAS et de nous intégrer dans cette dynamique.
- La plateforme CORMAS et son environnement de développement VisualWorks sont disponibles gratuitement pour la recherche et l'enseignement.

4.1.3 Le langage SmallTalk

Nous présentons maintenant les principales caractéristiques du langage de programmation SmallTalk qui a été utilisé par l'équipe qui a développé la plateforme multi-agents CORMAS.

SmallTalk est un des premiers langages de programmation orienté objet. Il a été créé en 1972. Il est inspiré par Lisp et Simula et a été conçu au Palo Alto Research Center de Xerox. Le langage a été formalisé en tant que Smalltalk-80 et est depuis utilisé par un grand nombre de personnes. SmallTalk est toujours activement développé et dispose d'une base fidèle d'utilisateurs.

Un grand nombre des innovations de l'ingénierie logicielle des années 90 viennent de la communauté des programmeurs SmallTalk, tels que les Design Patterns (patrons de conception, méthodes de conception appliqués au logiciel), l'Extrême Programming (XP – cadre pour la gestion de projets) et le refactoring (maintenance du code informatique).

Les principaux concepts de SmallTalk sont :

- "Tout est objet" : les chaînes de caractères, les entiers, les booléens, les définitions de classes, les blocs de code, les piles, la mémoire sont représentées en tant qu'objets.
- Tout est modifiable : l'environnement de développement intégré, lui même, peut être modifié en cours d'utilisation, sans recompiler et redémarrer l'application. Il est également possible d'ajouter de nouvelles instructions de contrôle dans le langage. Avec certaines implémentations, la syntaxe du langage, ou la façon dont le ramasse-miettes (garbage collector) fonctionne peuvent également être modifiées.
- Les types sont dynamiques.
- Un ramasse-miettes mémoire est intégré et transparent pour le développeur.
- Un système de gestion d'exceptions avec reprise est fourni.

Les programmes SmallTalk sont généralement compilés en byte code, qui sont ensuite exécutés par une machine virtuelle adaptée à l'ordinateur hôte.

La Translation Dynamique : les machines virtuelles commerciales modernes compilent le byte code vers le code machine natif de façon à obtenir de meilleures performances, une technique dont Smalltalk-80 a été le pionnier, développé par ParcPlace Systems au milieu des

années 80. Cette idée a été adoptée par le langage de programmation Java quelques dix ans après et renommé "compilation Just-In-Time" (JIT).

SmallTalk implémente, en plus des principes objets de bases (classe, objet, héritage, polymorphisme), des concepts originaux (méta classe) et introduit la notion d'objet persistant, de traitement des exceptions et le principe Modèle-Vue-Contrôleur.

En SmallTalk il n'existe pas d'instructions de contrôles intégrées au langage: *if then else*, *for*, *while*, etc. Toutes ces instructions sont implémentées en utilisant des objets. Ainsi les décisions sont prises en envoyant un message *ifTrue* à un objet *Booléen*, et en passant un fragment de code à exécuter si le Booléen est vrai. Le seul aspect intégré par défaut est la syntaxe pour envoyer un message à un objet.

Dans soucis d'efficacité et de simplicité nous avons choisi l'environnement de développement SmallTalk qui a été utilisé pour développer la plateforme multi-agents CORMAS : VisualWorks [VisualWorks]. Cet environnement de développement qui implémente le langage SmallTalk est proposé par la société Cincom [Cincom] comprend un environnement de développement complet, un compilateur juste à temps ainsi qu'une machine virtuelle SmallTalk.

4.2 ARCGIS

Le choix d'un logiciel de gestion de bases de données géographiques pour implémenter une plateforme conforme à l'architecture SMAG est guidé par notre volonté d'utiliser des données provenant du plus grand nombre de sources: administrations, communes, EDF, syndicats de gestion des eaux, BRGM, Météo France, cadastres... Nous souhaitons utiliser un standard adopté par le plus grand nombre d'utilisateurs, y compris des non spécialistes, afin de pouvoir échanger des données et leur soumettre nos résultats.

Cette volonté d'utiliser un outil capable de faciliter les échanges nous conduit à choisir un logiciel de gestion de bases de données géographiques parmi les logiciels commerciaux les plus utilisés. Nous avons donc le choix entre MapInfo, ArcGIS, Idrisi, Geoconcept.

Nous avons retenu le logiciel ArcGIS de la société ESRI [ESRI] pour les motifs suivants:

- ArcGIS est très utilisé par les organismes et les sociétés avec lesquels nous serons amenés à échanger des données. Il offre des interfaces qui le rendent aisément utilisable par des non spécialistes des SIG.
- En plus des fonctionnalités classiques des logiciels de gestion de bases de données géographiques, ESRI propose une suite complète de logiciels allant de la saisie des relevés de terrain jusqu'à des applications permettant la saisie et la consultation des bases de données géographiques par internet.
- A l'Université de Corse ArcGIS est déjà utilisé dans notre laboratoire, le choisir nous permet de rester dans la continuité des recherches déjà entreprises. Nous avons ainsi pu faire appel aux ressources internes et consacrer plus de temps au coeur de notre problématique.

- Le coeur d'ArcGIS est compatible avec l'environnement COM, C++, .NET et Java, ce qui offre aux développeurs plusieurs solutions pour communiquer avec le SIG.

De plus, en 2002, au moment du choix, l'option ArcGIS plutôt que celle d'un logiciel libre (PostGIS, GRASS, QuantumGIS, MapServer, GeoTools...), nous permettait également de bénéficier d'un support technique, d'une documentation aboutie, d'interfaces conviviales et d'une offre étendue de formations. L'évolution des logiciels libres depuis ce moment nous conduirait très probablement à préférer aujourd'hui une solution totalement ouverte.

La Figure 24 et l'encadré qui lui succède sont issus de la documentation du produit développée par la société ESRI et présentent l'architecture de la plateforme ArcGIS.

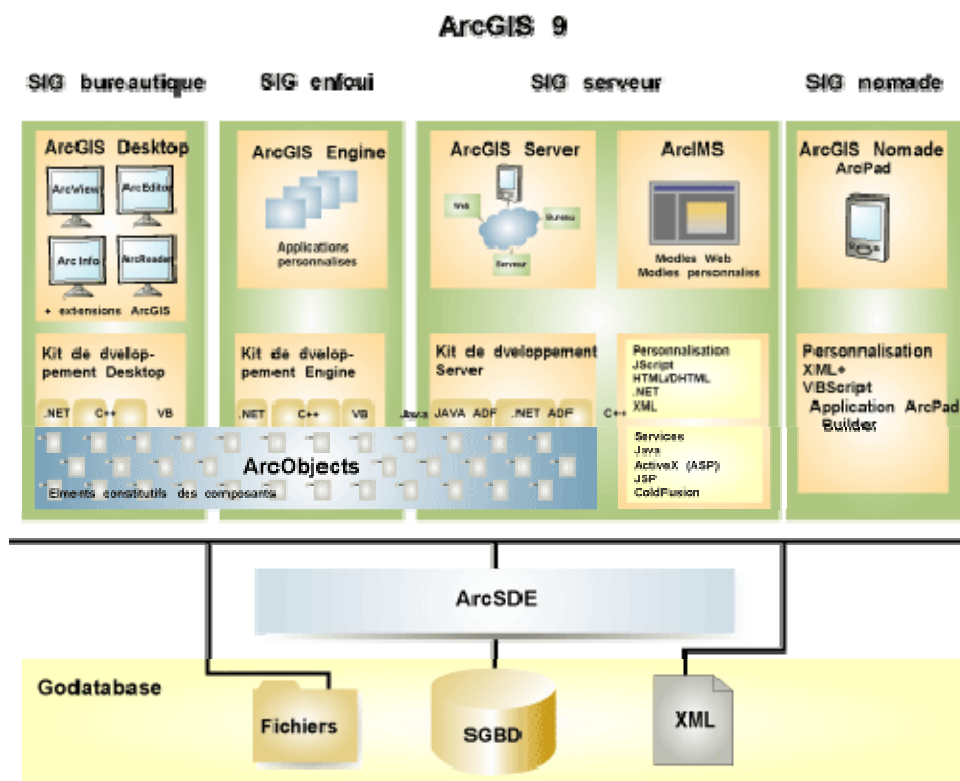


Figure 24 : Architecture d'ArcGIS 9

ArcGIS

ArcGIS propose une structure évolutive permettant la mise en oeuvre du SIG pour un seul utilisateur ou de nombreux utilisateurs sur des postes bureautiques, des serveurs, sur Internet et sur le terrain. La solution ArcGIS 9 permet d'élaborer un système d'information géographique complet grâce à un ensemble intégré de logiciels SIG.

Il est constitué des éléments suivants :

- *ArcGIS Desktop : une suite intégrée d'applications SIG professionnelles,*
- *ArcGIS Engine : des composants qui peuvent être incorporés par des développeurs afin de personnaliser des applications SIG,*
- *Applications SIG pour serveur : ArcSDE®, ArcIMS® et ArcGIS Server,*
- *Applications SIG nomades : ArcPad®, ainsi qu'ArcGIS Desktop et ArcGIS Engine pour les tablettes PC.*

Architecture d'ArcGIS d'après ESR [ESRI]

4.3 La plateforme CORMGIS

La plateforme CORMGIS est la première implémentation de l'architecture SMAG où le module multi-agents a été développé à partir de la plateforme CORMAS et le module SIG est implémenté par le logiciel ArcGIS de la société ESRI.

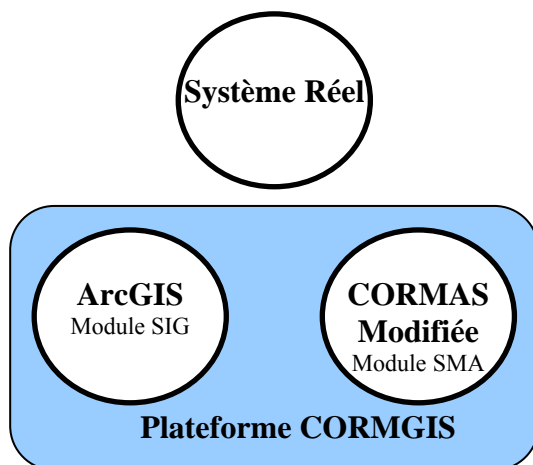


Figure 25 : Architecture logicielle CORMGIS

La Figure 25 synthétise l'implémentation de la plateforme de développement d'outil d'aide à la décision CORMGIS qui est la première à être conforme à l'architecture SMAG.

4.3.1 Implémentation du module SIG de CORMGIS

Pour plusieurs raisons le module SIG de CORMGIS est constitué par le logiciel ArcGIS auquel nous n'apportons aucune modification. En effet :

- Nous avons choisi de n'utiliser que les fonctionnalités génériques des logiciels SIG, présentes dans tous les logiciels, pour permettre à des organisations disposant d'un logiciel SIG différent d'ArcGIS de réutiliser facilement notre plateforme CORMGIS.
- Le logiciel ArcGIS est la propriété de la société ESRI. A ce titre il est protégé par plusieurs licences et son code n'est pas public. Apporter des modifications aurait été illégal et les modifications auraient été obsolètes dès la mise en circulation de la prochaine version que l'éditeur du logiciel.

Nous intégrons les éléments spécifiques qui permettent le couplage du module SIG dans le module multi-agents et dans la structure de la base de données géographiques.

4.3.2 Implémentation du module SMA de CORMGIS

Nous développons le module multi-agents de la plateforme CORMGIS à partir de la plateforme SMA CORMAS du CIRAD. Pour pouvoir bénéficier des innovations des prochaines versions de la plateforme CORMAS nous construisons le module multi-agents de CORMGIS en dérivant les classes qui sont utilisées pour modéliser les systèmes dans CORMAS. Le module multi-agents de la plateforme CORMGIS correspond à la plateforme CORMAS du CIRAD à laquelle nous ajoutons trois classes (*SMAGModel*, *SMAGAgent*, *SMAGObject*) qui permettent de modéliser les systèmes et de faire le lien avec le système d'informations géographiques.

Nous ne présentons ici que les éléments que nous avons ajoutés à CORMAS. L'essentiel du code de CORMGIS est directement hérité, sans modification, de la plateforme CORMAS et n'est donc pas détaillé.

La classe *SMAGModel*

La classe *SMAGModel* que nous développons est dérivée de la classe *CormasModel* (cf. Figure 29) qui est dans CORMAS la classe mère qui permet de modéliser des systèmes selon un point de vue multi-agents. Les attributs et les méthodes de la classe *SMAGModel* permettent de faire l'interface avec le module SIG.

L'initialisation du simulateur est réalisée avec les méthodes *Analyse*, *RoleGame*, et *scenarioManager* qui implémentent le module fonctionnel "*Interface Utilisateur*" de l'architecture SMAG :

- La méthode *Analyse* permet de définir puis de suivre un plan d'expérience.
- La méthode *RoleGame* permet d'activer les interfaces homme-machine de contrôle interactif des simulations.

- La méthode *scenarioManager* permet de gérer les scénarii qui décrivent les expérimentations.

Le contrôle de l'avancement des simulations est assuré par les méthodes *FollowScenario* et *WithoutScenario* qui permettent d'implémenter le module fonctionnel "*Contrôleur de Simulation*" de l'architecture SMAG.

- La méthode *FollowScenario* permet l'exécution de la simulation en suivant le scénario qui a été choisit lors de la phase d'initialisation. Les scénarii sont stockés dans la géodatabase et sont gérés en utilisant le module SIG de CORMGIS ou un logiciel de gestion de base de données standard.
- La méthode *WithoutScenario* permet l'exécution d'une simulation sans suivre de scénario passé la phase d'initialisation du SIAD.

Les méthodes *Instanciation* et *updateCurrentSimulation* implémentent le module fonctionnel "*Gestion des Intrants*" de l'architecture SMAG qui permet de répercuter sur le simulateur les évènements qui proviennent des décideurs - expérimentateurs ou du scénario qui a été choisi pour "piloter" l'expérience.

- La méthode *Instanciation* initialise l'environnement et instancie les agents qui feront partie de la simulation. L'initialisation se fait en interrogeant la géodatabase en utilisant comme clef le nom d'un scénario.
- La méthode *updateCurrentSimulation* a pour fonction de communiquer au contrôleur de simulation tous les évènements qui vont avoir lieu au pas de temps courant. Les évènements sont consignés dans un scénario qui est géré par le système d'informations géographiques. Cette méthode permet de modifier l'environnement, de changer des paramètres de simulation et de déclencher l'instanciation ou la destruction d'agents.

La méthode *addObjectGisSimulation* implémente une partie du module fonctionnel "*Gestion des Extrants*" de l'architecture SMAG. Cette méthode permet d'enregistrer dans la géodatabase tous les évènements qui ont lieu au pas de temps courant. Cette fonction ajoute dans la géodatabase les agents qui ont été créés "dynamiquement" par le simulateur ou qui ont été rajoutés manuellement par le décideur - expérimentateur. Les autres fonctionnalités du module "*Gestion des Extrants*" sont assurées par des méthodes héritées de la classe *CormasModel*.

Dans CORMGIS l'environnement est décentralisé, l'espace est structuré par grille composée de cellules. Chaque cellule peut être considérée comme un petit environnement centralisé ayant un comportement autonome. La classe *SpatialEntityElement* (cf. Figure 26) permet par dérivation de modéliser les parcelles qui forment ensemble l'environnement du système multi-agents. En cas de besoin, l'environnement peut être centralisé en fixant à un le nombre de cellules. L'initialisation ou la sauvegarde de l'état de la grille peut se faire en utilisant des méthodes héritées de la classe *CormasModel* à partir de fichiers rasters générés grâce à la géodatabase et au module SIG.

La classe SMAGAgent

La classe *SMAGAgent* que nous développons est dérivée de la classe *AgentCommLocation* (cf. Figure 29) qui est dans CORMAS la classe mère de tous les agents situés communicants (cf. Etat de l'art) et permet de modéliser les agents du système.

La classe *SMAGAgent* n'impose aucune architecture interne aux agents quelle modélise. Le modélisateur a donc la possibilité de choisir l'architecture qui lui semble la plus adaptée en fonction du comportement de l'agent : BDI, InteRRaP, TouringMachines....

La classe *SMAGAgent* hérite d'un système de communication par Mail Box qui lui permet d'échanger des messages avec les autres agents. Le système de communication est hérité de la classe *AgentCommLocation* (cf. Figure 27) comprend principalement un attribut (*mailBox*) et des méthodes d'envoi et de réception (*nextMessage...*). Ce système de communication est minimal, sans protocole, ouvert; ce qui permet au modélisateur d'implémenter le protocole qui lui semble le plus pertinent KQML, ACL...

Les agents modélisés en dérivant la classe *SMAGAgent* sont des agents situés : ils sont localisés dans l'espace et leur comportement dépend de leur position et de leur voisinage (cf. 2.3.5 Les agents situés). Les agents sont situés sur un agent cellule (attribut *patch* - dérivé de la classe *SpatialEntity*) qui représente une parcelle de l'environnement global qui est décentralisé. Ils héritent d'attributs et de méthodes qui leur permettent d'explorer leur voisinage (au sens de Conway) et de déplacer (méthodes *leave*, *moveTo...*) dans l'environnement décentralisé de CORMGIS.

La méthode *toDataBase* permet de sauvegarder l'agent dans la géodatabase. Cette méthode est spécifique à CORMGIS et est un des éléments qui permettent de coupler les modules SMA et SIG. Cette méthode est souvent appelée par la méthode *addObjectGisSimulation* de la classe *SMAGModel* lorsqu'un agent doit être ajouter/sauvegarder dans la géodatabase.

La classe SMAGObject

La classe *SMAGObject* que nous développons est dérivée de la classe *ObjectLocation* qui est dans CORMAS la classe mère utilisée pour modéliser les objets (entités passives sans dynamique interne) faisant parti des systèmes à modéliser. La classe *SMAGObject* gère spécifiquement l'instanciation des objets à partir des données gérées par le SIG, ainsi que l'ajout d'un nouvel objet dans la base de données géographiques avec la méthode *toDataBase*.

Les Figure 26, Figure 27, Figure 28, présentent les diagrammes de classes de la plateforme CORMAS, proviennent l'équipe de développement du CIRAD. La Figure 29 présente les classes qui ont été créées dans le cadre du développement de la plateforme CORMGIS.

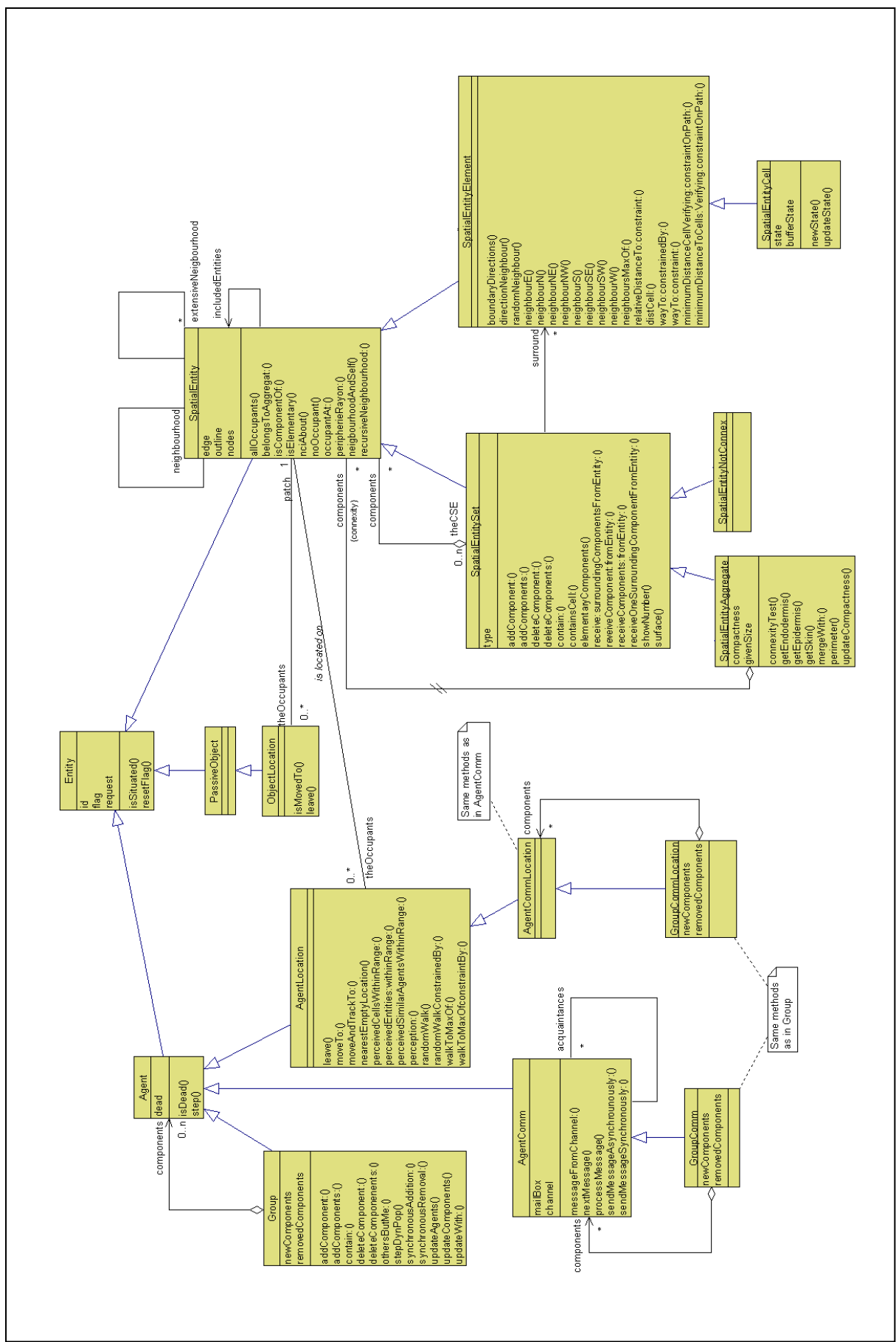


Figure 26 : Diagramme de classe du paquetage "Entities" de CORMAS [CORMAS]

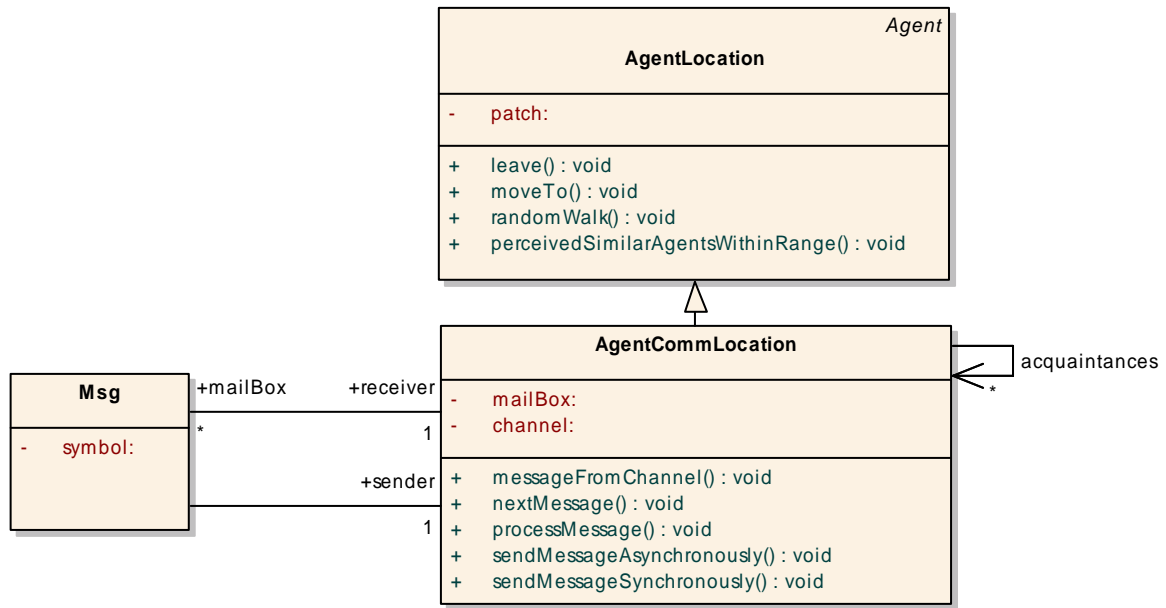


Figure 27 : Classe AgentCommLocation de CORMAS [CORMAS]

