Méthodologie et outils pour la simulation multiagent dans des univers virtuels

Stéphane Galland

▶ **To cite this version:**

Stéphane Galland. Méthodologie et outils pour la simulation multiagent dans des univers virtuels. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Franche-Comté, 2013. tel-00936334

HAL Id: tel-00936334
https://theses.hal.science/tel-00936334

Submitted on 24 Jan 2014

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

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

SPIM

Habilitation à Diriger des Recherches

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UFC UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Méthodologie et outils pour la simulation multiagent dans des univers virtuels

STÉPHANE GALLAND

utbm université de technologie Belfort-Montbéliard

IRTES sciences & ingénierie
Institut de Recherche sur les Transports, l'Énergie et la Société

SPIM

Habilitation à Diriger des Recherches

UFC

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

de l'Université de Franche-Comté

préparée au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

présentée par

STÉPHANE GALLAND

Méthodologie et outils pour la simulation multiagent dans des univers virtuels

Soutenue publiquement le 11 décembre 2013 devant le Jury composé de :

RENÉ MANDIAU	Président	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
CYRILLE BERTELLE	Rapporteur	Professeur à l'Université du Havre
OLIVIER BOISSIER	Rapporteur	Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
MARIE-PIERRE GLEIZES	Rapporteur	Professeur à l'Université Sabatier de Toulouse
FRANÇOIS CHARPILLET	Examinateur	Directeur de Recherche à l'INRIA de Nancy
VINCENT HILAIRE	Examinateur	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
ABDERRAFIAA KOUKAM	Examinateur	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

« [...] chaque être organisé forme un système unique dont toutes les parties se correspondent mutuellement ; que, puisque chaque animal est un ensemble plein d'harmonie, aucun des organes ne saurait changer sans que les autres changent ; et que, par conséquent, on peut juger de tout animal par un de ses organes, et du tout ensemble par une de ses parties[...] »

GEORGES CUVIER (1769–1832)

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences.
Professeur au Muséum d'histoire naturelle.
Fondateur de la paléontologie scientifique
et promotteur de l'anatomie comparée.

Né à Montbéliard, Franche-Comté.

« Dans la vie, il faut s'acharner. S'acharner comme un perdu sur le but poursuivi. On souffre. On est malheureux. On reçoit des coups. Et si on persiste, on passe. Et la récompense est toujours royale. »

ÉTIENNE ŒHMICHEN (1886–1955)

Professeur d'aérolocomotion mécanique
et biologie au Collège de France.
Pionnier de l'aviation à voilures tournantes
et précurseur de la biomécanique.

Premier kilomètre en circuit fermé
en hélicoptère à Arbouans, Franche-Comté.

REMERCIEMENTS

C'est avec très grand plaisir que je souhaite remercier tous ceux qui m'ont aidé ou soutenu durant les dix dernières années de ma carrière, que résume ce mémoire.

Je remercie RENÉ MANDIAU de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury ; ainsi que MARIE-PIERRE GLEIZES, CYRILLE BERTELLE et OLIVIER BOISSIER d'avoir accepté la lourde tâche de rapporteur ; et FRANÇOIS CHARPILLET d'avoir participer à mon jury et évaluer mon travail. Nos échanges ont confirmé ou ouvert des perspectives passionnantes.

ABDERRAFIAA KOUKAM