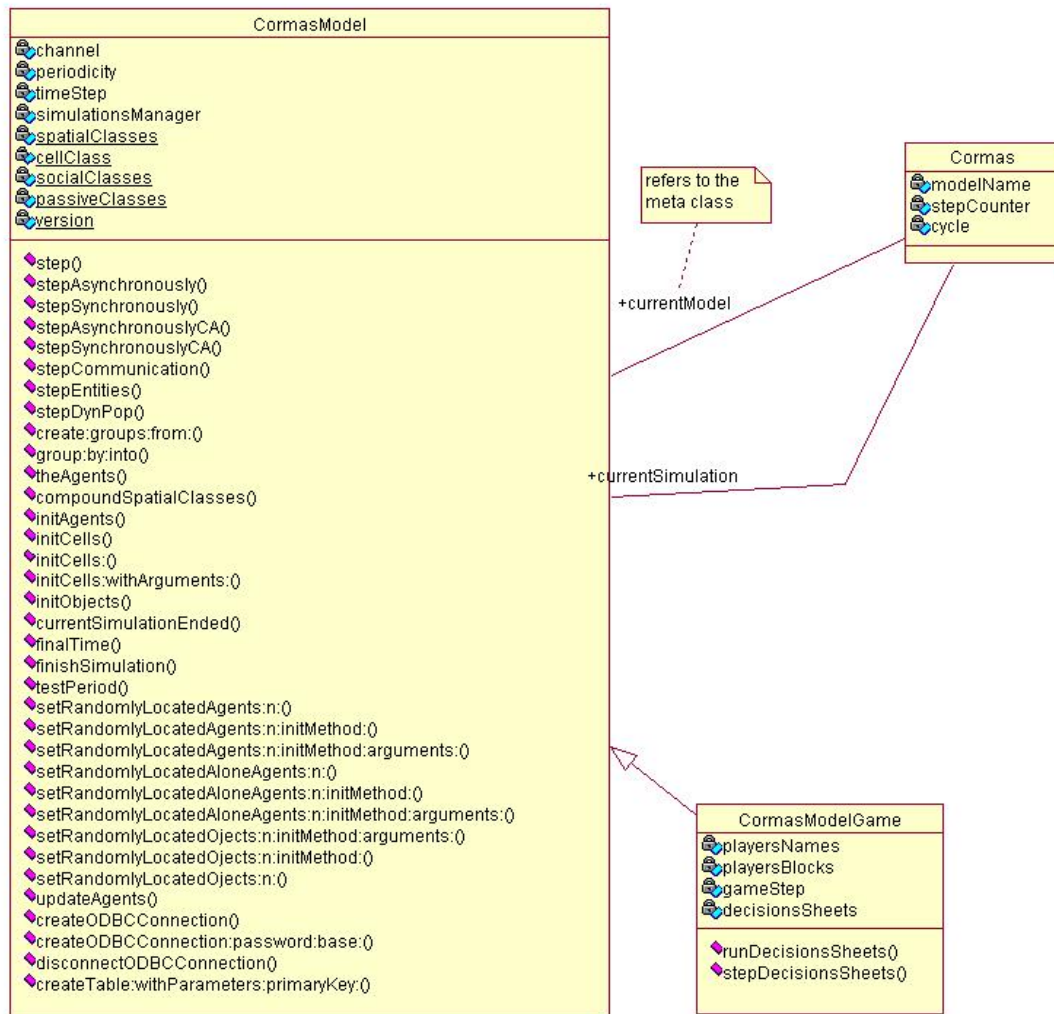


Figure 28 : Diagramme de classe des interfaces de CORMAS [CORMAS]

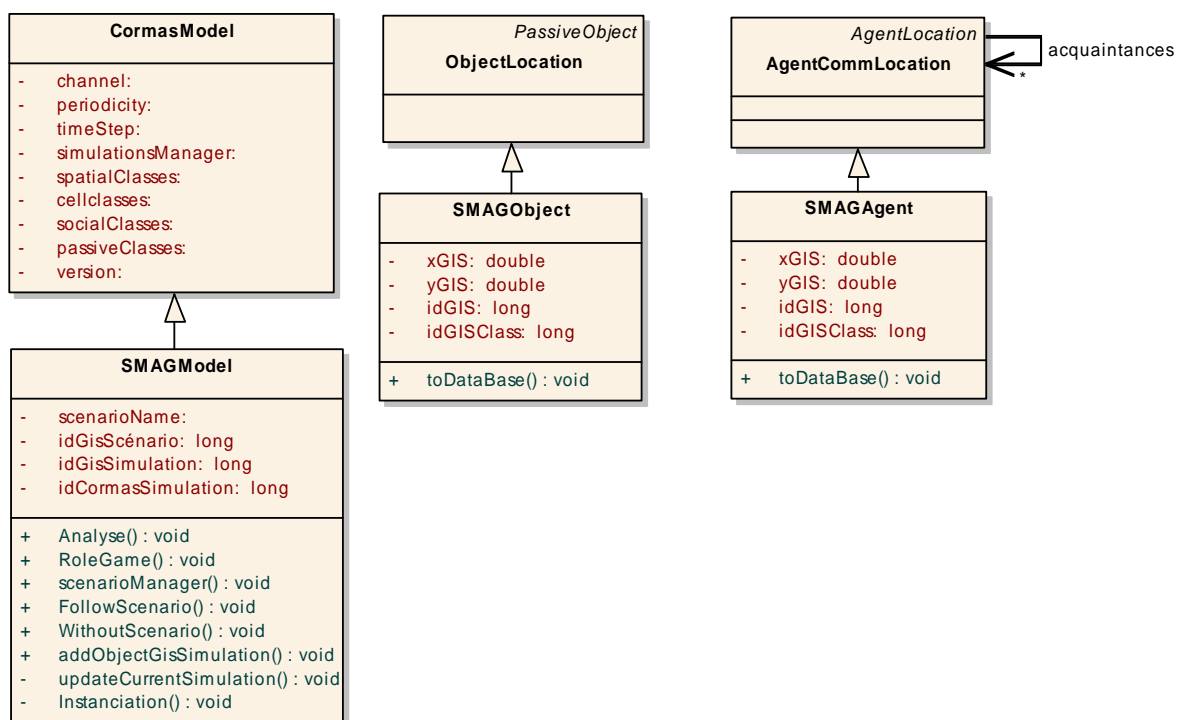


Figure 29 : Diagramme des classe spécifiques à CORMGIS

Les modules fonctionnels "*Base de Modèles*", "*Système de gestion de la Base de Modèles*" et "*Saisie de Nouveau Modèle*" de l'architecture SMAG (cf. Figure 23) sont déjà inclus dans la plateforme CORMAS du CIRAD. Dans un souci d'efficacité, nous choisissons de les utiliser tels qu'ils existent sans les modifier.

En utilisant le module fonctionnel "*Gestion des Extrants*" (cf. Figure 23), le décideur - expérimentateur peut définir quelles sont les données de simulation qu'il souhaite enregistrer. Ces fonctions d'enregistrement et d'observation sont directement héritées du module d'observation de la plateforme CORMAS (cf. 4.1.2 Présentation de CORMAS) qui permet aux utilisateurs de définir leurs points de vues. Les données sont ensuite stockées dans la base de données annexe `cormasSimulations` ou sous diverses formes de fichiers.

4.3.3 Couplage des modules SMA et SIG de CORMGIS

Afin de limiter le couplage logiciel entre les modules SMA et SIG de CORMGIS nous préférons utiliser la solution du couplage par les données plutôt que d'utiliser les solutions plus perfectionnées: COM, librairies C++, DDE ou DLL. Cette option nous permet de pouvoir plus facilement changer les logiciels qui servent de base à l'implémentation des modules SMA et SIG de l'architecture SMAG (cf. Figure 21).

Les modules SMA et SIG de CORMGIS communiquent donc par l'intermédiaire des données :

- Le module SMA accède grâce à une connexion ODBC à la géodatabase qui est construite grâce au module ArcCatalog d'ArcGIS. Afin de pouvoir accéder aux données géographiques qui ne sont pas disponibles sans extensions et pilotes spéciaux, nous "répliquons" ces données en rajoutant dans les tables des champs aux formats standards. Nous disposons de scripts pour ArcGIS qui mettent automatiquement ces champs à jour. Nous utilisons une connexion ODBC pour accéder aux descriptions des agents et aux suites d'évènements constituant un scénario ou une simulations qui sont enregistrés dans la géodatabase.
- Le module SMA de CORMGIS accède aux données spatiales raster et vectorielle une fois que celles-ci ont été converties au format Raster ASCII compatible avec tous les logiciels SIG. Le module ArcToolbox d'ArcGIS fournit les outils permettant de convertir les données géographiques d'un format vers un autre format. La classe *CormasModel* dispose de méthodes permettant d'importer et d'exporter des données géographiques en utilisant le format Raster ASCII.

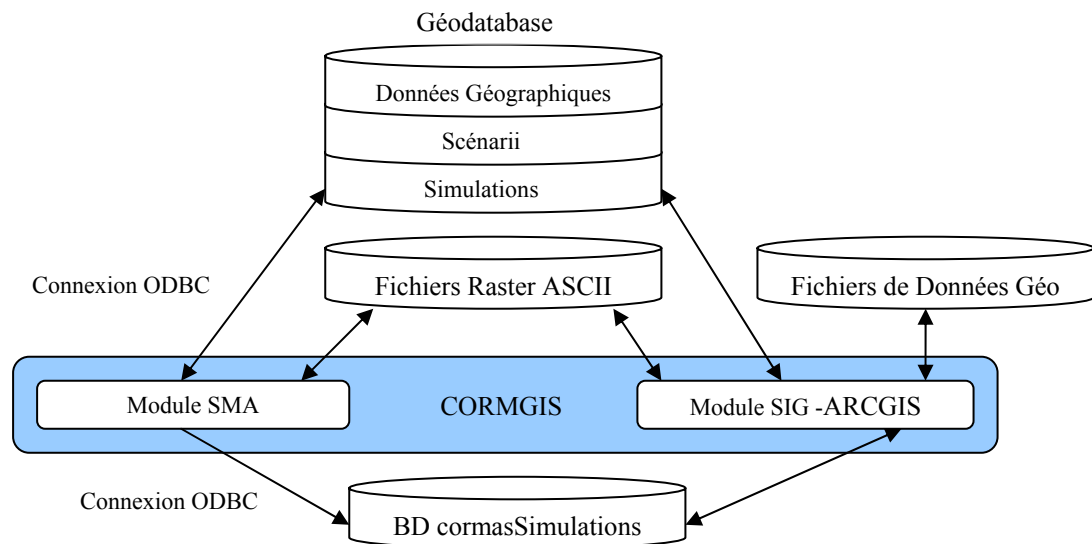


Figure 30 : Couplage SMA - SIG par les données dans CORMGIS

La Figure 30 illustre le couplage par les données entre les modules SMA et SIG de la plateforme CORMGIS.

En choisissant d'utiliser les formats standards dans la base de données géographiques et le format Raster ASCII, nous pouvons échanger des données avec des organisations utilisant des solutions SIG autres qu'ArcGIS. Ce choix autorise également un accès aux données géographiques en utilisant des logiciels aussi répandus que bloc-notes et Access.

4.3.4 Aide à la décision avec CORMGIS

Après avoir présenté comment les modules logiciels SMA et SIG de CORMGIS permettent d'intégrer les connaissances de domaine, nous allons maintenant présenter

l'intégration des connaissances de résolutions permettant de résoudre un problème ou d'apporter une aide à la décision.

Conformément à notre analyse des méthodes de résolution de problèmes (cf. 3.6.1 Niveau connaissances du problème et résolution), CORMGIS dispose de fonctionnalités permettant d'emprunter plusieurs possibilités pour la recherche de solutions et intégrer les connaissances de résolution :

- En utilisant et personnalisant la méthode *Analyse* de la classe *SMAGModel* et l'interface permettant de fixer les plages d'excursion des paramètres des simulations, le décideur peut définir et faire exécuter un plan d'expérience. Cette méthode permet également l'exécution d'algorithmes de résolution.
- La recherche de solutions à de nombreux problèmes entraîne des explosions combinatoires et des temps de calculs immenses, aussi ils ne peuvent être résolus qu'en utilisant des méthodes empiriques. Pour ce faire, CORMGIS dispose d'un mode de contrôle des expérimentations et d'interfaces graphiques permettant de conduire le système comme dans un jeu de rôles. Pour l'utiliser il faut personnaliser la classe *RoleGame* de la classe *SMAGModel*. Les fonctionnalités héritées de la plateforme CORMAS et de son langage de programmation SmallTalk autorisent, en cours de simulation, sans recompilation ni réinitialisation, toutes les modifications de paramètres, du code ou des modèles que les décideurs - expérimentateurs jugeraient pertinentes. Les décideurs peuvent ainsi faire appel et intégrer dans leur processus de prise de décision du savoir et des connaissances empiriques qui n'ont pas été formalisée en SmallTalk.

La fenêtre présentée Figure 31, héritée de la plateforme CORMAS, permet de choisir le mode de conduite des expérimentations (*RoleGame / Analyse*), de choisir ou non de suivre un scénario (*FollowScenario/WithoutScenario*), et de choisir les sondes qui à enregistrer.

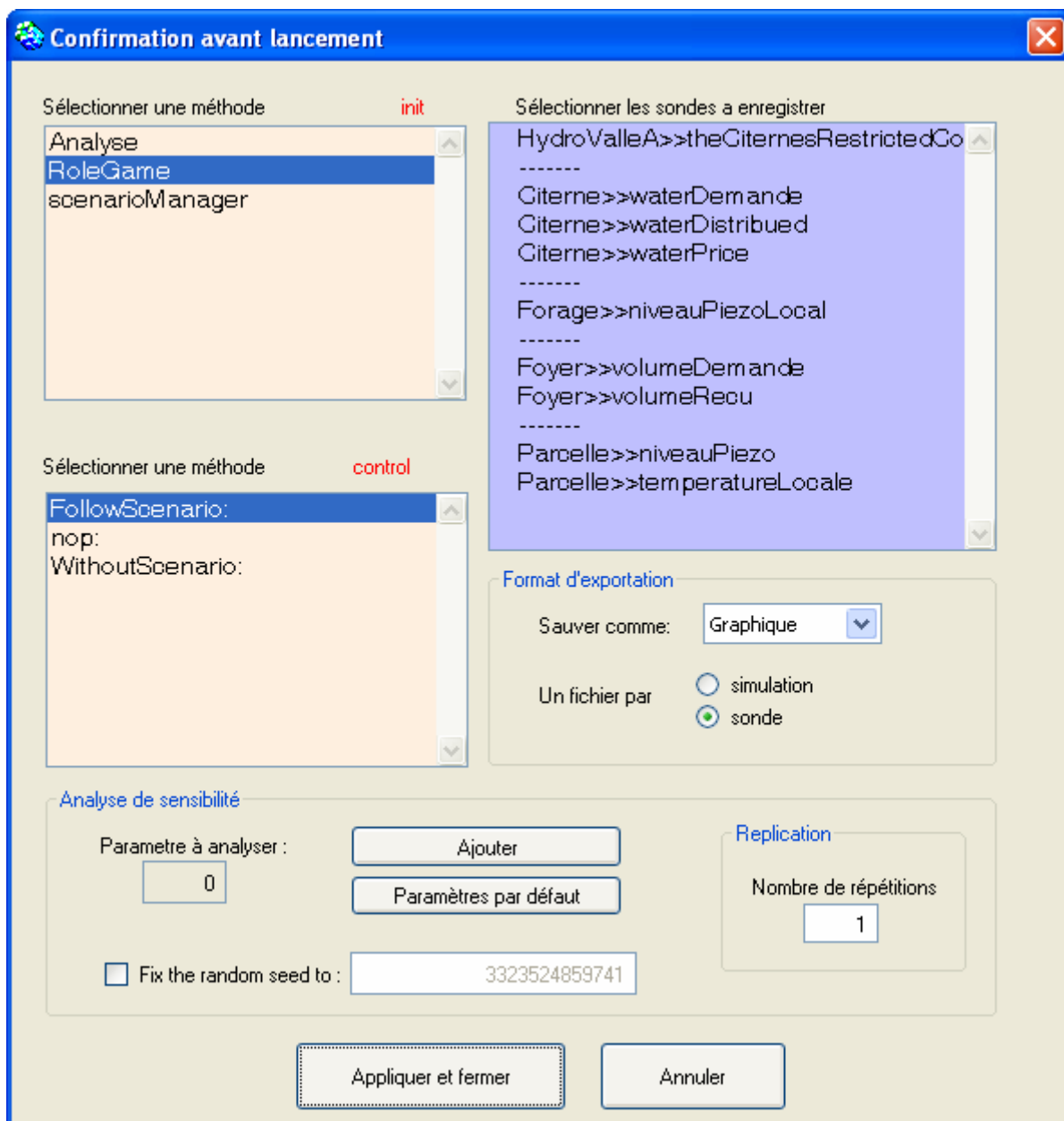


Figure 31: Interface de contrôle de l'initialisation

Toutes les données générées au cours des expérimentations qui sont utiles pour les décideurs sont automatiquement enregistrées dans une base de données annexe par la plateforme CORMGIS. Ainsi ces données peuvent ultérieurement faire l'objet d'analyses et apporter aux décideurs des éléments d'aide à la décision.

4.4 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté la plateforme prototype CORMGIS qui est la première implémentation de l'architecture SMAG que nous avons préalablement définie. Le développement de la plateforme CORMGIS a été la première étape du processus de concrétisation et de validation de notre approche théorique.

L'implémentation de l'architecture SMAG nous a conduit à faire un état des lieux des plateformes multi-agents existantes ainsi que des logiciels de gestion des systèmes d'informations géographiques disponibles.

En augmentant et en transformant CORMAS, la plateforme multi-agents développée par le CIRAD, nous avons traduit dans un langage informatique notre architecture SMAG. Notre travail d'implémentation et de codage peut être décomposé en trois grandes tâches : la création des classes SMAGAgent, SMAGObject, SMAGModel, l'interfaçage avec le système d'informations géographiques ArcGIS, et la gestion des scénarii et des simulations.

En menant à son terme le développement de la plateforme prototype CORMGIS nous avons pu montrer que notre approche théorique pouvait se concrétiser dans un domaine où les propositions théoriques et les architectures proposées dépassent rarement le stade de la théorie. A ce jour, peu de prototypes de plateforme SMA SIG ont été dévoilés.

5 Application à la gestion de l'eau

Les problématiques environnementales et la gestion de l'eau dans les îles de méditerranée sont à l'origine de nos recherches sur les systèmes informatiques d'aide à la décision. C'est donc naturellement que nous choisissons la problématique de l'eau comme premier champ d'application de nos recherches. Les premières études que nous entreprenons s'attachent à montrer les conséquences des comportements individuels et des mesures politiques sur la fréquence des coupures d'eau en période de sécheresse. A travers cette étude de cas, nous souhaitons également valider notre démarche.

Dans cette partie nous exposons successivement :

- La problématique de l'eau dans les îles de méditerranée.
- Un panorama des outils informatiques existants se rattachant à la problématique.
- L'intérêt d'une approche SMA – SIG pour étudier ce type de problème.
- Les spécifications d'un outil d'aide à la décision orienté SMA – SIG.
- Un modèle multi-agents du système hydrologique insulaire.
- Une étude de l'influence des comportements individuels pendant les pénuries.
- Une étude pour éclairer le choix d'une politique de contrôle des usagers.

5.1 Le défi de notre futur approvisionnement en eau

L'eau a toujours été une préoccupation majeure dans le bassin méditerranéen [Dugot 01]. Aujourd'hui, en de nombreux points du bassin, la consommation humaine a atteint la limite des précipitations annuelles et l'eau est devenue un frein au développement de ces territoires. Face à une pénurie naissante et à des perspectives de changements climatiques, les autorités ont lancé de nombreuses études pour trouver des solutions. Les décideurs ne sont pas seulement à la recherche de réponses techniques, ils souhaitent actualiser leurs choix politiques et repenser leur action en faveur du développement de leurs territoires.

L'eau dans les îles méditerranéennes : vers une pénurie généralisée.

La première cause des tensions sur l'eau est l'augmentation continue de la demande. Celle-ci augmente sous l'effet de plusieurs facteurs: accroissement de la population, hausse de la consommation domestique moyenne par habitant, modernisation de l'agriculture (irrigation et cultures à forte valeur ajoutée). A cela s'ajoute le développement d'un secteur du tourisme très gourmand en eau qui est devenu prépondérant dans l'économie. La seconde cause de ces tensions est le changement climatique en cours qui se traduirait selon les études par une baisse des précipitations comprise entre 5% et 40 % [Margat 02].

Face à cette demande croissante, les ressources restent limitées. Déjà aujourd'hui la demande dépasse souvent l'apport des pluies [Erhars 83]. Quasiment totalement dépourvues de réserves fossiles, les îles connaissent fréquemment des ruptures d'approvisionnement l'été. Lorsque la pénurie se prolonge, les autorités sont contraintes d'importer de l'eau par tanker ou de recourir à des unités de dessalement de l'eau de mer.

Confrontées au coût extrêmement important de ces solutions et à des perspectives inquiétantes de changement climatique, les décideurs ont commandé de nombreuses études pour faire face à ce problème qui aujourd'hui est un facteur qui limite les possibilités de développement. Les études portent sur la connaissance de l'environnement, l'évaluation des

ressources mobilisables, la modernisation et la construction d'infrastructures, la modernisation de l'agriculture, la modification des comportements des habitants, la planification par secteurs économiques du développement [Redaud 00].

Ces recherches doivent impérativement être menées dans un cadre de réflexion global qui prend en compte l'ensemble des parties concernées par l'eau. En effet, les îles sont des petites sociétés isolées dans lesquelles toutes les parties sont en interaction forte, et où toute mesure, même très ponctuelle en direction d'un acteur, a une incidence sur d'autres acteurs et modifie finalement l'équilibre insulaire. Les autorités souhaitent donc disposer d'outils et d'études permettant de prévoir l'impact des politiques et des actions qu'elles envisagent de promouvoir sur l'ensemble de la société.

5.2 Présentation des modèles et simulateurs informatiques existants :

Les travaux consacrés, depuis l'antiquité, à l'étude et la modélisation de tous les domaines relatifs à l'eau, ont été réinvestis dans de nombreux logiciels de simulations lorsque l'informatique est devenue accessible aux non spécialistes. La complexité des logiciels et celle des modèles théoriques utilisés comme bases n'ont cessé d'augmenter avec les capacités des ordinateurs. Les très nombreux logiciels aujourd'hui disponibles couvrent pratiquement l'ensemble des problèmes ayant trait à l'eau : climat, ruissellement, érosion, eaux souterraines, inondation, pollution, gestion des réseaux de distribution, assainissement...

L'examen exhaustif des programmes sur le marché étant impossible, nous présentons une classification des différents types de logiciels qui sont actuellement disponibles.

5.2.1 Logiciels de la classe « hydrologique »- scientifiques

Les nombreux modèles théoriques développés pour représenter chacune des étapes du cycle de l'eau servent de bases à des logiciels destinés à simuler le comportement hydrologique de tout ou une partie d'un bassin versant. Ainsi il existe des logiciels qui permettent spécialement de calculer l'état de nappes phréatiques, de prévoir le débit des cours d'eau, de simuler les processus d'érosion... De par leur conception, ces logiciels sont très spécialisés sur un aspect du cycle pour lequel ils offrent d'excellents résultats, mais en revanche leurs performances sont plus aléatoires sur d'autres aspects. Ainsi le logiciel RUSLE2 [RUSLE2] simule très bien l'érosion mais ignore les nappes d'eaux souterraines. Les logiciels de cette classe peuvent être utilisés pour l'étude de toutes les régions ou les données sont disponibles.

Parmi les logiciels appartenant à cette classe nous citerons :

- Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry [Coe 00]
- Mississippi Basin Modeling System (MBMS)
- ADEAUMIS [Leenhardt 04]
- PODIUM [IWMI 98]

Ces logiciels, issus de la recherche, se basent sur un modèle théorique et offrent de bonnes réponses sur le point fort de la théorie choisie. Peu de programmes de cette classe couplent plusieurs modèles pour proposer des réponses satisfaisantes sur plusieurs aspects. Ces outils sont conçus par des experts pour des experts. Ils sont destinés à produire des informations pour le monde de la recherche.

5.2.2 Logiciels d'ingénierie

Des logiciels d'un usage plus simple ont été développés pour répondre aux besoins des décideurs et des techniciens en leur fournissant des données opérationnelles. Les logiciels de cette classe permettent aux autorités de prévoir par exemple l'état des nappes souterraines, d'estimer le taux de remplissage des barrages, d'anticiper la survenue de crues ou d'inondations. Ces outils sont destinés à des bureaux d'études, où ils sont utilisés par des ingénieurs pour répondre spécifiquement au problème étudié : ruissellement, inondations, suivi d'un réseau d'adduction, diffusion de polluants... Les utilisateurs disposent de bibliothèques génériques pour configurer le logiciel et entrer les données nécessaires à l'étude du cas qui les occupent. Certains de ces logiciels proposent des modules optionnels qui permettent d'aborder plusieurs aspects d'un problème.

Nous présentons trois logiciels qui illustrent les outils informatiques actuels dédiés à l'ingénierie et à la gestion de l'eau. Ils ont été conçus pour répondre à une unique problématique et ne prennent pas en compte les autres aspects de la question.

► *Watershed Modeling System 7*

Le logiciel Watershed Modeling System 7 (WMS7) est développé par la société Environmental Modeling Systems [EMS 05]. Il offre aux utilisateurs des outils pour gérer un bassin versant. En fonction de ses besoins l'utilisateur fera l'acquisition de modules qui permettent de :

- Délimiter le bassin versants (cf. Figure 32).
- Prévoir les zones aux forts risques d'inondation.
- Modéliser le réseau d'évacuation des eaux pendant les orages.
- Modéliser les écoulements de surface et souterraines.
- Importer et exporter des données vers un SIG.

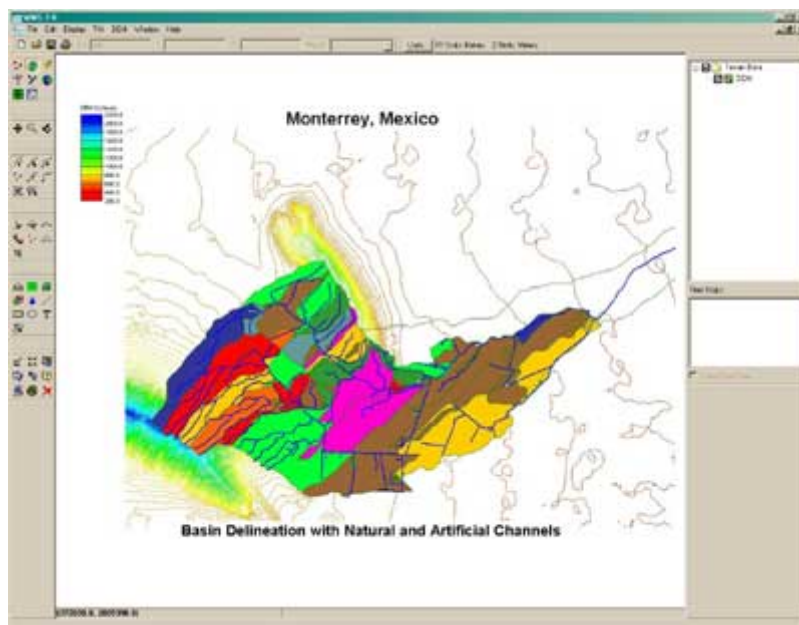


Figure 32 : Délimitation des bassins versants avec le logiciel WMS7

WMS7 répond parfaitement aux besoins d'organisations qui gèrent des territoires et dont les missions consistent à délimiter les zones inondables, estimer les risques d'inondation et dimensionner un réseau d'évacuation des eaux de pluies. En revanche WMS7 n'apporte aucune solution pour des utilisateurs préoccupés par l'alimentation en eau potable, les problèmes d'érosion, le comportement des individus.

► *WATSYS*

WATSYS est un logiciel développé par la société Civil Systems [Civil 05]. Ce logiciel permet de gérer un réseau d'adduction d'eau potable. Il permet notamment de :

- Se connecter à AUTO CAD pour éditer des plans des réseaux et des villes gérées.
- Localiser et gérer les connections avec les abonnés.
- Modéliser le réseau d'adduction : pompes, réservoirs, canalisations...
- Calculer les pertes de charges et les débits dans le réseau (cf. Figure 33).
- Importer et exporter des données vers d'autres outils informatiques.

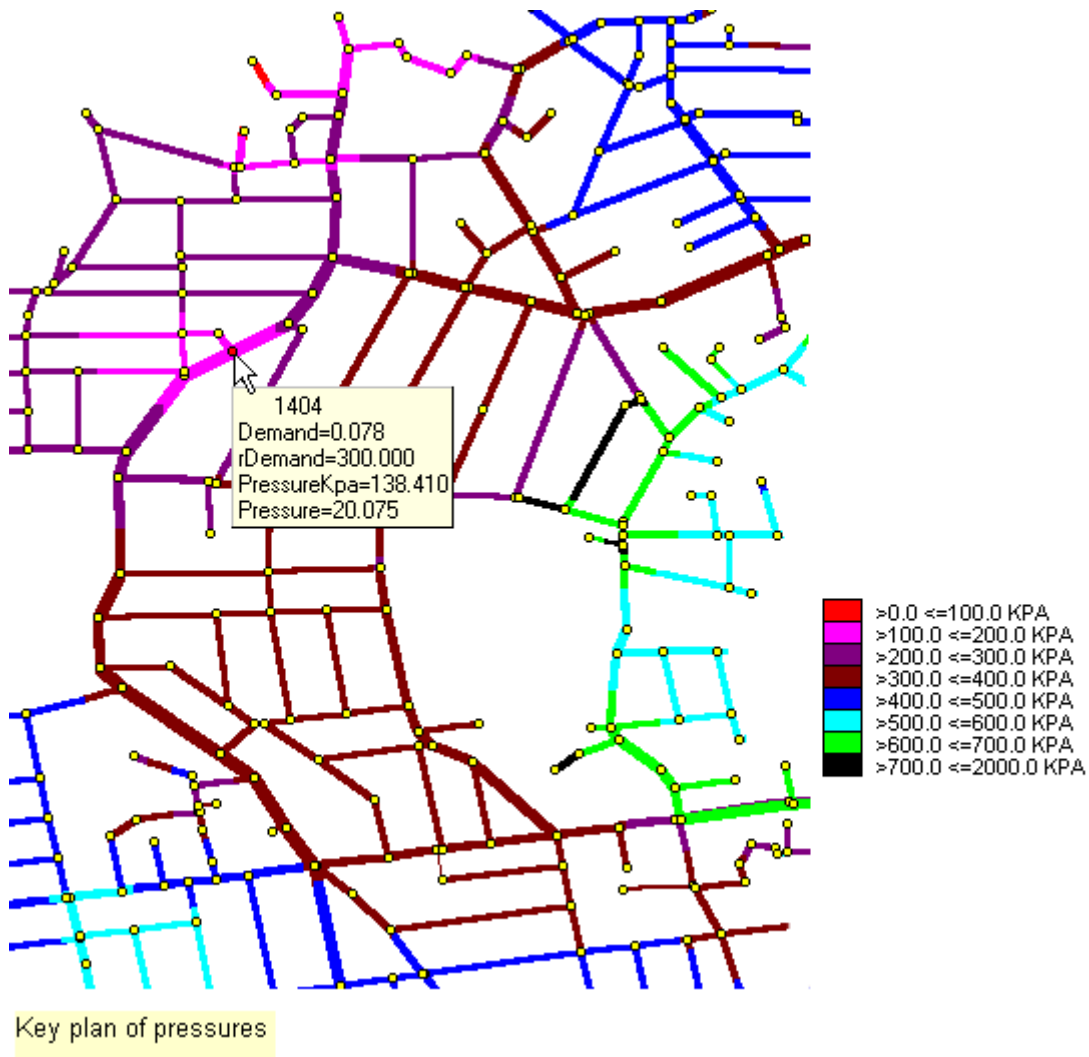


Figure 33 : WATSYS, pression dans un réseau d'adduction d'eau

Parfaitement adapté aux besoins d'une société qui gère un réseau d'adduction d'eau potable, WATSYS ne permet pas de prendre en compte les réseaux d'eaux usées, l'identification des zones inondables et les phénomènes hydrologiques.

► **BOSS HEC-RAS**

Le logiciel BOSS HEC-RAS [BOSS 05] est basé sur le modèle HEC-RAS du profil des eaux de surface utilisé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine. Ce modèle est utilisé pour modéliser l'écoulement des eaux dans des canaux et des rivières. HEC-RAS est capable de procéder à la modélisation de l'écoulement tranquille et supercritique, et écoulements mixte des profils des eaux de surface. Les autres caractéristiques du logiciel concernent l'optimisation des écoulements, la calibration automatique de la rugosité, et l'analyse sophistiquée de l'ouverture d'écluses.

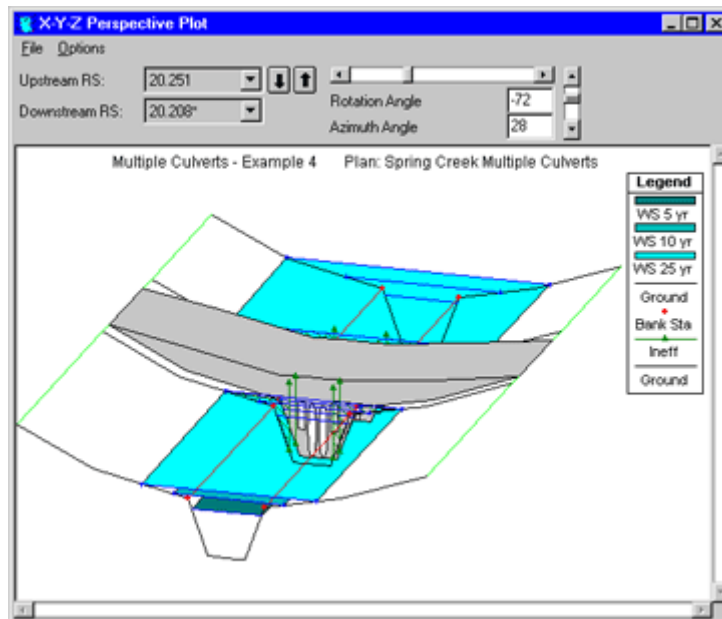


Figure 34 : Profil 3D d'une portion de rivière avec le logiciel HEC-RAS

Ce logiciel conçu et utilisé par des ingénieurs répond à un unique besoin : modéliser le régime d'écoulement dans les cours d'eau et les canaux (cf. Figure 34).

Les trois logiciels présentés, destinés aux bureaux d'études et aux services de gestion de la ressource, sont de structures modulaires. Les modules sont basés sur des modèles de phénomènes physiques qui ont fait la preuve de leur validité. Ces modèles théoriques sont adoptés par la quasi-totalité des éditeurs de logiciels d'ingénierie. Grâce à leur structure modulaire, l'utilisateur pourra acquérir des extensions supplémentaires permettant d'intégrer des phénomènes qu'il n'avait jusque alors pas pris en compte dans ses travaux.

5.2.3 Les logiciels dédiés

Nombre de programmes ont été conçus pour l'étude d'un système hydrologique particulier. Ils sont basés sur des modèles qui ont été spécialement développés pour l'étude d'une situation particulière. De ce fait ils sont difficilement réutilisables pour l'étude d'autres situations. Les travaux présentés ci-dessous témoignent de la diversité des outils développés pour répondre à aux besoins spécifiques d'une région.

- **SINUSE**

Le modèle SINUSE (simulation des interactions entre nappe et usages de l'eau) est destiné à explorer des voies de gestion de la demande sur la nappe d'eau surexploitée de Kairouan en Tunisie. L'objectif est de mettre en évidence les facteurs clés de la dynamique du système, et de tester l'efficacité de plusieurs types d'intervention, en tenant compte de leur impact social, clef de leur acceptabilité par les usagers [Feuillette 01]. Ce logiciel, basé sur un modèle hydrologique simplifié de la nappe de Kairouan, et sur la modélisation des pratiques des paysans de la région étudiée. En conséquence il n'est réutilisable pour étudier une autre situation qu'au prix de très importants travaux de remodelisation du système hydrologique et du comportement des paysans.

- ***Tualatin River water balance model (TRWB)***

Le Tualatin River Water Balance model (TRWB) a été développé dans le cadre de l'étude de l'impact de l'extension du barrage du lac Hagg, bassin de la rivière Tuala, dans l'état de l'Oregon aux USA. Cette étude [Montgomery 04] a été commandée par les autorités locales dans le but de garantir l'approvisionnement en eau jusqu'en 2050. Elle permet d'estimer l'impact des aménagements hydrauliques, et de tester diverses hypothèses sur le climat, la démographie, l'évolution de la demande et les menaces sur les écosystèmes. Ce travail est spécifique à la région étudiée, il n'est pas directement transposable pour l'étude d'autres situations.

5.2.4 Etat des lieu et critique de l'existant

Les logiciels que nous avons examinés jusqu'ici répondent aux besoins qui se sont exprimés jusqu'à aujourd'hui. Ils ont pour fonctions :

- Gestion des réseaux et des infrastructures hydrauliques.
- Calculs des débits, de crues et des risques d'inondation dans un bassin versant.
- Estimation de l'érosion et préservation des écosystèmes.
- Simulation numérique pour explorer des modèles théoriques.

Aujourd'hui encore, les équipes mobilisées autour du problème de l'eau concentrent leurs travaux quasi exclusivement sur leur seul domaine d'expertise. Les initiatives tentant d'agrèger les résultats de recherches qui vont de l'étude des phénomènes climatiques, au comportement de l'utilisateur final, sont encore rares. Cette quasi absence de travaux faisant la synthèse des avancées dans chacune des spécialisées liées à la problématique de l'eau s'explique par plusieurs facteurs : l'expertise acquise dans chacun des domaines les rend peu accessibles au non spécialiste, l'absence d'expression suffisamment forte d'un besoin d'outils prenant en compte l'intégralité du cycle de l'eau : du climat, au consommateur individuel.

Beaucoup d'organisations et d'équipes internationales sont mobilisées pour prévoir les différents scénarii possibles pour l'alimentation en eau de l'humanité. Ces études sont menées à partir d'indicateurs holistiques et sur l'exploitation de nombreuses statistiques. Les études sont conduites à différentes échelles, de la région jusqu'au continent. Elles intègrent aussi des hypothèses climatiques différentes. Ces études, pertinentes pour l'étude de vastes régions telle que le bassin méditerranéen, ne sont pas en mesure d'apporter des indications pour des échelles plus réduites. Ainsi une étude prendra comme hypothèse une baisse globale de x % des précipitations dans l'ensemble du bassin méditerranéen ; mais ne pourra pas prendre en compte que le climat évoluera avec de fortes disparités selon les régions. Par exemple une modification climatique affectera différemment la partie occidentale et la partie orientale d'une île de la méditerranée, les précipitations totales sur une île peuvent rester identiques mais leur saisonnalité et leur répartition dans l'espace peuvent changer. Ces études ne permettent pas, de par la nature des hypothèses prises en compte, fournir d'indications sur des aires géographiques restreintes.

La structure de l'économie, l'agriculture, les modes de consommation de l'eau, sont traditionnellement pris en compte en utilisant des indicateurs statistiques globaux, selon un point de vue holistique.

Peu d'études sont basées sur des modèles individus centrés et font le lien entre les différents facteurs influençant la consommation d'eau totale. Ainsi beaucoup de prévisions se basent, par exemple, sur une progression de x % du tourisme et de y % de la population locale mais prendront en compte l'influence de la croissance du tourisme sur l'évolution de la population locale. Ces études utilisent des modèles qui ne prennent pas en compte l'existence des influences mutuelles et des interactions entre tous les acteurs du système. Hors celles ci sont particulièrement fortes dans les petites sociétés insulaires.

De plus ce type d'approche globale ne permet pas de prendre en compte l'influence déterminante des comportements individuels comme l'acceptation des consignes de modération durant les sécheresses ou l'influence du voisinage.

Les inquiétudes croissantes sur l'évolution du climat et les possibles pénuries d'eau dans des régions jusque la exemptes de stress hydrique se traduisent par une nouvelle et forte impulsion donnée à la recherche sur l'eau et au développement d'outils prenant en compte l'ensemble des aspects liés à la problématique de l'eau. Aussi certains outils en cours de développement intègrent dans leurs modèles : l'évolution du climat, le système hydrologique, les réseaux d'adduction et d'assainissement, les infrastructures, l'agriculture, les plans d'occupation des sols et la politique d'urbanisme, l'évolution des écosystèmes, les mutations économiques, la démographie, l'évolution des consommateurs. Notre analyse sur l'intérêt d'une approche multi-agents pour développer de nouveaux outils d'aide à la décision rejoint celles d'autres chercheurs qui comme J. Serment proposent plus spécifiquement des architectures de "Systèmes d'Aide à la Décision Environnementale" [Serment 05].

5.2.5 Des approches partielles

Les systèmes informatiques présentés précédemment répondent à différents besoins spécifiques, mais de par leur conception, ils ne peuvent pas répondre à une approche transversale de la problématique de la gestion de l'eau. Le logiciel Watershed Modeling System 7 (WMS7) (cf. 5.2.2 Logiciels d'ingénierie) permet de calculer le ruissellement et l'état de la nappe phréatique, il n'est en revanche pas conçu pour gérer un réseau d'adduction d'eau. Le logiciel WATSYS permet de gérer un réseau d'adduction d'eau potable mais n'apporte aucun élément permettant de gérer les nappes phréatiques ou les risques d'inondations (cf. 5.2.2 Logiciels d'ingénierie). D'autre part dans ces outils la modélisation du système réel se fait selon une démarche descendante. De ce fait, dans ces logiciels, l'influence des comportements individuels sur la dynamique du système ne peut être pleinement prise en compte.

5.3 Spécification d'un nouvel outil d'aide à la décision

Après avoir examiné les outils disponibles pour assister les gestionnaires des ressources hydrologiques, présenté leurs points forts et leurs limites, nous présentons les idées directrices qui nous ont guidé dans le processus de spécification d'un nouvel outil informatique d'aide à la décision que nous développerons grâce à notre plateforme CORMGIS.

- **Une gestion intégrée**

Nous précisons d'abord notre définition du concept de la gestion de l'eau. Comme Hubert [Hubert 86], nous considérons que la gestion de l'eau *"consiste à organiser grâce à des instruments réglementaires, financiers, technologiques, l'interface entre le milieu hydrique et le milieu social de telle sorte que celle-ci soit satisfaisante, selon les exigences socialement exprimées à son endroit"*, sachant que ces exigences sont *"très diverses et souvent contradictoires"*.

Les politiques de gestion de l'eau sont très diverses, toutefois il est possible de distinguer trois grandes stratégies de gestion [Grimble 96] :

- Par l'offre, en modifiant la disponibilité de la ressource en eau grâce à des investissements structurels.
- Par la demande, en modifiant la répartition des usages ou en réduisant leur volume, et en augmentant leur efficacité, par des incitations ou des règles.
- Par des mesures combinées sur l'offre et la demande.

A la frontière des deux premières stratégies, la gestion intégrée consiste à prendre en compte toutes les possibilités d'intervention en agissant à la fois sur l'offre et la demande.

Nous avons fait le choix d'aborder le problème de la gestion de l'eau dans sa globalité en prenant en compte l'ensemble des phénomènes depuis les caractéristiques climatiques jusqu'aux habitudes des usagers. Notre outil d'aide à la décision doit permettre d'explorer les possibilités d'agir sur le système et sa dynamique en ayant à la fois des politiques de gestion de l'offre et la demande. Ce choix d'une gestion intégrée nous impose d'utiliser des modèles intégrés, ou mixtes, représentant à la fois l'offre et la demande, en détaillant les entités et les flux qui caractérisent le système [Davenport 03]. Le choix de ce type de modèles implique une approche systémique, ce qui n'est pas le cas des modèles disciplinaires qui ne prennent en compte qu'un aspect de la problématique [Feuillette 01].

L'idée principale de notre approche est de modéliser le système suivant une démarche ascendante bottom-up, individu centrée, en partant de la plus petite échelle possible. Cela doit se concrétiser par la prise en compte du comportement individuel et de la situation dans l'environnement de tous les agents. Le comportement global du système doit émerger de l'ensemble des comportements individuels. La seconde idée est la construction d'un modèle qui prend en compte l'existence de liens et d'interactions entre les différents facteurs et acteurs qui composent le système. Le modèle utilisé pour étudier le système ne doit pas être le résultat de l'addition de sous modèles qui s'ignorent mutuellement, mais bien un réseau de modélisations interactives. Enfin le troisième impératif qui nous a guidé durant la phase de modélisation est le fait que le modèle est destiné à être au coeur d'un outil d'aide à la décision développé avec CORMGIS et qu'il doit permettre d'étudier des situations réelles.

Le système informatique d'aide à la décision que nous développons en utilisant CORMGIS doit apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

1. En fonction des différents scénarii climatiques, comment évoluera le problème de l'eau dans les îles de méditerranée ?
2. Quel est l'impact prévisible des mesures envisagées par les autorités ?
3. Comment les comportements individuels influencent l'évolution du système ?

- ***Scénarii et simulations***

La nécessité de travailler sur des hypothèses tant sur les évolutions climatiques potentielles que sur les mesures prises par les gestionnaires de la ressource nous conduit à préciser les notions de scénarii qui ont été introduite au paragraphe 3.9 consacré à L'architecture SMAG.

Un scénario est un enregistrement de tous les évènements qui sont programmés pour avoir lieu au cours d'une expérimentation. Un scénario constitue une source extérieure de contrôle du système et chaque évènement va provoquer des changements dans le système. Les scénarii permettent de prendre en compte chacune des hypothèses et des options que souhaitent prendre en compte les décideurs. La plateforme CORMGIS propose de fonctionnalités permettant de définir, suivre des scénarii et des plans d'expériences (cf. 4.3.2 Implémentation du module SMA de CORMGIS). Au cours d'une expérimentation le scénario suivi peut prévoir des évènements tels que :

- Une élévation de la température moyenne.
- Un orage circonscrit à une vallée.
- Un incendie modifiant les caractéristiques hydrologiques du sol.
- La mise en service de nouvelles infrastructures: barrages, réservoirs, forages....
- La création d'établissements voués au tourisme.
- L'installation de nouvelles populations.
- La modification du prix de l'eau.

Les scénarii assurent la possibilité de reproduire et d'analyser les expérimentations.

Une expérimentation est pilotée par trois scénarii :

- Un scénario contrôlant le climat.
- Un scénario contrôlant les caractéristiques de l'environnement.
- Un scénario contrôlant les agents présents dans l'expérience.

Pour pouvoir analyser une expérimentation, tous les évènements, qu'ils proviennent de l'extérieur ou du système lui-même (un hôtel décide de s'agrandir) sont enregistrés par les le module "*gestion des extrants*" de la plateforme CORMGIS (cf. 4.3.2 Implémentation du module SMA de CORMGIS).

- ***Un modèle individus centrés***

L'outil d'aide à la décision que nous développons en utilisant notre plateforme CORMGIS est en mesure de permettre d'estimer l'impact des comportements individuels sur l'évolution du système. Le modèle multi-agents utilisé par ce système informatique d'aide à la décision est du type individus centrés où le comportement global émerge de l'ensemble des comportements individuels.

En plus des modèles de toutes les parties prenantes "anthropiques" du système, le modèle multi-agents comprend des modèles du climat, de l'écosystème et du système hydrologique.

- ***Intégration des données géographiques***

Grâce au module SIG de CORMGIS, le système informatique d'aide à la décision que nous développons s'initialise en utilisant des bases de données qui décrivent précisément le système étudié : topographie, sols, habitats, couvert végétal, agriculture, industrie, secteur touristique, réseau hydrographique et réseaux d'adduction d'eau (cf. 3.2 Avantages d'une approche hybride SMA - SIG). Ces données sont compilées dans de vastes systèmes d'informations géographiques qui sont utilisés aussi bien par les gouvernements, les autorités locales que les sociétés concessionnaires des réseaux d'adduction et d'assainissement. Les résultats obtenus pendant les expérimentations sont normalement gérés par le module fonctionnel "*Gestion des Extrants*" de la plateforme CORMGIS pour faire ensuite l'objet d'analyses.

- ***Conduite des expérimentations***

Grâce aux deux modes de contrôle des expérimentations ("*Analyse*" et "*RoleGame*", cf. 4.3.4 Aide à la décision avec CORMGIS) implémentés par CORMGIS, le système informatique d'aide à la décision que nous développons à partir de CORMGIS permet aux "décideurs – expérimentateurs" de tester de nombreux scénarii en réalisant des milliers de simulations et d'être en mesure d'intervenir au cours de certaines simulations comme dans un jeu de rôles.

L'outil que nous développons donc dispose de deux modes de pilotage des simulations. Dans le premier mode le décideur - expérimentateur est en mesure d'intervenir sur tous les aspects et tous les paramètres du système et des entités modélisées : climat, consommateur, gestionnaire de la ressources, foyers, hôteliers... Dans le second mode de fonctionnement, le décideur - expérimentateur programme le scénario à répéter et l'ensemble des plages de valeurs pour les paramètres étudiés durant ces simulations. Une fois les paramètres de la série de simulations définis, le décideur - expérimentateur déclenche l'exécution de l'ensemble des simulations prévues. Les résultats obtenus sont ajoutés aux bases de données par les systèmes de stockage des données.

5.4 Apports d'une approche SMA-SIG pour la gestion de l'eau

5.4.1 Pertinence d'une approche multi-agents

La grande majorité des modèles utilisés par les logiciels qui prennent en compte les activités humaines reposent sur des statistiques globales qui noient l'influence de chacun des agents. Ainsi, par exemple, les études menées à l'échelle d'un bassin versant permettront d'estimer la hausse globale de la consommation d'eau due à une hausse de un degré de la température sans que ne soient calculé individuellement la hausse due à chacun des consommateurs.

Le choix d'une approche multi-agents s'avère adapté à l'étude de l'influence de chacune des parties prenantes dans la gestion de l'eau. En effet dans une approche multi-agents, bottom-up, le comportement global du système émerge de l'ensemble des comportements individuels et des interactions entre les agents.

De plus, les différents acteurs composant le système possèdent chacun leur logique comportementale qui s'explique par l'existence de buts propres. Ainsi, par exemple, les hôteliers sont guidés par des critères économiques, ils ne prennent en compte l'évolution des ressources en eau que sur la période où ils prévoient de rentabiliser leurs investissements. La perspective d'un tarissement de la ressource à un horizon plus lointain ne les concerne pas dans leur logique d'investissement à court terme.

En revanche les habitants seront sensibles à une surexploitation de la ressource qui n'assurerait pas la pérennité de leur communauté au delà d'un horizon de vingt ans.

Les exigences d'un hôtelier et d'un foyer sont également différentes en matière de disponibilité de la ressource. Un foyer pourra plus facilement réduire sa consommation durant une période de sécheresse estivale qu'un hôtel qui doit impérativement exécuter certaines tâches liées à son activité (ménage quotidien dans toutes les chambres, lingerie, cuisine, piscine...). Un hôtel ne peut, sous peine de voir son activité décliner, imposer de restrictions à des vacanciers insouciant qui ont payé leur séjour. Cet exemple illustre la différence de points de vues et d'objectifs de deux des acteurs du système. L'approche multi-agents permet de prendre en compte l'hétérogénéité de parties prenantes qui ont des objectifs différents ou incompatibles.

L'autonomie de comportement dont font preuve les acteurs du système est précisément une caractéristique des agents qui est absente dans une approche orientée objet. Toutes les parties prenantes peuvent être une source de contrôle du système, le contrôle est décentralisé et distribué. Cette caractéristique est un élément spécifique des modèles multi-agents qui les différencie des modèles orientés objets où la source de contrôle est unique et centralisée (cf. 2.3.9 Agent ou objet ?).

En abordant le système réel selon une approche multi-agents, les phénomènes sont "individualisés" et encapsulés au sein d'entités autonomes. Cette encapsulation permet de prendre facilement en compte des phénomènes, des connaissances et des modèles issus de domaines scientifiques différents qu'il serait plus difficile d'intégrer au sein d'un modèle

centralisé. Ce type de modèle individus centrés reste ouvert et permet de compléter et d'affiner le modèle en agrégeant de nouveaux éléments.

Les systèmes multi-agents sont de plus en plus utilisés pour modélisation et la simulation d'écosystèmes complexes. F. Bousquet et C. Le Page [Bousquet 04] ont précisé les avantages et les utilisations possibles de ce type d'approche dans le cadre de l'étude de systèmes environnementaux.

5.4.2 De l'utilité d'un SIG pour l'étude de cas réels

L'utilisation d'un SIG permet l'initialisation du simulateur à partir d'un cas réel alors que dans la plupart des cas les simulations sont réalisées dans un monde purement virtuel. Le SIG permet de localiser dans l'espace : l'implantation de la population (villes, villages, habitat isolé...), les activités humaines (industrie, agriculture, tourisme...), l'occupation du sol (types de cultures, végétation, bâti...), les infrastructures (routes, barrages, captages, forages, stations d'épuration ...), l'environnement (zone humides, espaces remarquables, faune, flore), l'ensemble des caractéristiques géologiques et hydrographiques des bassins (nature des sols, nappes, rivières, lacs...).

Grâce au SIG il est possible de lier développement économique, activités humaines, démographie, occupation du territoire, et hydrographie. À titre d'exemple, le déboisement accélère le ruissellement et modifie le régime des rivières.

L'utilisation du SIG permet aux décideurs de mieux impliquer les acteurs de terrain lors de la phase d'étude et de mieux expliquer et faire comprendre les choix effectués. En effet les expérimentations n'ont pas été faites à partir d'un monde virtuel et abstrait mais de données collectées dans la zone concernée par le problème. Grâce au SIG, les résultats obtenus par simulation peuvent être confirmés par des observations sur le terrain, ce qui permet de valider la justesse des modèles utilisés (cf. 3.2 Avantages d'une approche hybride SMA - SIG).

5.5 Présentation du système insulaire

La description exhaustive de l'ensemble des phénomènes participant à la problématique de la gestion de l'eau est impossible tant est grande l'importance de cet élément sur terre. Nous limitons notre présentation aux principaux acteurs et phénomènes liés à cette problématique.

Le cycle de l'eau

Le premier élément que nous présentons est le cycle naturel de l'eau : l'eau de mer s'évapore, forme des nuages qui donnent des précipitations au dessus des terres et des océans. Une fois parvenue au sol, une partie de l'eau ruisselle, tandis que l'autre partie s'infiltré dans le sol pour alimenter les nappes phréatiques. L'eau peut être stockée pour un temps sous forme de neige ou de glace. Finalement l'eau s'écoule jusqu'à la mer et réalimente le cycle. L'homme et les végétaux ont une grande influence sur ce cycle. Les racines des végétaux pompent l'eau du sol, et en relâchent une partie dans l'atmosphère par évapotranspiration. De plus, une partie de l'eau est retenue par les plantes. La déforestation modifie le cycle de l'eau et augmente la

fréquence et l'ampleur des inondations. L'homme agit sur le cycle en prélevant d'immenses quantités d'eau et en exploitant une grande partie des terre émergées pour ses besoins.

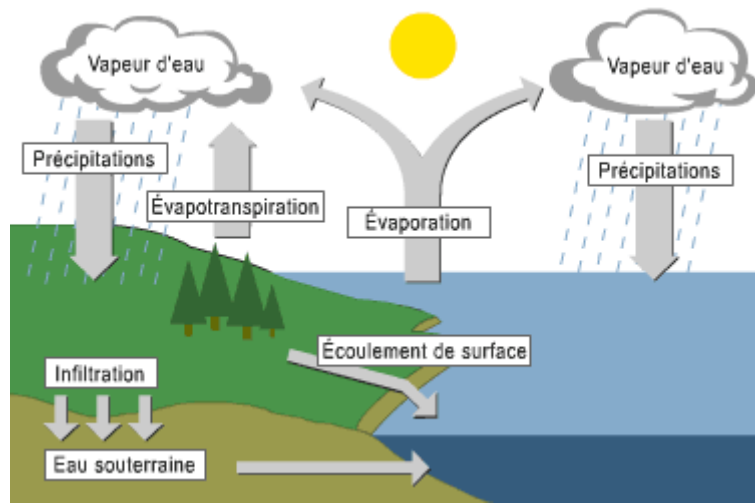


Figure 35 : Modèle simplifié du cycle de l'eau

La Figure 35 illustre le cycle naturel de l'eau sur la Terre, sans intervention anthropique.

L'influence anthropique

Aujourd'hui, de part l'importance de ses activités, l'homme influence fortement la dynamique cycle naturel de l'eau en contrôlant directement ou indirectement deux éléments clefs :

- Les captages, l'agriculture, la déforestation, l'extension des villes modifient les caractéristiques des sols. Les conséquences sont une moindre recharge des nappes souterraines, plus de ruissellements et une augmentation du phénomène de l'érosion. Les activités anthropiques ont déjà radicalement modifié le cycle naturel dans de nombreuses régions du monde, nous citerons :
 - L'assèchement de la mer d'Aral.
 - Les inondations et glissements de terrain à cause de la déforestation en Asie.
 - Les pertes de terres arables en Afrique et aux USA.
- Les sociétés industrialisées rejettent toujours plus de gaz et d'aérosols dans l'atmosphère qui sont à l'origine des changements climatiques. La modification du régime des précipitations induite perturbe inévitablement le cycle de l'eau.

L'économie de l'eau

L'eau qui a toujours été indispensable à la vie est devenue dans le monde moderne une ressource critique. En plus des usages traditionnels, l'eau est devenue indispensable dans les secteurs vitaux que sont l'agriculture et l'énergie. L'approvisionnement en eau de nos sociétés est devenu le centre d'une économie marchande en forte croissance. Des acteurs privés se chargent de l'approvisionnement, du traitement, de la distribution et de la dépollution. L'eau qui a perdu son statut traditionnel de bien commun, est devenue une marchandise soumise aux lois du marché et est l'objet d'un commerce intense. L'eau qui autrefois était gratuite et d'un accès libre est devenue privée et d'un accès payant. Le pouvoir politique qui a souvent délégué la gestion technique du secteur, conserve toutefois toujours le contrôle du système et assume la fonction d'arbitre en cas de conflits.

La problématique

Les besoins en eau de humanité vont sans cesse en augmentant du fait de la croissance de la population et de la hausse de la demande par habitant. Face à une offre qui reste limitée, cette croissance de la demande provoque de plus en plus de conflits qui imposent de faire des choix politiques.

Les décideurs doivent faire face à un nombre toujours plus grand contraintes et de conflits. Nous présentons les principales contraintes de cette problématique :

- La consommation augmente tandis que les ressources restent stables.
- L'économie moderne suppose un approvisionnement sans coupures.
- La construction de nouvelles infrastructures se heurte aux règles de protection des espaces naturels et à une opinion publique très vigilante.
- La surexploitation des ressources provoque la destruction de nombreux écosystèmes et met en danger l'existence à long terme de certaines communautés.
- La pollution et le partage de la ressource sont à l'origine de la multiplication des conflits entre amont, aval, industriels, agriculteurs et citoyens.
- L'extension des villes, les pratiques agricoles, la déforestation, la construction de grands ouvrages et le développement des réseaux de voies de communications entraînent des modifications des propriétés hydrographiques des bassins versants.

Plus que de mesures techniques, la gestion de l'eau relève de choix politiques qui déterminent la viabilité du système à long terme. Ainsi, par exemple, les choix de politique agricoles qui modifient notablement le volume de la demande ont une grande influence sur la structure de l'économie et sur les écosystèmes (modification des sols, pollutions, nitrates, etc.). De même, l'établissement de réglementations pour l'usage de l'eau, relevant du domaine politique, a une grande influence sur les prix et par conséquent sur la demande.

Pour faire face à la complexité du problème de la gestion intégrée de l'eau les décideurs sont à la recherche d'outils d'aide à la décision qui leur permettent d'estimer les conséquences des mesures qu'ils envisagent de promouvoir.

Les spécificités insulaires

Le problème de la gestion de l'eau dans les îles de méditerranée revêt plusieurs spécificités que nous présentons ici :

- Les îles sont dépourvues de grandes nappes d'eau souterraines qui leur permettraient de faire face à des épisodes aigus de sécheresse.
- En cas de surexploitation des ressources, les îles sont confrontées à des intrusions salines provenant de la mer qui ruinent pour longtemps les ressources surexploitées.
- Les îles sont souvent éloignées du continent ce qui les empêche de faire face durablement à de pénuries en important de l'eau d'ailleurs.
- Le petit nombre des acteurs présents sur une île se traduit par une société où les liens et les interactions entre tous les acteurs sont très forts.
- De part la faiblesse de leur population et leur isolement, les sociétés insulaires sont plus sensibles que ne le sont les régions continentales à la fois plus peuplées et moins isolées qui peuvent de ce fait mieux amortir certaines décisions politiques.
- Dans les îles la demande ne sera bientôt plus le fait que des foyers et du secteur touristique. En effet, dans ces territoires, l'industrie est quasi inexistante, et l'agriculture qui périclète est abandonnée au profit du tourisme.

L'étude du problème spécifique de la gestion de l'eau dans les îles, qui constituent un modèle réduit de notre planète, permettra de tirer des enseignements utiles pour régler le problème de l'eau à l'échelle planétaire.

5.6 Etude du Cap Corse

Afin de valider notre plateforme, nous avons choisi d'étudier une région particulière de la Corse : le Cap Corse. Cette région appartient à une île où la quantité d'eau disponible par an et par habitant est supérieure à 10 000 m³ [Margat 02] et où les coupures sont fréquentes pendant l'été qui est la saison sèche. En utilisant notre plateforme CORMGIS nous développons un système informatique d'aide à la décision que nous utilisons pour explorer l'importance de certains facteurs culturels et chercher quelle serait la politique de contrôle la plus efficace et la mieux tolérée pour éviter les coupures d'eau estivales.

5.6.1 Modélisation du système

Nous développons un modèle multi-agents du système adapté à la problématique insulaire. Ce modèle, que nous avons baptisé **HydroValleA**, est une représentation simplifiée de la réalité qui nous permet de faire une démonstration des possibilités offerte par la plateforme CORMGIS. Le modèle que nous présentons maintenant servira de base à de futures recherches qui seront menées en collaboration avec des experts, des économistes, des hydrologues, des sociologues, des gestionnaires d'infrastructures, des écologistes, des responsables politiques pour le compléter et l'affiner.

Choix du pas de temps

En méditerranée les précipitations se composent d'épisodes très intenses qui durent de quelques heures à quelques jours. Cette caractéristique différencie le climat méditerranéen des climats continentaux et océaniques où les pluies sont très régulières. Pour prendre en compte la brièveté et l'intensité des précipitations en méditerranée nous avons choisi comme unité de temps une journée. Un pas de temps plus grand aurait masqué l'effet de ces épisodes.

Modélisation de l'environnement

L'environnement du modèle multi-agents que développons avec notre plateforme CORMGIS est un environnement décentralisé (cf. 4.3.2 Implémentation du module SMA de CORMGIS). L'espace est représenté par une grille. Chaque portion de l'espace est représentée par une instance de la classe *Parcelle* qui est un agent réactif, situé, implémenté en dérivant la classe *SpatialEntityElement*. Le comportement de l'agent *Parcelle* simule le comportement hydrologique d'une portion de la grille en utilisant la loi de Darcy, la hauteur du niveau piézométrique et la conductivité hydraulique du sol. A chaque cellule est associé un agent réactif qui simule le couvert en prenant en compte l'évaporation et le ruissellement. Les différents couverts sont modélisés en utilisant les classes *Bâti*, *Maquis Haut*, *Prairie*, *Forêt*, *Eau*, *Sable*, *Rocher* dérivées de la classe *Couvert* qui dérive elle même de la classe *PassiveObject* fournie par CORMGIS (cf. diagramme UML de la Figure 37).

Modélisation du climat

Notre modèle intègre un agent réactif climatique (classe *Climat* dérivée de la classe *PassiveObject* fournie par CORMGIS) qui contrôle le climat régnant sur chacune des parcelles (température et précipitations) en fonction de l'altitude, du jour de l'année et des caractéristiques du climat. Le modèle climatique utilise des approximations linéaires pour lier les températures et les précipitations à l'altitude.

Modélisation de l'influence anthropique

Dans notre modèle **HydroValleA** du système, nous choisissons de simplifier le réseau d'adduction d'eau en ne prenant en compte que trois types d'agents *Forage*, *Citerne*, *WaterCompany*. Ces trois agents ont des comportements hybrides et une architecture interne de type InteRRaP (cf. 2.3.8.3.2 Architecture hybride InteRRaP).

- Les agents situés de type *Forage* alimentent le réseau tant que le niveau piézométrique est suffisamment élevé. Un agent situé *Forage* alimente un seul agent *Citerne*, sa capacité quotidienne de pompage est limitée. La classe *Forage* dérive de la classe *SMAGAgent* qui est fournie par la plateforme CORMGIS.
- Les agents situés *Citerne* stockent l'eau provenant de ses forages avant de la distribuer à leurs abonnés. Une *Citerne* est alimentée par ses forages et alimente ses abonnés jusqu'à ce qu'elle soit vide. La classe *Citerne* dérive de la classe *SMAGAgent* qui est fournie par la plateforme CORMGIS.
- Chaque agent communicant non situé de type *WaterCompany* gère plusieurs *Citerne*s. Ces agents disposent de la possibilité d'émettre des consignes de restriction en cas de risque de rupture d'alimentation et de pouvoir de police de l'eau. Ces agents permettent de simuler le rôle de la puissance publique ou d'une entreprise de distribution des eaux à but lucratif. Le comportement des agents de ce type est spécifié dans chacune des expériences que nous allons présenter. La classe *WaterCompany* dérive de la classe *AgentComm* qui est fournie par la plateforme CORMGIS.

Nous considérons que dans les régions que nous souhaitons étudier la consommation d'eau est principalement le fait de l'industrie touristique et des foyers. Nous avons donc dans notre modèle multi-agents que deux types d'agents consommateurs :

- Les agents situés de type *Foyer* sont toujours présents dans le système, ils représentent la population autochtone. Leur consommation d'eau dépend du nombre de personnes présentes, du prix de l'eau, du jour dans l'année, et de la température. La classe *Foyer* dérive de la classe *Consommateur* qui dérive elle-même de la classe *SMAGAgent* qui est fournie par CORMGIS (cf. diagramme UML de la Figure 37).
- Les infrastructures touristiques absorbent de grande quantité d'eau pendant les saisons estivales. Ces infrastructures sont représentées dans notre modèle par des agents situés de type *Hôtel*. Leur consommation dépend de leur standing, de leur nombre de chambre, du jour de l'année, et de la température. La classe *Hôtel* dérive de la classe *Consommateur* qui dérive elle-même de la classe *SMAGAgent* qui est fournie par CORMGIS (cf. diagramme UML de la Figure 37).

L'implémentation du modèle **HydroValleA** et des agents s'est faite à partir des classes fournies par la plateforme CORMGIS. La Figure 36 et la Figure 37 présentent les principaux diagrammes de classes UML du modèle développé à partir de CORMGIS.

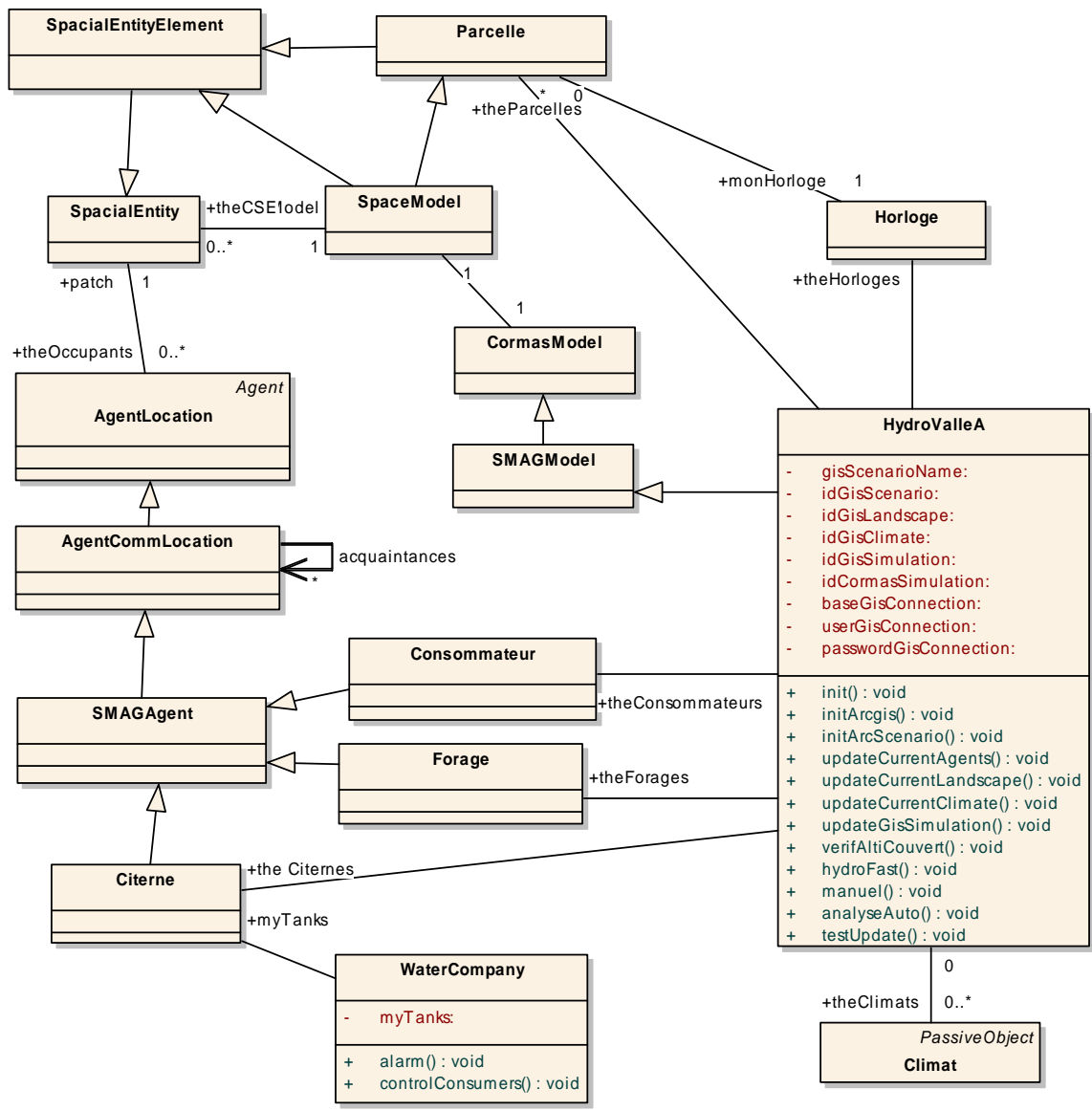


Figure 36 : Diagramme de classe UML du SIAD

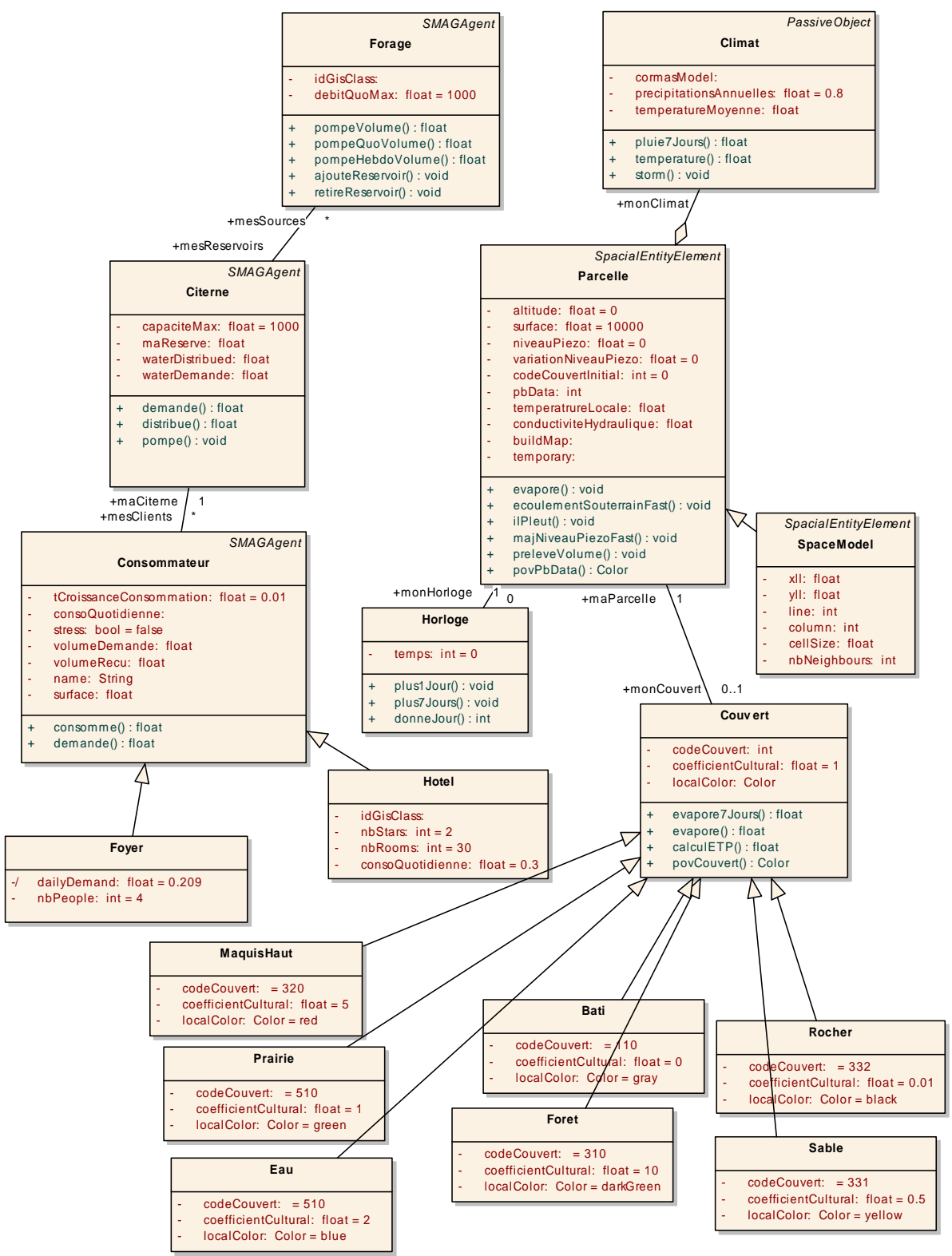


Figure 37 : Diagramme de classe UML du modèle du système insulaire

A titre d'exemple, nous présentons dans l'encadré ci dessous le codage en SmallTalk de la méthode *évapore* de la classe *Parcelle* qui modélise l'impact sur le niveau piézométrique des phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration. Le niveau piézométrique d'un agent *Parcelle* baisse à cause de la transpiration de son *Couvert*.

```

evapore
| t |
self monCouvert isNil
  ifFalse:
    [t := self monCouvert evapore.
     self niveauPiezo: self niveauPiezo - t.
     self niveauPiezo < 0 ifTrue: [self niveauPiezo: 0]]

```

Nous avons développé le modèle **HydroValleA** pour que l'initialisation des simulations se fasse en utilisant les données géographiques contenues dans le SIG suivantes : les foyers, les hôtels, les forages, les citernes, le réseau d'adduction, la topographie et nature du couvert.

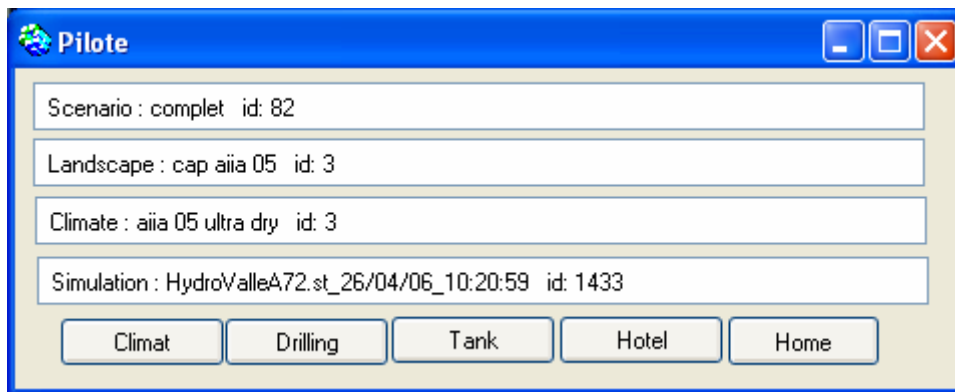


Figure 38 : Fenêtre de contrôle des agents

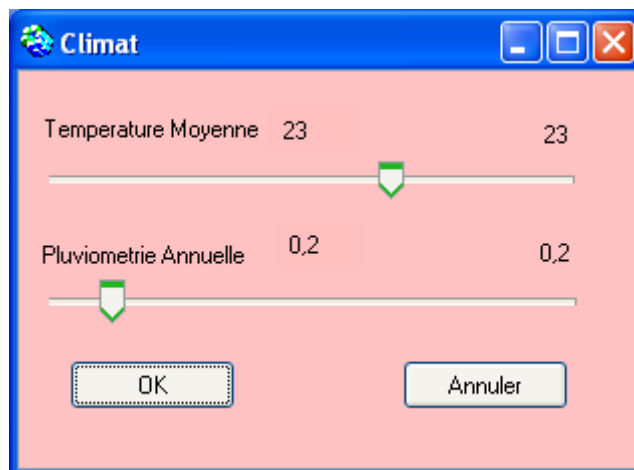


Figure 39 : Interface de contrôle du climat

A partir du module générique CORMGIS de pilotage des simulations, nous avons développé des interfaces graphiques spécifiquement adaptées au modèle HydroValleA, (cf. Figure 38 & Figure 39) qui permettent de contrôler le climat, d'ajouter et de retirer de hôtels et des foyers et de modifier le réseau d'adduction d'eau en ayant la possibilité d'ajouter des

citernes et des forages. Grâce à ces interfaces le décideur expérimentateur peut se plonger dans un jeu de rôles et tester ses stratégies.

La conduite des simulations à partir d'un scénario se fait en utilisant directement le module dédié de CORMGIS, les événements pris en compte dans les scénarii sont les suivants : ajout/suppression d'agents foyer/hôtel/forage/citerne, épisodes climatiques orage/température/pluviométrie, modification du couvert (incendie, mise en culture). La structure de la base de données géographiques utilisée pour étudier le Cap Corse qui prend en compte les agents, les événements, les scénarii et les simulations est disponible en annexe.

L'enregistrement des simulations et des données pertinentes pour le décideur se fait en utilisant directement les fonctionnalités du module "*Gestion des Extrants*" de la plateforme CORMGIS.

5.6.2 Expérimentations dans le Cap Corse

Nous étudions la situation de la région du Cap Corse avec le modèle **HydroValleA**. Nous présentons ici deux expériences où le comportement individuel et la situation des agents sont les éléments clefs de la dynamique du système.

La première étude met en évidence l'importance du civisme des parties prenantes dans la gestion des périodes de sécheresse. La seconde étude permet aux décideurs de choisir la meilleure politique de contrôle des usagers dans le cadre de la prévention des coupures d'eau.

Nous menons les deux expériences sur le même territoire, le Cap Corse. Nous utilisons les bases de données géographiques acquises par l'Université de Corse pour initialiser nos simulations. La zone de 32 km x 16 km est modélisée par une grille 64 x 32 où chaque cellule représente une parcelle de 500 m x 500 m. Notre base de données recense l'existence de 33 forages, 12 citernes, 1 organisme gestionnaire de l'eau, et 534 agents consommateurs (ménages et hôtels).

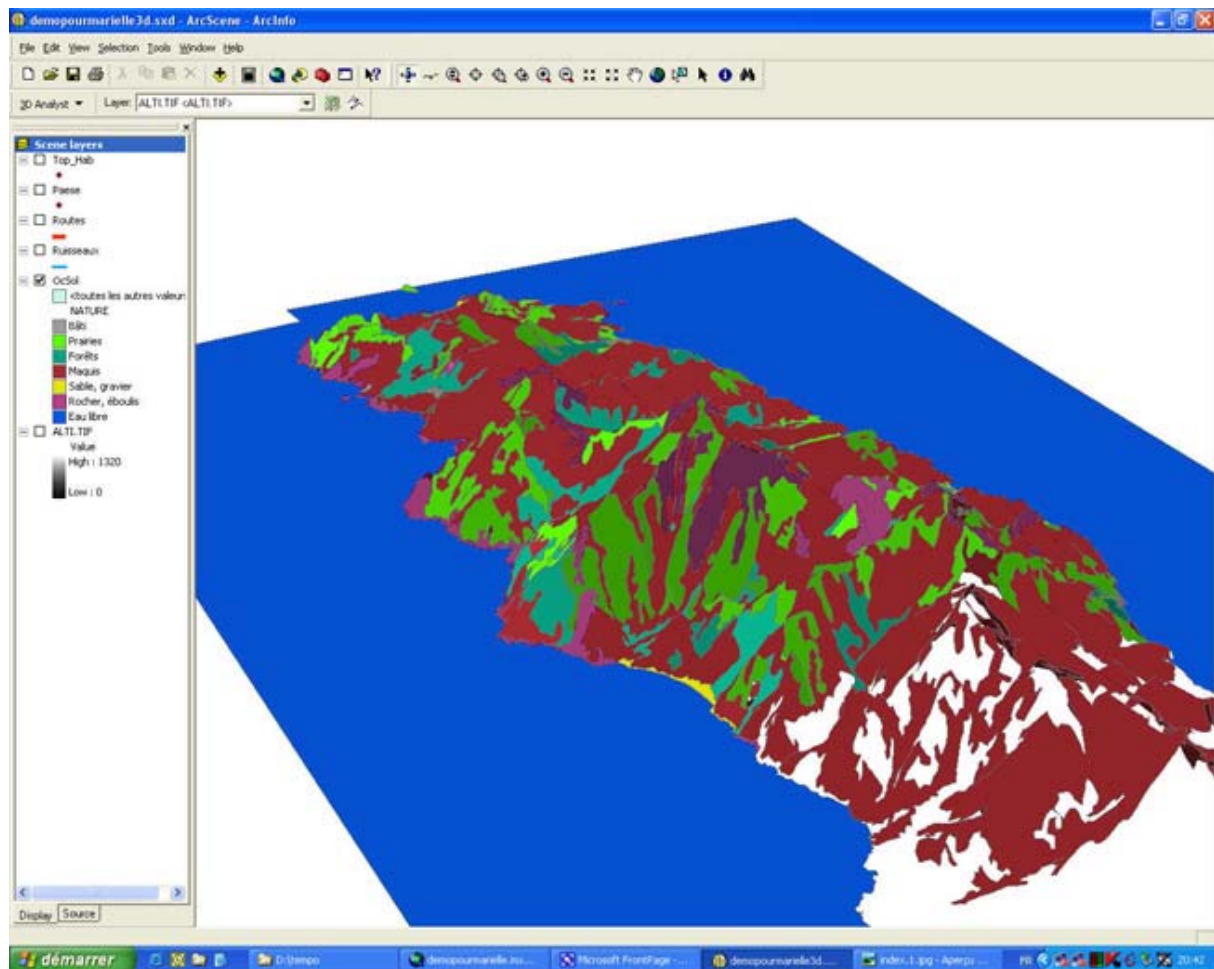


Figure 40 : Vue relief du Cap Corse - Altitude & Couvert

La Figure 40 présente une vue en trois dimensions du couvert capcorsin. Cette vue est générée à partir des données topographiques et des relevés du couvert effectués sur le terrain grâce au logiciel ArcGIS qui constitue la base du module SIG de notre plateforme CORMGIS. Le couvert et l'altitude sont deux éléments clefs de notre modèle hydrologique qui conditionnent le taux de ruissellement, la température, l'évaporation et l'abondance des précipitations.

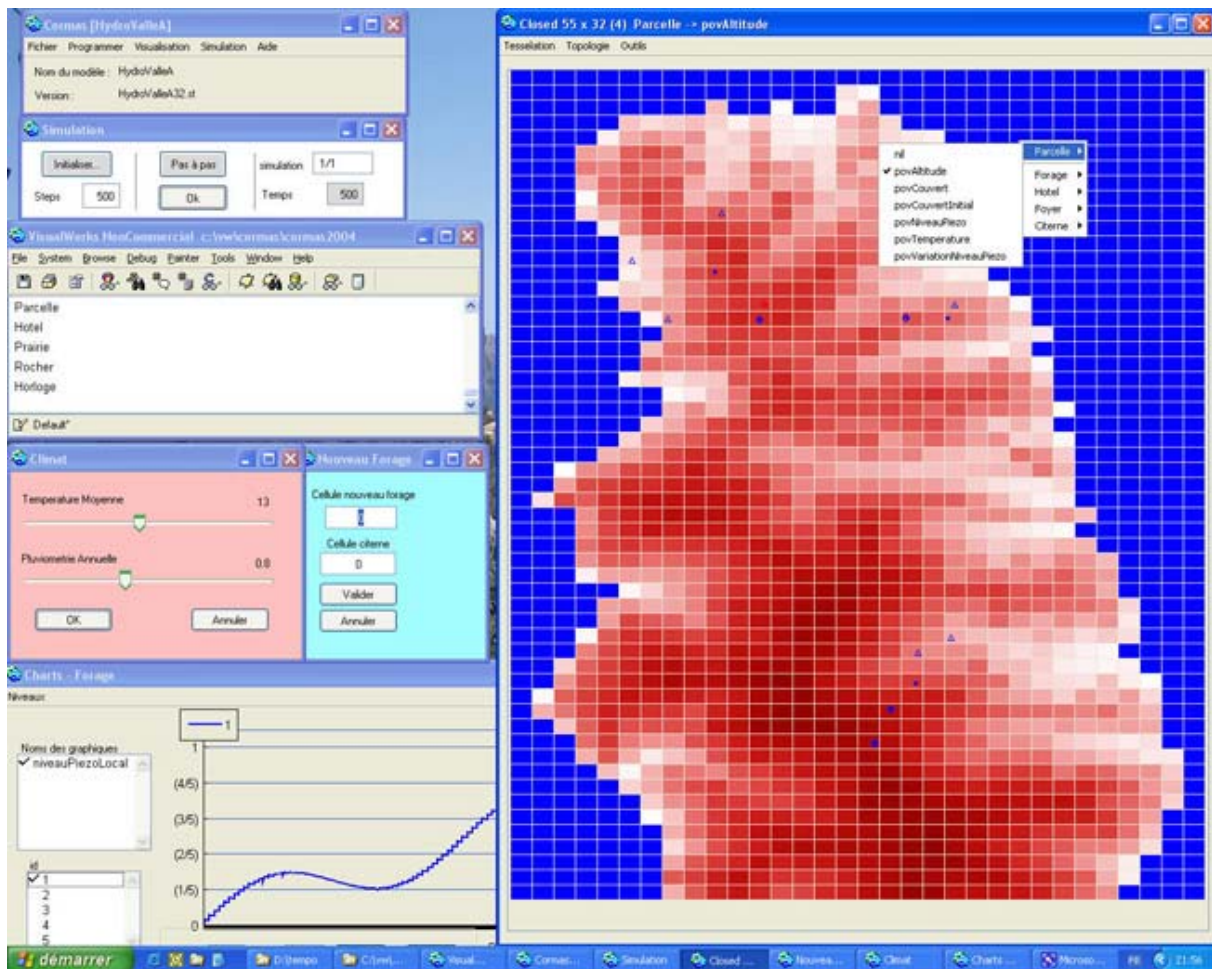


Figure 41 : Interfaces graphiques du logiciel d'aide à la décision

La Figure 41 présente les interfaces graphiques de l'outil d'aide à la décision que nous développons à partir de la plateforme CORMGIS pour étudier la gestion de l'eau. Les fenêtres présentées correspondent aux interfaces graphiques qui permettent de contrôler les simulations dans le mode "jeu de rôle". Ces interfaces graphiques permettent de :

- Contrôler le climat.
- Ajouter/supprimer des agents.
- Contrôler l'avancement du temps.
- Contrôler en temps réel les paramètres de simulation.
- Contrôler et visualiser l'environnement.
- Modifier les modèles des agents et de l'environnement.

Les deux études que nous présentons utilisent les mêmes données géographiques, le même modèle de l'environnement, le même scénario et le même modèle climatique. Les seules différences concernent les modèles comportementaux des agents consommateurs et du gestionnaire de la ressource.

5.6.3 Solidarité et coupures d'eau

L'étude que nous présentons maintenant souligne l'influence de la pression sociale sur les changements de comportement durant les périodes de sécheresse. Cette expérimentation sur le Cap Corse est basée sur les hypothèses comportementales suivantes :

- Les agents consommateurs (*Foyer et Hôtel*) ont un accès à l'eau dont la priorité dépend de leur altitude. Plus l'altitude est basse, plus grande est la priorité. Les agents situés à une altitude supérieure ne sont alimentés qu'une fois que ceux situés plus bas ont prélevé toute l'eau qu'ils souhaitaient. Ce modèle correspond bien à la réalité où la distribution de l'eau est influencée par la gravité. Les parties basses sont alimentées en premier tandis que les autres situées plus haut doivent attendre que l'eau "monte". C'est ce mode de distribution de l'eau qui est implanté dans le modèle comportemental des agents *Citernes* qui alimentent les consommateurs.
- Les agents consommateurs ont deux modes de consommation différents. Dans le premier mode, que nous qualifierons d'"*insouciant*", ils utilisent autant d'eau qu'ils le désirent. Dans le second mode, que nous qualifierons d'"*économe*", ils réduisent leur consommation de 80%. Les agents changent de mode de consommation en fonction du comportement de leurs voisins et de leur exposition aux coupures d'eau. Lorsque l'eau est abondante, tous les agents adoptent un comportement "*insouciant*". Lorsque l'eau se fait rare, les agents situés en amont ne reçoivent plus suffisamment d'eau et deviennent "*économes*". Si les agents situés en aval ne changent pas aussi de comportement, les agents situés sur les hauteurs ne reçoivent plus du tout d'eau. D'après le modèle de Schelling [Schelling 80] les agents, qui ne sont pas soumis à des coupures, encore "*insouciant*", sont soumis à la pression sociale des "*économes*". Les agents "*insouciant*" changent de comportement lorsque dans leur voisinage le pourcentage d'agents "*économes*" dépasse un certain seuil.
- Lorsqu'en fin de journée le niveau de la réserve d'un agent *Citerne* atteint une certaine limite basse, l'agent *Citerne* émet un bulletin d'alerte à destination de tous ses abonnés pour leur demander d'adopter un comportement "*économe*". Dans un premier temps seuls les agents touchés par les coupures d'eau deviennent "*économe*", puis ce comportement se propage de proche en proche selon la dynamique décrite par Schelling. Lorsque la *Citerne* a reconstitué son stock, elle émet un second avis et les agents reprennent leur attitude "*insouciant*".

Afin d'apprécier l'influence de la valeur du seuil au delà duquel les agents "*insouciant*" deviennent "*économes*" sous la pression de leur voisins, nous avons programmé notre outil d'aide à la décision de façon à ce qu'il réalise des simulations du système en utilisant toujours le même scénario et en faisant varier la valeur du seuil de changement de comportement de 0 à 100% avec un pas de 2%. Pour souligner l'importance de la valeur du seuil, les simulations qui s'étalent sur 2000 jours utilisent un climat particulièrement sec.

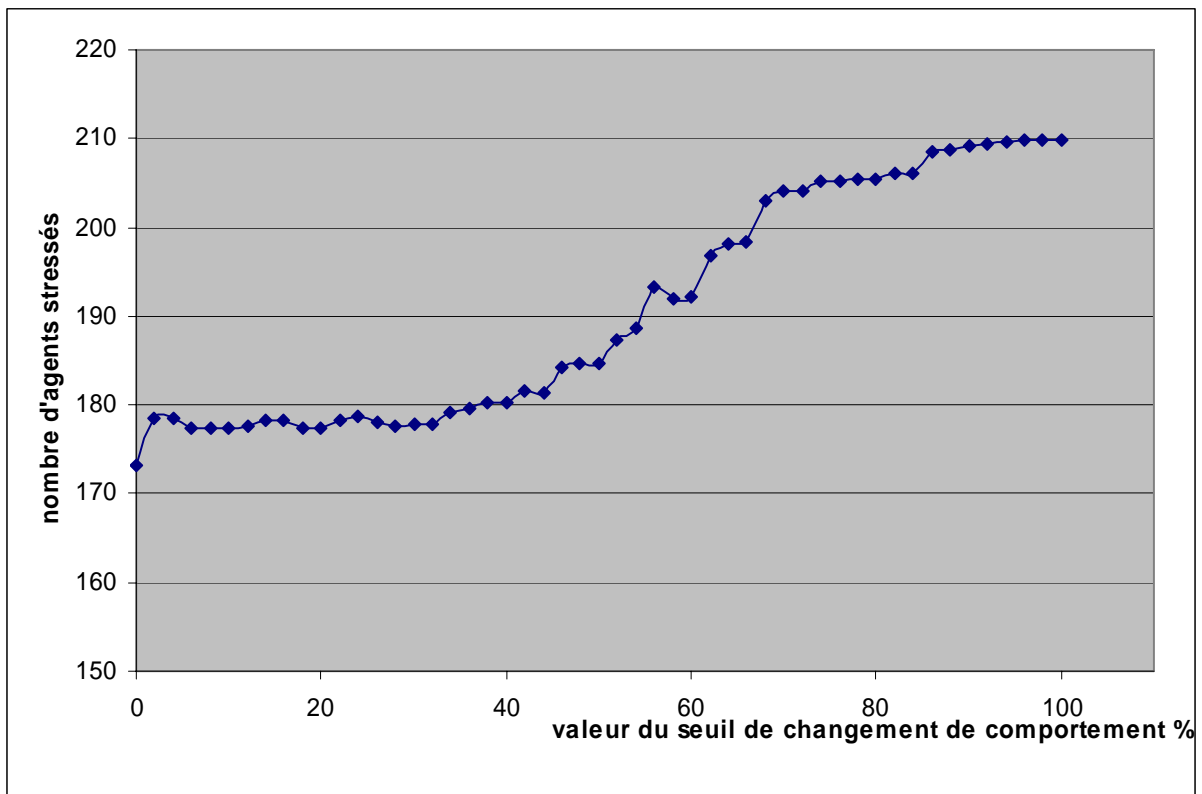


Figure 42 : Nombre d'agents stressés vs valeur du seuil de changement de comportement

La Figure 42 présente le nombre d'agents recevant moins d'eau que leur besoin (les agents sont dits stressés) en fonction du seuil à partir duquel les agents "insouciants" deviennent "économes" sous la pression de leur voisinage. Lorsque le seuil vaut zéro il suffit qu'un seul agent devienne économe pour que tous ses voisins l'imitent, la demande globale diminue donc et le nombre d'agents stressés est faible. Ce nombre n'est pas nul car il existe des agents qui ne sont pas géographiquement en contact avec des agents "stressés" et qui de ce fait conservent un mode de consommation "insouciant" et empêchent la demande totale de suffisamment baisser pour qu'il n'y ait plus d'agents en situation de stress hydrique. Lorsque la valeur du seuil de changement d'attitude augmente, le comportement "économe" se diffuse plus difficilement et la demande totale baisse moins, entraînant une hausse du nombre d'agents en situation de stress hydrique.

Ces simulations mettent en évidence l'importance du lien social et de la solidarité entre les habitants d'un territoire pour faire face à des périodes de sécheresse. A partir des résultats de cette étude et d'enquêtes menées sur le terrain, les décideurs peuvent choisir de baisser la valeur du seuil de changement de comportement en menant des actions dans le but d'accroître le lien social et la solidarité entre les habitants, et ainsi mieux surmonter des périodes de tensions sur l'eau.

L'intérêt de notre approche hybride SMA-SIG apparaît dans cette étude de cas, où la dynamique du système dépend étroitement du comportement individuel et la répartition géographique des consommateurs.

5.6.4 Quelle police de l'eau ?

La seconde étude sur le Cap Corse que nous présentons, a pour objet la politique de contrôle de l'application des consignes de restrictions des usages de l'eau qui doivent être imposées pendant les périodes de sécheresse. En effet, pendant les périodes de pénuries les autorités prennent des arrêtés interdisant certains usages (lavage des voitures, remplissage de piscines, arrosage des pelouses, etc.) pour réduire la demande totale. Si dans un premier temps beaucoup de citoyens respectent ces consignes, d'autres les ignorent et, en l'absence de contrôles des autorités, les consignes sont de moins en moins respectées. En effet pourquoi un agent laisserait mourir ses rosiers de soif, alors que tous les soirs son voisin arrose abondamment sa pelouse en toute impunité ?

Les arrêtés de restrictions ne sont donc efficaces que si une politique de contrôle et de sanction les accompagne. Par crainte de devenir impopulaires, les autorités politiques sont très réticentes à ordonner des contrôles fréquents et systématiques.

L'étude que nous présentons permet aux décideurs de choisir la meilleure politique de contrôle pendant les périodes de sécheresse : celle où la fréquence des contrôles est la plus faible et leur efficacité maximale.

Nous modélisons donc le système en adoptant des hypothèses comportementales qui diffèrent de celles adoptées dans l'expérience précédente :

- Quelle que soit la situation hydrologique de la région, tous les agents qui dépendent d'un même réservoir reçoivent la même fraction de leur besoin en eau. Ce modèle correspond à un mode de distribution où les autorités choisissent de n'ouvrir les vannes que quelques heures par jour pendant les périodes de sécheresse.
- Les agents consommateurs (*Foyer et Hôtel*) ont deux modes de consommation différents. Dans le premier mode, "*insouciant*" ils utilisent autant d'eau qu'ils le désirent. Dans le second mode, "*économe*", ils réduisent leur consommation de 50%.
- Lorsqu'en fin de journée le niveau d'un réservoir (agent *Citerne*) atteint une certaine limite basse, et que le volume de la demande dépasse la ressource, le réservoir émet un bulletin d'alerte à destination de tous ses abonnés pour leur demander d'adopter un comportement "*économe*".
- Lorsque tous ses voisins sont "économes", la probabilité qu'un consommateur adopte un comportement "*économe*" est égale à P_c . Dans le cas où au moins un voisin adopte une attitude "*insouciant*", la probabilité que le consommateur adopte un comportement "*économe*" est inférieure et égale à P_u .
- Durant les alertes, un agent police de l'eau (*WaterCompany*) contrôle les agents consommateurs avec une probabilité égale à P_p . Lorsque la police détecte un agent "*insouciant*", elle le force à reprendre un comportement "*économe*". Grâce à l'effet pédagogique de ce contrôle, tous les agents "*insouciant*" situés à une distance inférieure à la valeur R adoptent à leur tour un comportement "*économe*".

Nous considérons qu'une politique de contrôle est la meilleure lorsque la fréquence des contrôles de police est la plus faible possible, et que la proportion de consommateurs adoptant un comportement "économe" est maximale. Une politique privilégiant des contrôles massifs serait efficace mais rendrait les autorités très impopulaires. Les décideurs sont donc à la recherche d'un outil leur permettant d'avoir le meilleur compromis entre la fréquence des contrôles et la proportion de consommateurs adoptant un comportement "économe".

Pour mesurer l'efficacité d'une politique de contrôle nous adoptons un indicateur (SCORE) basé sur la moyenne annuelle du taux de consommateurs "économe" (AVERAGE_CIVIC_RATE) calculé sur une année et la probabilité pour un consommateur d'être contrôlé par la police (Pp).

$$\text{SCORE} = \text{AVERAGE_CIVIC_RATE}^2 \times (1 - \text{Pp}) / (1 + \text{Pp})$$

En utilisant l'outil d'aide à la décision que nous avons développé à partir de la plateforme CORMGIS, et pour tenir compte des phénomènes stochastiques, nous avons réalisé des séries de 100 simulations pour chaque jeu de paramètres Pc, Pu, Pp et R. Le taux moyen de consommateurs "économe" (AVERAGE_CIVIC_RATE) est calculé à partir des données obtenues entre les 670^{ième} et 1035^{ième} pas de simulation, soit à l'équivalent d'une année.

Le plan d'expérience que nous avons établi fait varier les paramètres de la façon suivante :

- Pc, la probabilité pour un consommateur entouré seulement de consommateurs "économes" d'adopter aussi une attitude "économe" pendant une période sécheresse varie 0,7 à 0,95 avec un pas de 0,05.
- Pu, la probabilité pour un consommateur entouré d'au moins un consommateur "insouciant" d'adopter aussi une attitude "économe" pendant une période sécheresse varie 0,1 à 0,9 avec un pas de 0,05.
- Pp, la probabilité pour un consommateur d'être contrôlé par la police de l'eau pendant une période sécheresse varie 0 à 0,5 avec un pas de 0,05.
- R, le rayon d'efficacité dissuasive des contrôles varie de 0 à 2.

L'exécution de ce plan d'expérience nécessite la conduite de 327 200 (100x6x12x17x3) simulations en suivant toujours le même scénario.

Pc	Pu	Pp	R	% "économes"	Score
0,7	0,1	0	1	8	64
0,7	0,1	0,15	1	31	736
0,7	0,1	0,30	1	44	1025
0,7	0,1	0,45	1	51	1004
0,95	0,8	0	1	30	912
0,95	0,8	0,15	1	79	4601
0,95	0,8	0,30	1	86	4016
0,95	0,8	0,45	1	89	3045

Figure 43 : Evaluation de différentes stratégies de contrôle

La Figure 43 présente les scores de plusieurs stratégies de contrôle dans deux contextes socioculturels différents :

- Dans le premier cas, les habitants de la zone ont une tendance certaine à ignorer les consignes des autorités : ils ne sont que 70% à appliquer les consignes de limitation des usages lorsque tous leur voisins acceptent les limitations. Ce taux chute à 10% dès qu'ils ont un voisin qui ne respecte pas les recommandations de modération. Dans ce contexte socioculturel, la stratégie de contrôle qui obtient le meilleur score (1025) est celle où la fréquence des contrôles est de 30%.
- Dans le second cas, les habitants de la région appliquent largement les consignes des autorités: ils sont 95% à appliquer les consignes de limitation des usages lorsque tous leur voisins acceptent les limitations. Ce taux reste atteint encore à 80% lorsqu'ils ont un voisin qui ne respecte pas les recommandations de modération. Dans ce contexte socioculturel, la stratégie de contrôle qui obtient le meilleur score (4601) est celle où la fréquence des contrôles n'est que de 15%, soit la moitié seulement du taux préconisé dans le premier profil.

Grâce aux résultats obtenus par notre système informatique d'aide à la décision, et après avoir déterminé le profil socioculturel de la population, les décideurs peuvent choisir la meilleure politique de contrôle des consommateurs pendant les périodes de sécheresse.

Cette étude illustre une seconde fois l'intérêt de notre approche hybride SMA-SIG pour étudier des systèmes dont la dynamique dépend étroitement du comportement individuel et du voisinage (donc de la répartition géographique) des agents.

5.7 Codage

Dans nos les expérimentations sur le Cap Corse, nous utilisons comme module SIG la version 9 du logiciel ArcGIS [ESRI] et les données géographiques acquises par l'Université de Corse. Ces données apportent des informations sur l'occupation du sol, les réseaux hydrographiques et routiers, la topographie, les communes, les villages et la toponymie.

Nous implémentons le module SMA de CORMGIS à partir de la version non commerciale VNC.7.3 de l'environnement de développement SmallTalk VisualWorks [VisualWorks] et de la plateforme CORMAS2004 datée du 28 septembre 2005 [CORMAS].

Les instructions que nous ajoutons à CORMAS pour implémenter CORMGIS et le modèle HydroValleA représentent plus de 2000 lignes de code.

En utilisant le modèle HydroValleA, un ordinateur doté de 512 Mo de RAM et d'un processeur Pentium 4 à 2,8 GHz, l'exécution de 80 expérimentations, de 1035 pas chacune, en suivant un scénario, où l'environnement est composé de 2048 cellules et le système comprend 580 agents, nécessite 2 heures de calculs lorsqu'une seule sonde est enregistrée.

Plusieurs éléments expliquent l'importance de ce temps de calcul :

- En SmallTalk, le code n'est pas compilé mais exécuté sur une machine virtuelle.
- Chacune des 2048 cellules simule une fraction du système hydrologique en communiquant avec ses 4 voisines.
- A chaque pas de temps L'exécution d'expérimentations à partir d'un scénario implique d'adresser plusieurs requêtes à la base de données géographiques.
- L'enregistrement des sondes nécessite également des accès au disque dur ou à la base de données à chaque pas de temps.

Une importante réduction du temps de calcul peut être obtenue en optimisant le code du modèle HydroValleA et en réduisant le nombre des accès au disque dur et à la base données.

5.8 Prochains travaux sur les îles

Nos prochains travaux sur le développement d'outils d'aide à la décision pour apporter une aide à la gestion de l'eau dans les îles s'orientent suivant trois axes principaux :

- Valider et compléter le modèle du système réel en collaboration avec des experts géologues, hydrologues, économistes, météorologues, socioprofessionnels, citoyens, associations, élus, décideurs et gestionnaires des infrastructures.
- Faire l'acquisition de données géographiques décrivant d'autres îles pour étudier des systèmes différents.
- Coupler notre modèle multi-agents avec le système de modélisation et de simulation d'un bassin versant basé sur DEVS qui a été développé à l'Université de Corse [Delhom 97].

Après avoir reçu un premier accueil favorable des élus du Cap Corse, nous prévoyons de présenter plus largement nos travaux à la population et aux décideurs.

6 Conclusion & Perspectives

Dans le contexte insulaire, nos travaux sur l'élaboration d'une approche hybride SMA-SIG pour la définition d'un système d'aide à la décision; application à la gestion de l'eau ont trouvé dans la problématique de l'eau dans les îles de méditerranée un champ d'application naturel.

- **Retour sur le cheminement de notre pensée**

Au cours de notre démarche nous avons d'abord dû préciser ce que recouvraient les concepts clefs de décision, d'aide à la décision et de système informatique d'aide à la décision.

Il nous est rapidement apparu que c'était la représentation du problème qui commandait les éléments qui sont pris en compte lors d'un processus de prise de décision. Les décideurs raisonnent à partir de la représentation qu'ils ont du problème. Ce constat nous a naturellement conduit à nous pencher sur les notions de modélisation, de modèle, de simulation et sur les modèles individus centrés.

L'utilisation de modèles individus centrés construits suivant le paradigme multi-agents nous a alors semblée une option innovante et prometteuse pour le développement d'outils d'aide à la décision. Après un examen approfondi de la théorie des systèmes multi-agents, nous avons décidé de choisir ce paradigme pour construire les modèles qui seraient au coeur de notre approche des systèmes informatiques d'aide à la décision.

Les systèmes multi-agents étant notre solution pour garantir la prise en compte des comportements individuels dans l'élaboration d'une aide à la décision, nous avons ensuite examiné les caractéristiques des systèmes d'informations géographiques qui vont nous permettre d'utiliser des bases de données géoréférencées. Nous nous sommes attachés à dégager le caractère novateur et l'intérêt d'une approche hybride SMA – SIG pour le développement d'outils informatiques d'aide à la décision.

Ayant désormais une vision claire des systèmes multi-agents et des systèmes d'informations géographiques, nous avons explicité la nature et l'objet des connaissances qui sont mobilisées dans un processus d'aide à la décision. Au cours de cet approfondissement, dans le cadre de notre approche de l'aide à la décision, nous avons précisé quelles étaient les relations et les contraintes qui existaient entre les deux représentations du système réel que constituent le modèle multi-agents et le système d'informations géographiques.

Nos recherches sur les connaissances impliquées dans l'aide à la décision ont abouti à la définition d'une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision basés sur une approche hybride SMA – SIG. Cette architecture, baptisée SMAG, permet le développement de systèmes informatiques d'aide à la décision qui sont en mesure d'intégrer à la fois l'influence des comportements individuels de toutes les parties prenantes et d'utiliser des bases de données géoréférencées.

Nous avons ensuite implémenté l'architecture SMAG en réutilisant la plateforme multi-agents CORMAS du CIRAD et le logiciel de gestion des données géographiques ArcGIS de la société ESRI. Cette implémentation a donnée naissance à une plateforme de développement d'outils d'aide à la décision que nous avons nommée CORMGIS.

Disposant désormais d'un puissant outil de développement, nous avons étudié la problématique de l'eau dans les îles de méditerranée qui est un des principaux champs d'applications de nos recherches sur l'aide à la décision. En utilisant CORMGIS nous avons développé un outil informatique spécialement adapté à l'étude de ce problème que nous avons utilisé pour étudier l'importance de la solidarité et aider à choisir la meilleure politique de contrôle des usagers pendant les périodes de sécheresses. Ces études sur l'eau marquent la fin des travaux que nous avons entrepris dans le cadre de cette thèse.

- **Réalisations**

Au cours de nos travaux nous avons été amené à :

1. Définir les liens et les contraintes qui existent entre un système d'informations géographiques et un système multi-agents dans un même outil d'aide à la décision.
2. Proposer SMAG, une architecture de plateforme de développement d'outils d'aide à la décision qui utilise simultanément les ressources de la théorie des systèmes d'informations géographiques et des systèmes multi-agents.
3. Développer la plateforme CORMGIS qui implémente l'architecture SMAG.
4. Développer avec CORMGIS un système informatique d'aide à la décision qui apporte aux décideurs des éléments utiles pour faire face au défi de l'eau.

Ces réalisations sont la concrétisation d'une démarche qui a su dépasser le cadre exclusivement théorique et démontrer sa pertinence en trouvant des applications.

- **Bilan et perspectives**

Cette thèse a été l'occasion d'un important travail interdisciplinaire qui a pu se concrétiser dans plusieurs réalisations. L'immensité des champs de connaissances qui ont été parcourus au cours de nos recherches nous a souvent contraints à limiter la profondeur de nos investigations pour nous concentrer sur le coeur de notre problématique.

Ces travaux nous ont permis de dépasser le cadre strict de la recherche en informatique pour nous faire parcourir avec un vif intérêt d'autres champs scientifiques desquels nous retirons des enseignements que nous réinvestirons, sans aucun doute, dans nos futures recherches. La concrétisation de nos recherches dans une la définition d'une nouvelle architecture, l'implémentation d'une plateforme de développement, et dans l'application au problème de l'eau qui est une de nos préoccupations majeures, est conforme à nos attentes.

Après avoir dans un premier temps validé notre modèle capcorsin avec l'aide de l'office d'équipement hydraulique de la Corse, nous envisageons de donner plusieurs suites aux travaux présentés dans ce mémoire :

Le premier prolongement sera certainement l'amélioration de l'outil d'aide à la décision que nous avons développé pour étudier la problématique de l'eau. Ces améliorations porteront sur la modélisation du système réel et sur les fonctionnalités de l'outil.

Dans un deuxième temps nous souhaitons étudier d'autres problématiques avec la plateforme CORMGIS. Nous envisageons d'aborder les problèmes des feux de forêts, de la sauvegarde d'écosystèmes, de la gestion de catastrophes (attentats, risques naturels, industriels et chimiques), l'implantation de prestataires de services et d'activités industrielles et commerciales.

Le troisième axe de continuation nos recherches sera, sans aucun doute, un enrichissement de la plateforme CORMGIS à laquelle nous ajouterons de nouveaux modules et de nouvelles classes qui permettront de modéliser plus facilement les systèmes réels et de développer d'autres systèmes informatiques d'aide à la décision.

Enfin nous prévoyons, à plus long terme, de faire évoluer l'architecture SMAG à partir des enseignements que nous aurons su tirer de l'utilisation de CORMGIS.

Ces travaux trouveront probablement d'autres prolongements inattendus en fonction des partenariats et des échanges que nous établirons avec des décideurs, des experts, et des chercheurs d'autres domaines.

7 Références

[AgentBuilder] plateforme SMA : <http://www.agentbuilder.com/>

[Bleu] Les objectifs du programme "*Plan Bleu*" soutenu par le PNUE et le PAM des nations Unies sont décrits sur le site www.planbleu.org.

[Bordin 02] Bordin P., "*SIG, concepts, outils et données*", p113, Editions Hermès Sciences, Paris, 2002

[BOSS 05] Le logiciel HEC-RAS est détaillé sur le site de son éditeur <http://www.bossintl.co.uk>

[Bousquet 98] Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. et Le Page, C. 1998. "*Cormas: common-pool resources and multi-agent Systems*". Lecture Notes in Artificial Intelligence 1416: 826-838

[Bousquet 04] Bousquet, F., Le Page, C. "*Multi-agent simulations and ecosystem management: a review*". Ecological Modelling 176 (3-4): 313-332, Elsevier, 2004.

[Bratman 87] Bratman M., "*Intention, plans, and practical reason*". Harvard University Press, 1987.

[Briot 03] Criot J. P., Ghédira K., "*Déploiement des systèmes multi-agents, vers un passage à l'échelle. JFSMA*", Hermès Lavoisier, Paris 2003.

[Brooks 86] Brooks R. A. "*A robust layered control system for robots*", IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2(1), p. 14-23, 1986.

[Brooks 91a] Brooks R., "*Intelligence without representation*", Artificial Intelligence, vol. 47, p. 139-159, janvier 1991.

[Brooks 91b] Brooks R. A. "*Intelligence without reason*", dans Proceedings of the Joint Conference on Artificial Intelligence, p. 569-595, Morgan Kaufmann, Sydney, Australie.

[Cammarata 83] Cammarata S., McArthur D., Steeb R., "*Strategies of cooperation in distributed problem solving*", dans Proceeding of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-83), p767-770, Karlsruhe, Allemagne 1983.

[Caplat 02] Caplat Guy, "*Modélisation cognitive et résolution de problèmes*", Presses Polytechniques et Universitaires Romande, Lausanne 2002.

[Chaib-Draa 94a], Chaib-Draa B., Levesque P., "*Hierarchical models and communication in multi-agent environments*", dans Proceedings of the 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents and Multi-Agent Worlds, p. 119-134, Odense, Danemark.

[Chaib-Draa 94b], Chaib-Draa B., "*Distributed Artificial intelligence: An overview*", dans Encyclopaedia of Computer Science and Technology, vol. 31, p. 215-243, Marcel Dekker, 1994.

[Checroun 92] Checroun A., "*Comprendre, concevoir et utiliser les SIAD*", Masson, Paris 1992.

[Cincom] présentation de la société Cincom sur le site web <http://www.cincom.com>

[CIRAD] présentation du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement sur le site <http://www.cirad.fr/>

[Civil 05]. Le logiciel WATSYS de la société Expertware est détaillé sur le site <http://www.civilsystems.com>

[Coe 00] Coe, M.T. 2000: "*Modelling terrestrial hydrological systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric GCM*", Journal of Climate, 13, 686-704

[Cohen 88] COHEN P.R., LEVESQUE H.J. "*Intention is choice with commitment*" in Artificial Intelligence, 1988.

[Cohen 95] Cohen V., "*La recherche opérationnelle*", "Que Sais Je ?", PUF 1995.

[Conte 92] Conte R., Castelfranchi C., "*Mind is not enough: Precognitive Bases of Social Interaction*" dans Proceedings of 1992 Symposium on Simulating Societies, pp.93-110. 1992

[Coquillard 97]. Coquillard P., Hill D. "*Modélisation et simulation des écosystèmes*", Masson, Paris, 1997.

[Corkill 83] Corkill D. D., Lesser V. R., "*The use of meta-level control for coordination in a distributed problem solving*", dans Proceeding of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-83), p748-756, Karlsruhe, Allemagne 1983.

[CORMAS] présentation du logiciel sur le site <http://cormas.cirad.fr/index.htm>

[Courbon 86] Courbon J., Stabell C., "Artificial intelligence in the design of decision support systems, tutorial of the conference of economics and artificial intelligence", Aix en Provence, septembre 1986.

[Davenport 03] Davenport T. E., "*The Watershed Project Management Guide*", Lewis Publishers, 2003, Washington, D.C.

[De Blomac 94] De Blomac F., "*ARC / INFO : concepts et applications en géomatique*", Editions Hermès Sciences, 1994, Paris.

[Delhom 97] Delhom, M., "*Modélisation et Simulation Orientées Objet, Contribution à l'Etude du Comportement Hydrologique d'un Bassin Versant*". Thèse de Doctorat, Université de Corse, 1997.

[Drogoul 92], A. Drogoul A. , Corbara B., D. Fresneau D., "*Applying EthoModeling to Social Organization in Ants*" in Biology and Evolution of Social Insects, J. Billen eds, Leuven University Press, 1992.

[Dugot 01] P. Dugot, "*L'eau autour de la méditerranée*", éditions L'Harmattan, 2001

[Eierman 95] Eierman, Niederman, & al. "*DSS theory: a model of constructs and relationships*". Decision Support Systems 14(1): 1-26, 1995

[eMediator] Détails solution commerce électronique [eMediator] sur le site Internet <http://www.emediator.com/>

[EMS 05] Logiciel Watershed Modeling System de la société Environmental Modeling Systems détaillé sur le site de l'éditeur <http://www.ems-i.com>

[Engelmore 88], Engelmore R., Morgan T. "*Blackboard system*", Addison-Wesley, reading, MA, USA, 1988

[Epstein 96] Epstein, J., Axtell R., "*Growing Artificial Societies, Social Science from the bottom up*", MIT Press, 1996.

[Erhars 83] Erhars A., Margat J. "*Introduction à l'économie générale de l'eau*". Masson 1983

[Ermine 03] Ermine, J.-L. "*La gestion des connaissances*". Hermès, Lavoisier, Paris, 2003.

[ESRI] Le logiciel ArcGIS est décrit sur le site de son éditeur www.esri.com

[Favier 04] Favier P., "*La notion d'intentionnalité dans la spécification de comportements d'agents autonomes situés en environnement virtuel*". Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, décembre 2004.

[Feuillette 01] Feuillette S., thèse de doctorat, "*Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents, Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale*", Université Montpellier II, 27 mars 2001.

[Ferguson 92], Ferguson I. A., "*Touring Machines : An architecture for Dynamic, Rational, Mobile agents*", thèse de doctorat, Clare Hall, Université de Cambridge, 1992

[Ferber 95] Ferber J. "*Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*", InterEditions, 1995.

[Finin 93] Finin T., Weber J., Wiederhold G., Genesereth M., Fritzon R., Mac Guire J., Shapiro S., Beck C "*Specification of the KQML Agent-Communication Language*", DARPA Knowledge Sharing Initiative, External Interface Working Group, <http://www.cs.umbc.edu/kqml/> , 1993.

[FIPA 99] "*Specification: Agent Communication Language*", Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org/spec/fipa99spec.htm> , 1999.

[Fishwick, 1997] Fishwick, Paul A. 1997. "*Computer simulation: growth through extension*". Transactions of the Society for Computer Simulation International, 14(1), 13–23.

[Georgeff 87], Georgeff M. P., Lansky A. L., "*Reactive, Reasoning and planning*", dans The Proceedings of AAAI-87, p677-682, Seattle, 1987.

[Gimblett 02] Gimblett, H., R. "Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques". H. R Gimblett (ed.), Oxford University Press, 2002, New York.

[Gonçalves 04] Gonçalves A., Rodrigues A., Correia L., "Multi-agent simulation within geographic information system", Proceedings of the 5th Workshop on Agent-Based Simulation, Lisbon, May 2004.

[Guessoum 01] Guessoum Z., Occello M. "Environnements de développement" dans Principes et architectures des systèmes multi-agents, Briot J.-P. et Demazeau Y., Hermès Sciences, Paris, 2001.

[Grimble 96], Grimble R. J., Gass, G., & Adams, "Groundwater resource degradation: a framework for analysis, with examples from China and Palestine". Water Policy p 97-105, 1996

[Grimm 99] Grimm V., "Ten years of individual-based modeling in ecology: what we have learned and what could we learn in the future?", Ecological Modeling, vol. 115, pp.129-148. 1999

[Hubert 86] Hubert, P. "De quelques concepts et outils utiles à la gestion de l'eau". Thèse de Doctorat d'Etat ès sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1986.

[IWMI 98] IWMI Seckler et al "Research Report 19: World Water Demand and Supply 1990 to 2025: Scenarios and Issues". 1998

[JADE] plateforme SMA décrite sur le site : <http://jade.tilab.com/>

[Jarras 02] Jarras I., Chaib-Draa B., "Aperçu sur les systèmes multi-agents", Cirano, Montréal, 2002.

[Jennings 01] Jennings N.R., "An agent-based approach for building complex system software systems", Communication of ACM, vol. 44, n4, p. 35-41, 2001.

[Klein 71] Klein M., V. Tixier, "SCARABEE: a data and model bank for financial engineering and research", IFIP congress, North Holland, 1971.

[Le Bars 03], Marjorie Le Bars, thèse de doctorat, "Un Simulateur Multi-Agents pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale", Université Paris IX, 2003.

[Leenhardt 04] Leenhardt D., Trouvat J.L. "ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale - Exemple d'utilisation en temps de crise", Ingénieries EAT numéro 40 - Décembre 2004, Cemagref éditions

[Le Page 00] Le Page C., Bousquet F., Bakam I., Bah, A., Baron C., "CORMAS: A multi-agents simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales". In: "The ecology of scales", Wageningen, Pays-Bas, 27-30 juin 2000

[Levine 89] Levine P., Pomerol J. C., "Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts", éditions Hermès, Paris, 1989.

[Maillé 05] Maillé E., Espinasse B., "*Du couplage de systèmes à l'intégration spatio-temporelle dans les systèmes d'aide à la décision spatiale*" dans CABM-HEMA-SMAGET05, Bourg Saint-Maurice, France, 2005.

[Margat 02] Margat J., rapport "*Des pénuries d'eau sont elles en perspective à long terme en Europe méditerranéenne ?*", plan bleu PNUE, octobre 2002.

[Medis] MEDIS, N° EVK1-CT-2001-00092 projet RTD du 5em programme de la CEE- "*Towards Sustainable Water Use on Mediterranean Islands: Addressing Conflicting Demands and Varying Hydrological, Social and Economic Conditions*", site internet <http://www.uni-muenster.de/Umweltforschung/medis/>.

[Minsky 68] L. M. Minsky, "*Matter, Minds and Models*", MIT Press, 1968.

[Montgomery 04] Montgomery, Watson, Harza, "*Tualatin Basin Water Supply Feasibility Study*", 2004

[Muller 96] Muller J. P., "*The design of Intelligent Agents: A Layered Approach*", Springer Verlag, LNAI n. 1177, 1996.

[Nii 89], Nii P., "*Blackboard system*", dans Handbook of Artificial Intelligence, Vol.4, Addison-Wesley, reading, MA, USA, 1989

[Nykanen 00] Nykanen, P. "*Decision Support System from a Health Informatics Perspective*". PhD thesis, University of Tempere, 2000

[Odell 02] Odell J., Parunak H., Van Dyke, Fleischer, Mitch, & Breuckner, Sven. "*Modelling Agents and their Environment*". Pages 16–31 of : Giunchiglia, Fausto, Odell, James, & Weiss, Gerhard (eds), Agent-Oriented Software Engineering (AOSE) III. Lecture Notes on Computer Science, vol. 2585. Springer, Berlin, 2002.

[Oussalah 88] Oussalah, C. "*Modèles Hiérarchisés Multi Vues pour le Support de Raisonnement dans les Domaines Techniques*". Rapport technique, Université d'Aix-Marseille, 1988.

[Rao 91a] A. S. Rao and M. P. Georgeff. "*Asymmetry thesis and side-effect problems in linear time and branching time intention logics*". In Proceedings of the Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91), pages 498-504, Sydney, Australia, 1991.

[Rao 91b] A. S. Rao and M. P. Georgeff. "*Modeling rational agents within a BDI architecture*". In R. Fikes and E. Sandewall, editors, Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning (KR&R-91), pages 473-484. Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo, CA, April 1991.

[Rao 92] A. S. Rao and M. P. Georgeff. "*An abstract architecture for rational agents*". In William Nebel, Bernhard ; Rich, Charles ; Swartout, editor, Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, pages 439-449, Cambridge, MA, 1992. Morgan Kaufmann.

[Redaud 00] Redaud J.L., "*Planète eau : repères pour demain*". Editions Johanet 2000.

[Ricordel 00] Ricordel P.-M., Demazeau Y. "*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, 2000.

[Roth 89] B. H. Roth, M. Hewett, R. Washington, R. Hewett, and A. Seiver. "*Distributing intelligence within an individual*". In Les Gasser and Michael N. Huhns, editors, *Distributed Artificial Intelligence*, volume 2 of *Research Notes in Artificial Intelligence*, pages 385-412. Pitman, 1989.

[RUSLE2] U.S. Yoder, D. C., J. P. Lyon, and G.R. Foster. 2005. RUSLE2 Software ARS Release. Release (Jan. 19, 2005) of RUSLE2 software posted on the official USDA-ARS RUSLE2 web site, <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5971>

[Russell 03] Russell S.J., Norvig P. "*Artificial Intelligence: A Modern Approach*". Pearson Education, 2003.

[SAGE] Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux institués en France par la LOI no 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.

[Sargent 01] Sargent, Robert G. 2001. "*Verification and validation: some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models*". Pages 106–114 de: *Proceedings of the 33rd conference on winter simulation*. IEEE Computer Society.

[Schelling 80] Schelling T., "*La Tyrannie des petites décisions*", Paris, PUF, 1980.

[Serment 05] J. Serment, B. Espinasse, E. Tranvouez "*Contribution à une architecture logicielle générique pour le développement de systèmes d'aide à la décision environnementale : illustration à travers le cas camarguais*", dans CABM-HEMA-SMAGET05, Bourg Saint-Maurice, France, 2005.

[Simon 69] Simon H. A., "*The Sciences of The Artificial*", MIT Press, 1969.

[Steels 89] Steels L., "*Cooperation between distributed agents Through Self organization*", *Journal on robotics and autonomous systems*, North Holland, Amsterdam. 1989.

[SWARM] présentation de la plateforme SMA SWARM sur le site <http://www.swarm.org>

[VisualWorks] la plateforme VisualWorks est présentée en détails sur le site Internet de la société éditrice <http://smalltalk.cincom.com/>

[Westervelt 02] Westervelt, D. "*Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling*", In *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques*, H. R. Gimblett (ed.), Oxford University Press, 2002, New York.

[Weyns 05] Weyns D., Parunak, H. Van Dyke, Michel, Fabien, Holvoet, Tom, Ferber J. "*Environments for Multi-Agents Systems: State-of-the-Art and Research Challenges*". Pages

1–47 of: First International Workshop, E4MAS 2004, New York, July 19, 2004, Revised Selected Papers. LNAI, vol. 3374. Springer 2005.

[Wooldridge 01] Wooldridge M., "*An introduction to multi-agent systems*", editions John Wiley & Sons, 2001.

[Zeigler 00] Zeigler, Bernard P., Kim, Tag Gon, & Praehofer, Herbert. 2000. "*Theory of Modeling and Simulation*". Academic Press, Inc.

[ZEUS] La plateforme SMA ZEUS décrite sur le site <http://labs.bt.com/projects/agents/zeus/>

8 Publications issues de nos recherches

"Water Management Using a New Hybrid Multi-Agents System – Geographic Information System Decision Support System Framework"

Dominique Urbani, Marielle Delhom,

ISEIM 2006 – IEEE International Symposium on Environment Identities and Mediterranean area, Juillet 2006, à paraître.

"Water Management Policy Selection Using a Decision Support System Based on a Multi-agent System"

Dominique Urbani, Marielle Delhom,

Proceedings 9th Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence, Milan, Italy, September 21-23, 2005. [Lecture Notes in Computer Science](#) 3673 Springer 2005, ISBN 3-540-29041-9, p. 466-469;

"Gestion intégrée de l'alimentation en eau à l'aide d'un système hybride SMA-SIG"

Dominique Urbani, Marielle Delhom,

Conférence SIG 2005 – Esri France – 5 et 6 Octobre 2005

"A Decision Support System for the Water Management in Mediterranean Islands based on a Multi-Agent System"

Dominique Urbani, Marielle Delhom,

AISTA 2004 in Cooperation with the IEEE Computer Society Proceedings / ISBN : 2-9599776-8-8 15-18 November, Kirchberg - Luxembourg

"Definition of a Decision Support System to Control a Sheep Herd"

D. Urbani, M. Delhom, J.F. Santucci, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Washington, Oct. 2003 pp. 3020- 3026 vol.3

9 Annexes

9.1 Annexe 1 : Procédure d'installation de CORMGIS

La plateforme CORMGIS est basée sur la plateforme CORMAS du CIRAD et logiciel ArcGIS qui permet la gestion des systèmes informations géographiques.

La procédure d'installation qui suit est certifiée pour fonctionner avec la version 9 d'ArcGIS, la version 7.3NC de la plateforme Cincom.Smalltalk et la version CORMAS2004 datée du 28 septembre 2005. Le code de la plateforme CORMGIS est conçu pour fonctionner avec les versions suivantes de ces logiciels de bases.

i. Installation de la suite logicielle ArcGIS

Se procurer les CD d'installation auprès de la société ESRI.
Suivre la procédure d'installation en suivant les options recommandées par l'éditeur.

ii. Installation de l'environnement de développement VisualWorks

La plateforme CORMGIS est dérivée de la plateforme CORMAS du CIRAD et nécessite donc comme elle l'environnement de développement SmallTalk VisualWorks de la société CINCOM.

1. Télécharger la dernière version non commerciale de VisualWorks sur le site de l'éditeur CINCOM (<http://www.cincom.com>). La version non commerciale est disponible gratuite en téléchargement pour la recherche et les application non commerciale. Nos travaux ont débuté en utilisant la version 7.1 et nous avons successivement adopté les version 7.2 puis 7.3. La version 7.4 aujourd'hui disponible doit normalement se révélée compatible avec CORMGIS.
2. Installer le logiciel VisualWorks en suivant les options recommandées par l'éditeur en sélectionnant les add-ons et goodies suivant : COM Connect (pour Windows), DLL & C Connect, Database Connect, Cincom Goodies

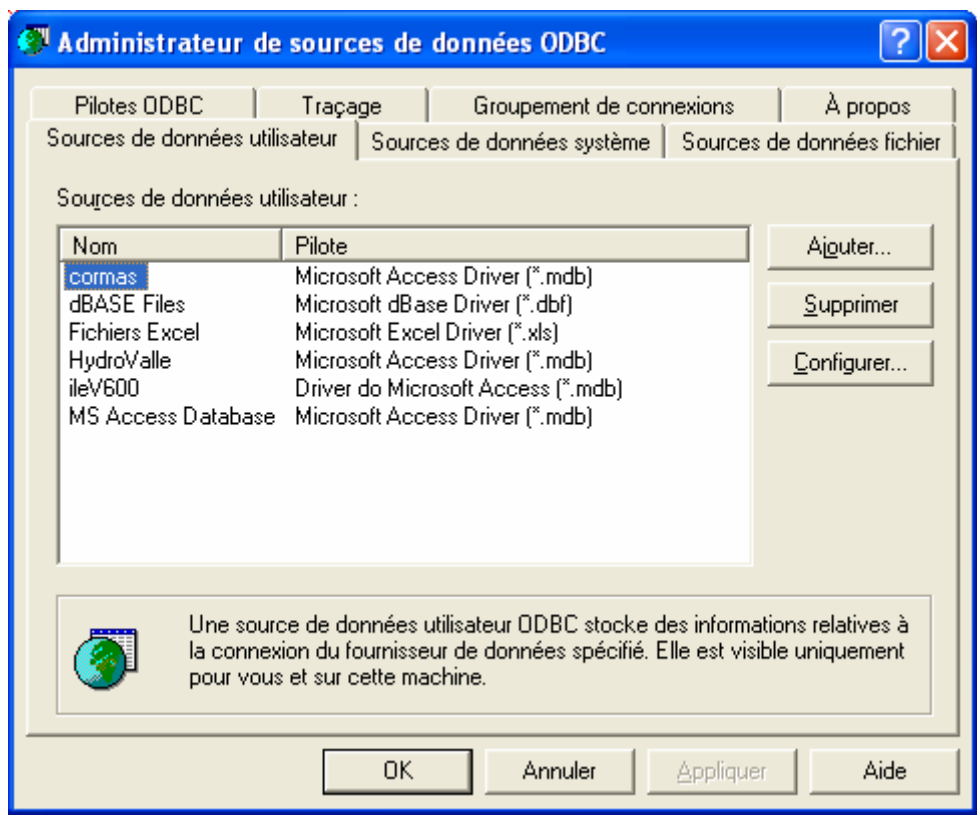
L'installation du logiciel ObjectStudio fournie par Cincom n'est pas nécessaire.

iii. Installation de l'environnement de CORMGIS

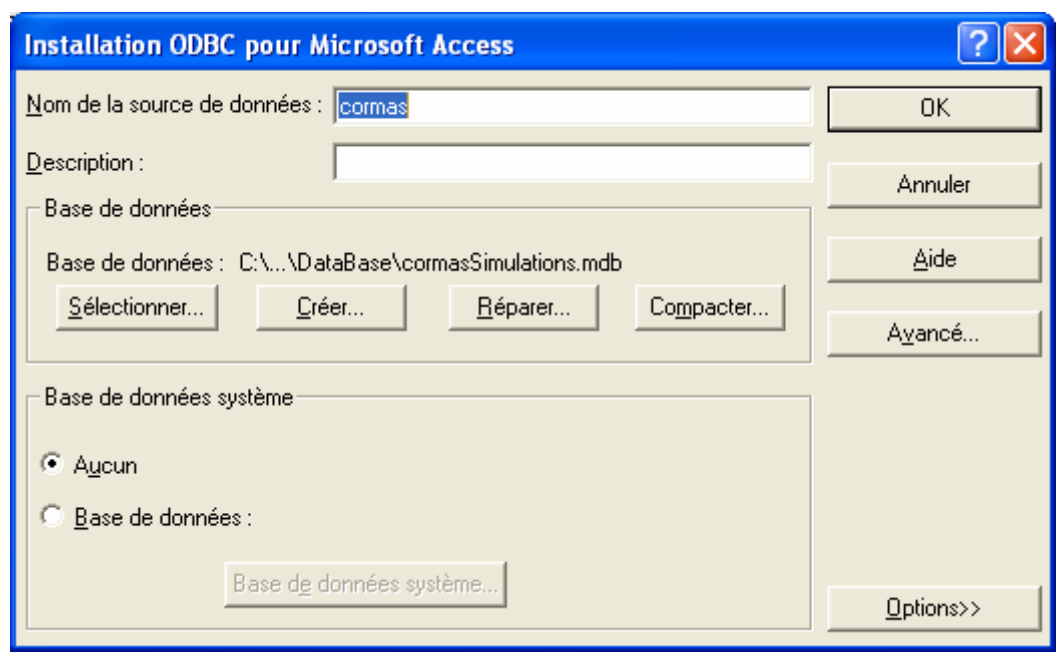
- i. Aller sur le site du CIRAD pour télécharger l'archive contenant la dernière version de la plateforme CORMAS et la documentation disponible.
- ii. Décompresser l'archive dans le répertoire d'installation de VisualWorks (C:\VW7.4) et obtenir l'arborescence suivante :

```
C:\VW7.4\  
  * bin  
    o win  
  * cormas  
    o Kernel  
    o Messages  
    o Models  
    o DataBase  
  * goodies  
    o other  
    o park  
  * images
```

- iii. Décompresser l'archive cormgis.zip dans le répertoire C:\VW7\Cormas\Models
- iv. Créer la connexion ODBC "cormas" avec la base de données cormasSimulation.mdb située dans le répertoire C:\VW7.4\cormas\DataBase\cormasSimulation.mdb.
Pour cela aller dans le menu : Poste de travail-->Panneau de configuration-->Outils d'administration-->Sources de données (ODBC)



Ajouter la source de données utilisateur que vous baptiserez cormas, liée au fichier cormasSimulations.mdb avec "miko" comme utilisateur, mot de passe "miko" dans les propriétés avancées.

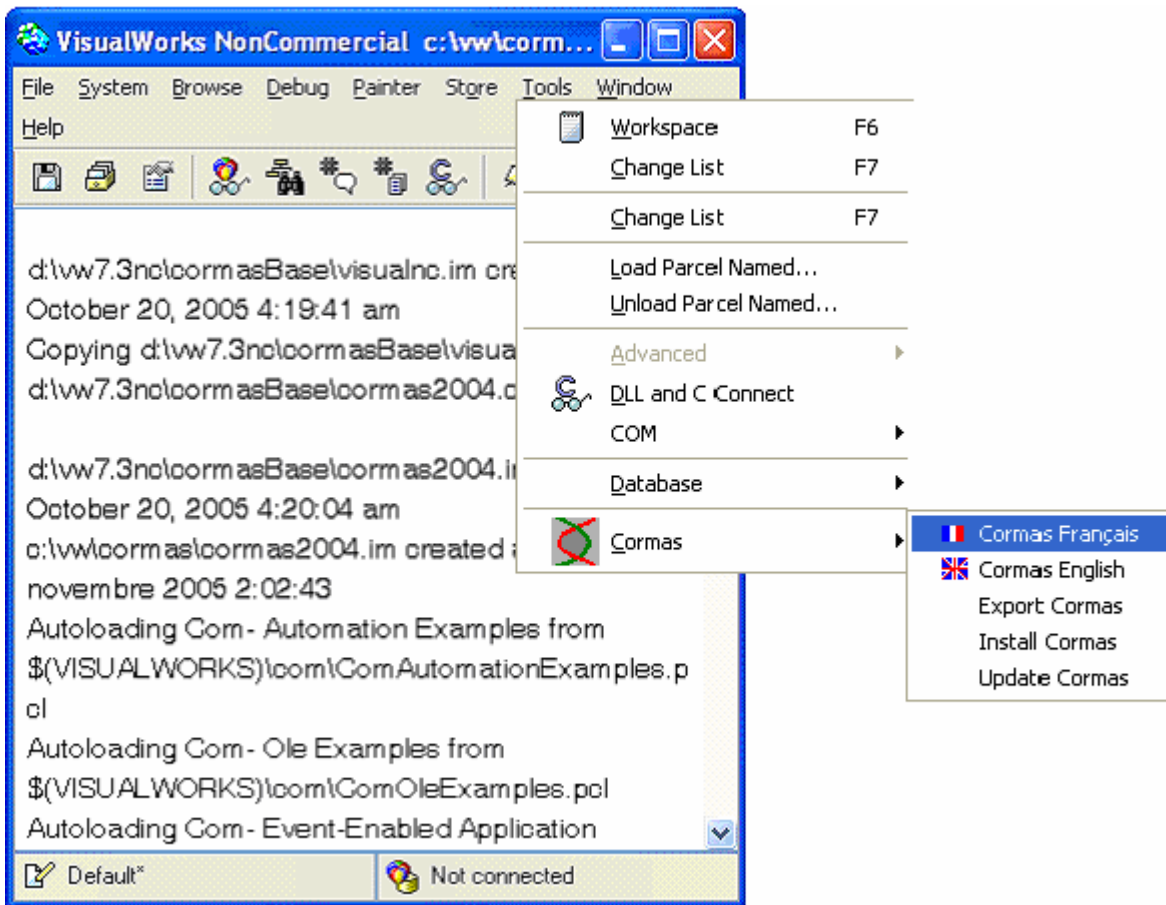


- v. Aller dans le répertoire cormas (C:\VW7.4\cormas) et sélectionner le fichier Cormas2004.im; puis « shift - bouton droit », sélectionner OUVRIR AVEC et enfin associer le fichier C:\VW7.4\bin\win\Visual.exe

vi. Pour se connecter aux bases de données en utilisant des connexions ODBC, charger les parcelles ODBCThapiEXDI et ODBCCEXDI lorsque VW7 est ouvert en utilisant le menu Tools-->LoadParcelNamed.

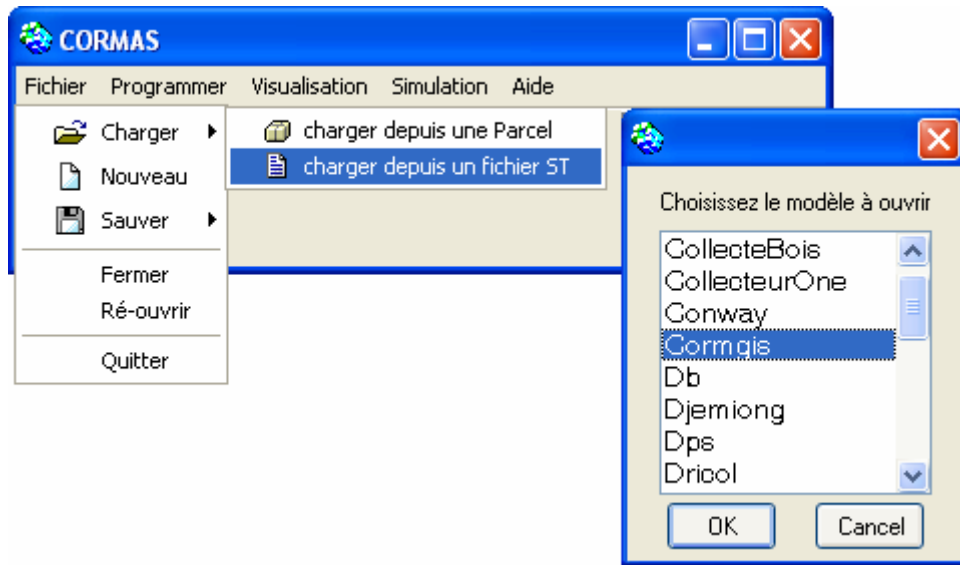
vii. Ouvrir Cormas

Lorsque VW7 est ouvert, dans le menu du VisualWorks Launcher, sélectionner :
Tools --> Cormas --> Cormas Français



tel-00136106, version 1 - 12 Mar 2007

- viii. Aller dans la fenêtre de CORMAS et charger le modèle Cormgis



- ix. Aller dans le menu File de la fenêtre VisualWorks et sauver le fichier cormas2004.img pour sauvegarder les modifications.

9.2 Annexe 2 : Utilisation de CORMGIS en mode Analyse

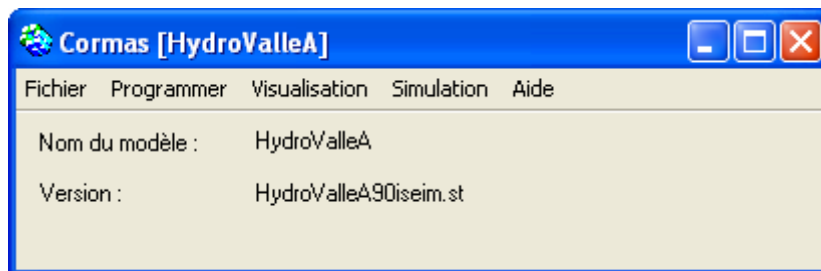
Dans cette annexe nous indiquons la procédure permettant de reproduire les expérimentations présentées dans le chapitre 5.6.3 Solidarité et coupures d'eau.

- i. Décompresser l'archive HydroValleA.zip dans le répertoire C:\VW7\Cormas\Models\HydroValleA
Cette archive contient le modèle multi-agents, les données base de données géographiques décrivant le Cap Corse et les scenarii utilisés.
- ii. Créer la connexion ODBC "ileV600" avec la base de données ileV600.mdb située dans le répertoire C:\VW7.4\cormas\Modeles\Models\HydroValleA\maps\ileV600.mdb.

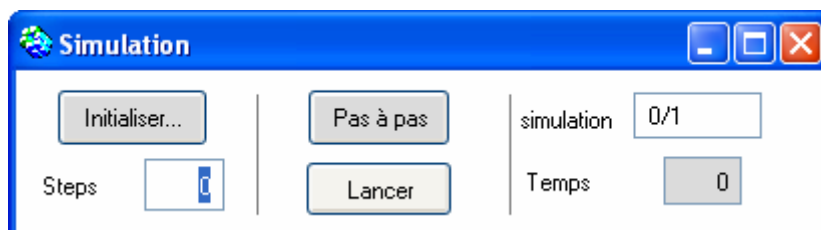
Pour cela aller dans le menu : Poste de travail-->Panneau de configuration-->Outils d'administration-->Sources de données (ODBC)

Laisser les champs utilisateur et mot de passe vierges.

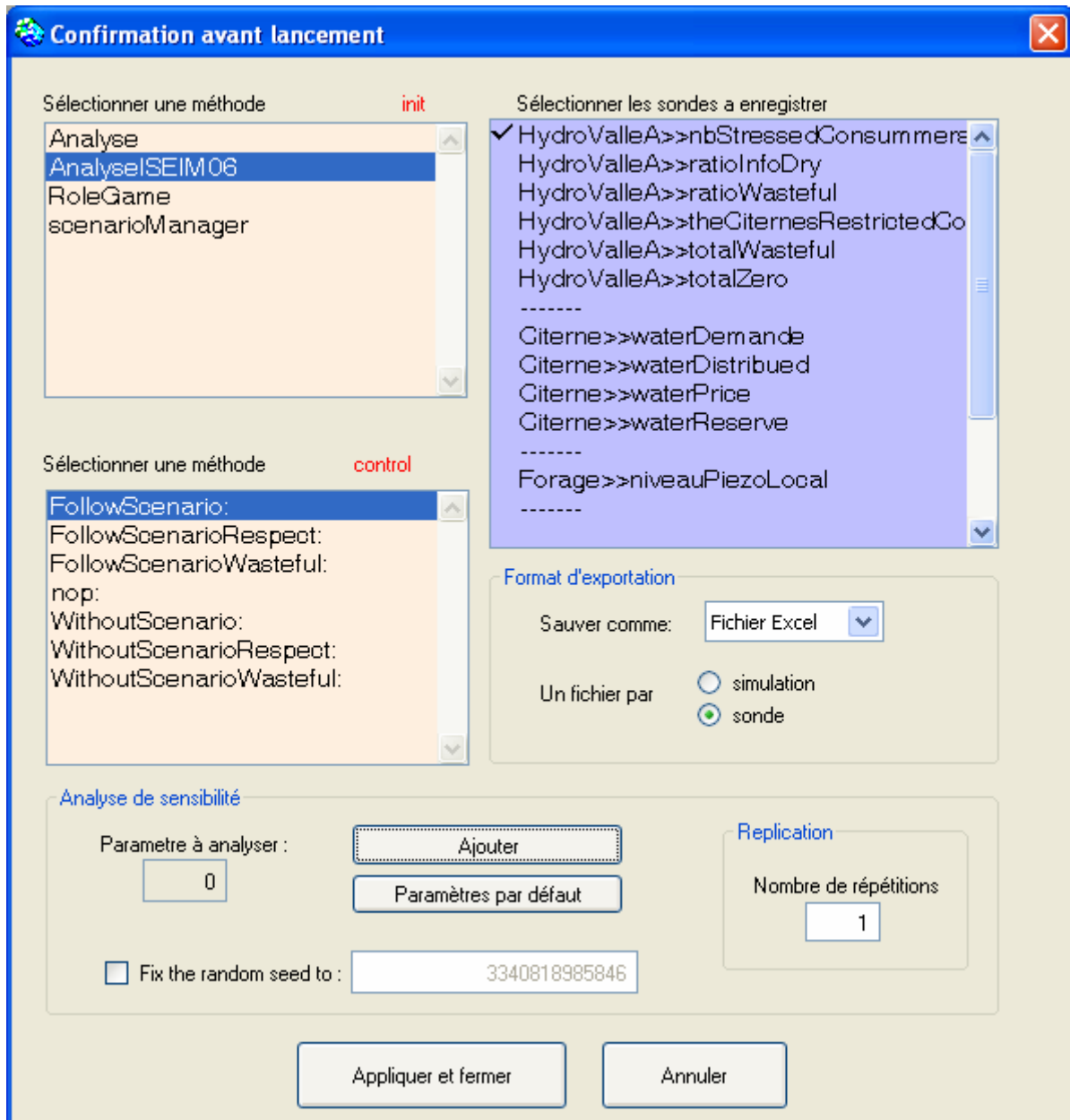
- iii. Ouvrir comas2004.im et charger le modèle, HydroValleA, choisir le fichier HydroValleA90iseim.st.



- iv. Aller dans le menu simulation et cliquer sur "**Interface de Simulation**"

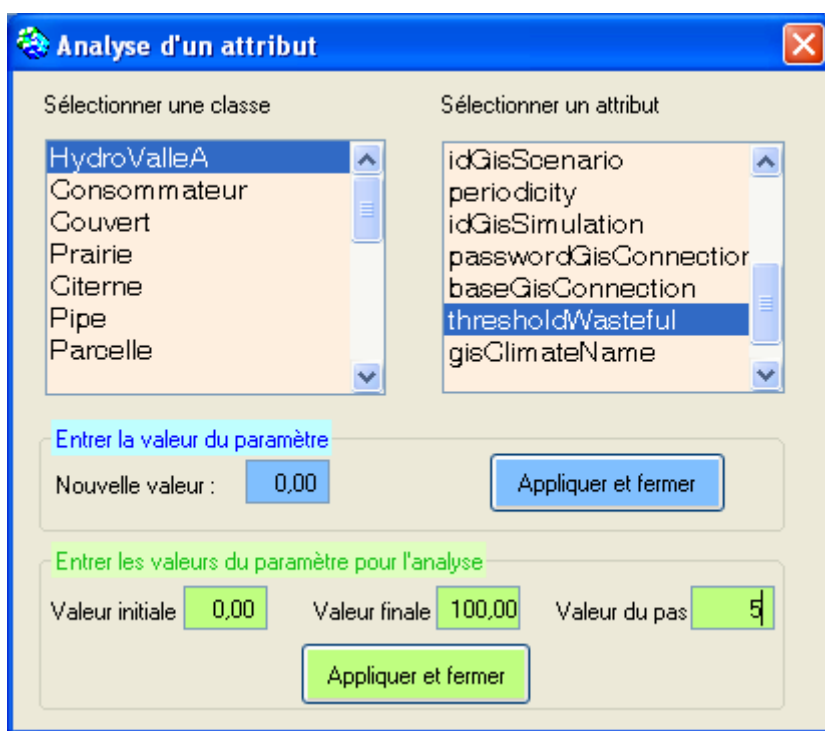


- v. Cliquer sur le bouton "**Initialiser**"



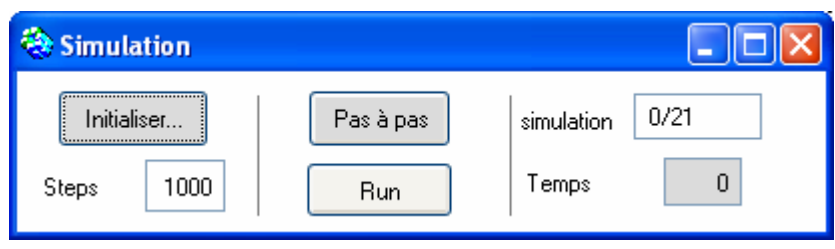
- vi. Pour reproduire l'expérience présentée dans le chapitre 5.6.3 Solidarité et coupures d'eau choisir la méthode "AnalyseISEIM06" pour l'initialisation et la méthode contrôle FollowScenario.

Sélectionner la sonde nbStressedConsummers et sauver dans un fichier excel.



Enfin après avoir cliquer sur le bouton "**Ajouter**" de Analyse de sensibilité, sélectionner l'attribut "thesholdWasteful" de la classe HydroValleA pour le faire varier de 0 à 100% avec un pas de 5 %.

Cliquer sur "**Appliquer et fermer**" 2 fois et la fenêtre de contrôle des simulation apparaît.



- vii. Pour lancer les simulations, préciser le nombre de pas et cliquer sur le bouton "**Run**". La simulation démarre et les données sont stockées dans le fichier Excel spécifié.

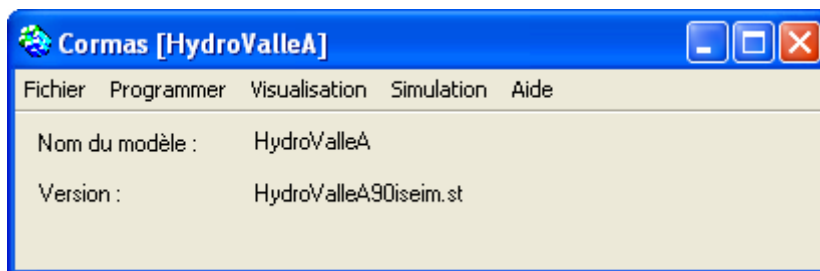
9.3 Annexe 3 : Utilisation de CORMGIS en mode jeu de rôle

Dans cette annexe nous indiquons la procédure permettant de conduire des expérimentations en mode "jeu de rôle" en utilisant le modèle du Cap Corse utilisé dans le chapitre 5.6.3 Solidarité et coupures d'eau.

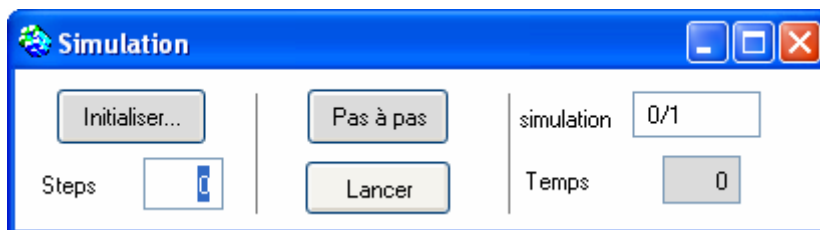
- i. Décompresser l'archive HydroValleA.zip dans le répertoire C:\VW7\Cormas\Models\HydroValleA
Cette archive contient le modèle multi-agents, les données base de données géographiques décrivant le Cap Corse et les scenarii utilisés.
- ii. Créer la connexion ODBC "ileV600" avec la base de données ileV600.mdb située dans le répertoire C:\VW7.4\cormas\Modeles\Models\HydroValleA\maps\ileV600.mdb.

Pour cela aller dans le menu : Poste de travail-->Panneau de configuration-->Outils d'administration-->Sources de données (ODBC)
Laisser les champs utilisateur et mot de passe vierges.

- iii. Ouvrir comas2004.im et charger le modèle, HydroValleA, choisir le fichier HydroValleA90iseim.st.

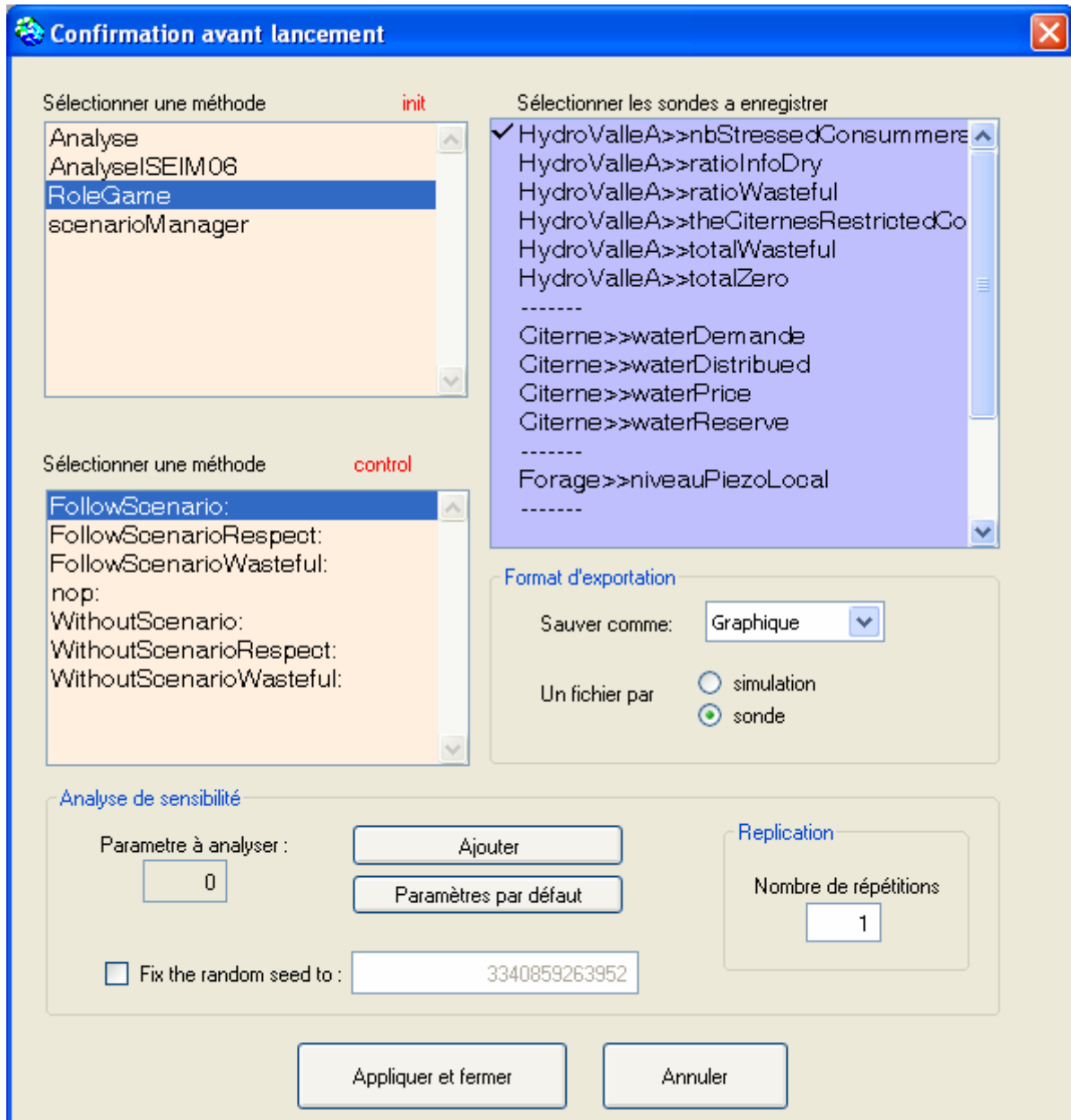


- iv. Aller dans le menu simulation et cliquer sur "**Interface de Simulation**"



v. Cliquer sur le bouton "**Initialiser**"

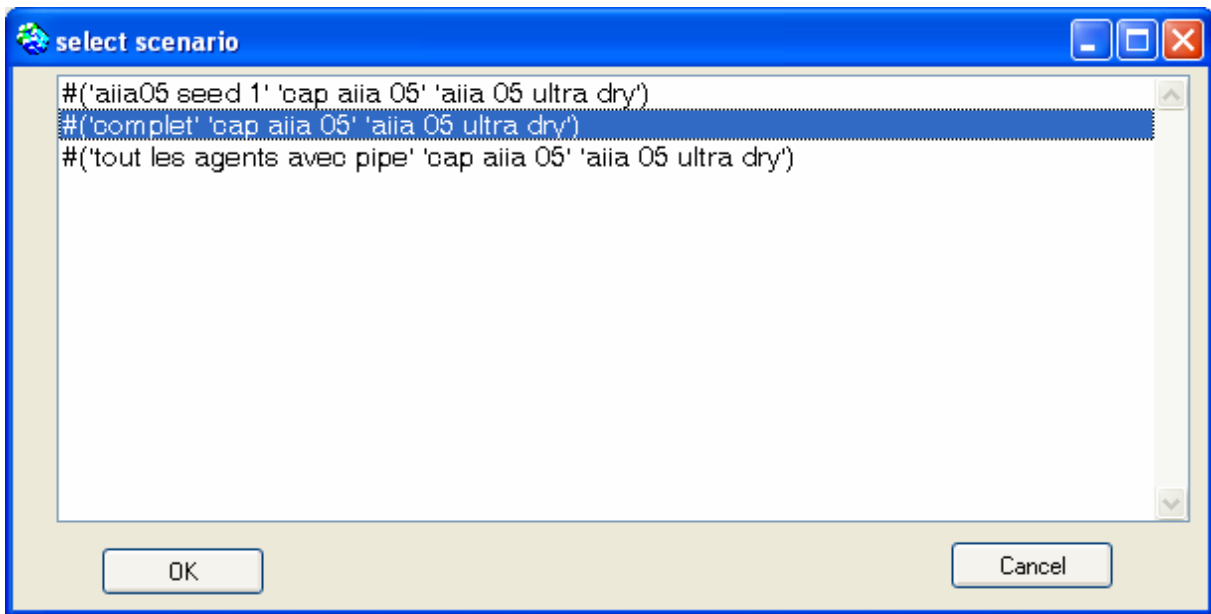
Le contrôle de l'expérience est géré par le décideur - expérimentateur, qui peut choisir de prendre en compte les événements inscrits dans le scénario qu'il choisira pour l'initialisation du modèle multi-agents.



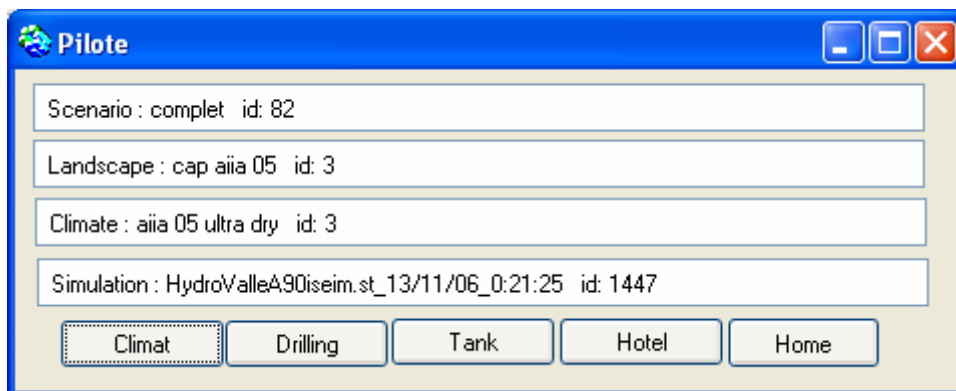
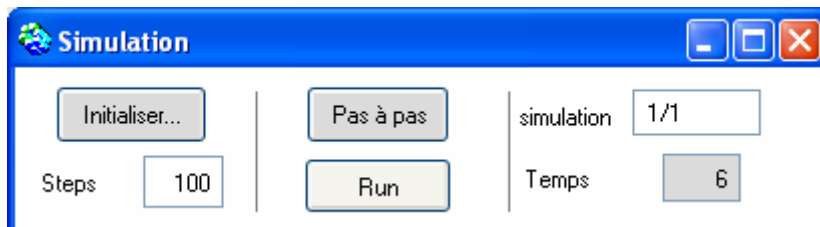
- Choisir la méthode RoleGame pour initialiser le système.
- Sélectionner les sondes à enregistrer.
- Choisir la méthode de contrôle "FollowScenario" pour prendre en compte les événements consignés dans le scénario, pour ne pas les prendre en compte choisir la méthode "WithoutScenario".

Cliquer sur "**Appliquer et fermer**".

vi. Choisir le scénario en utilisant la fenêtre suivante :



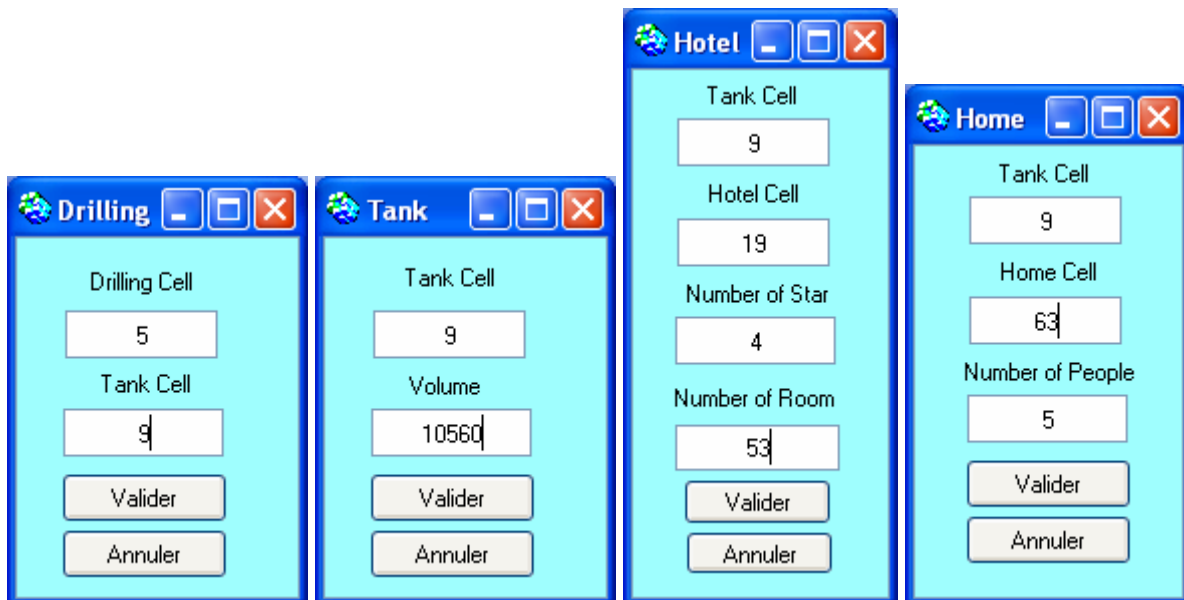
vii. Les fenêtres "Simulation" et "Pilote" s'ouvrent et permettent le contrôle total de l'expérience. Tous les évènements, qu'ils aient pour origine le scénario ou l'expérimentateur sont stockés dans la base de données ileV600.mdb.



La fenêtre "Pilote" permet d'ajouter de nouveaux agents en cours de simulation.

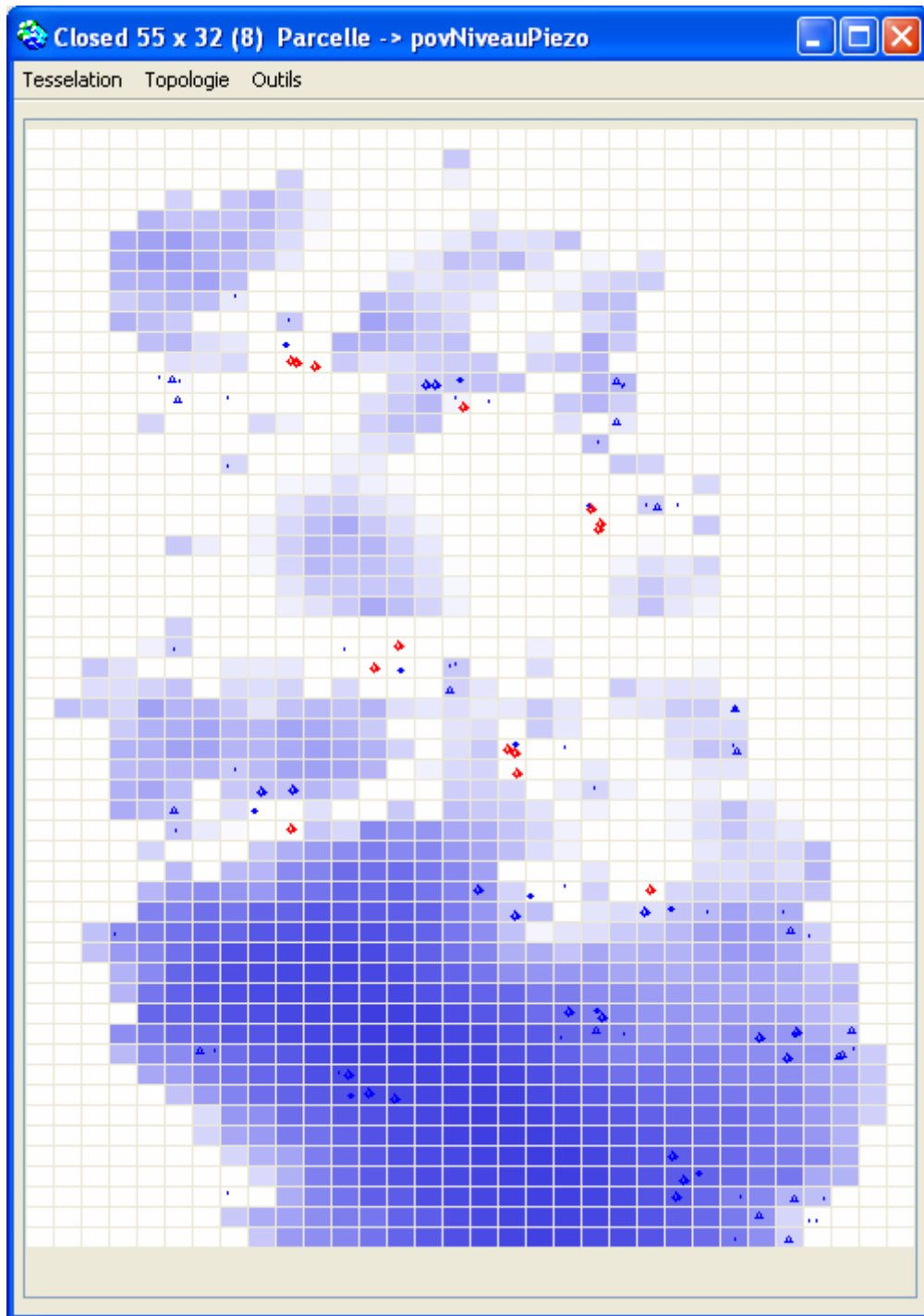


La fenêtre "Climat" permet de contrôler la pluviométrie et la température sur la région étudiée.

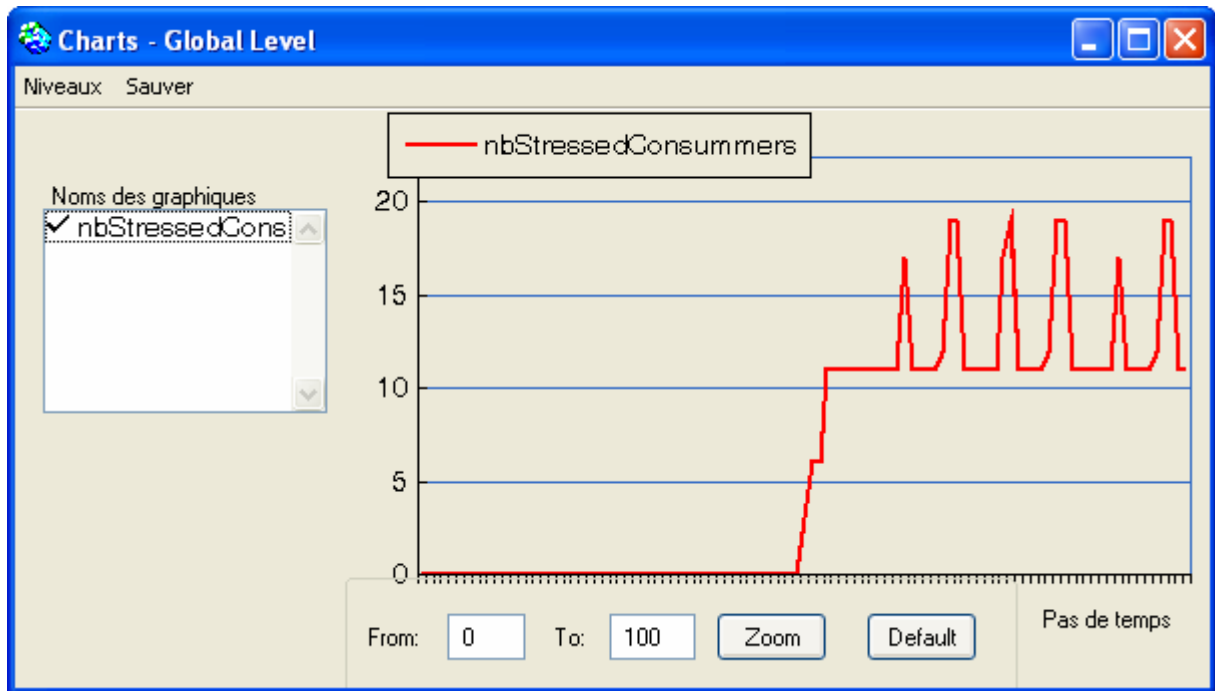


Les fenêtres "Drilling", "Tank", "Hotel" et "Home" permettent d'ajouter de nouveaux agents au cours de l'expérimentation.

- viii. En utilisant l'option visualisation de la fenêtre "Cormas" l'expérimentateur peut suivre en temps réel l'état des agents sur une grille représentant le Cap Corse et obtenir les graphiques correspondant aux sondes qu'il a sélectionnées à la phase d'initialisation.



Visualisation de l'espace au cours d'une expérimentation, l'expérimentateur peut choisir le pont de vue en utilisant le menu contextuel obtenu en faisant un clic droit sur la grille.



Suivi en temps réel de l'évolution d'une sonde.

9.4 Annexe 4 : Structure de la base de données géographique

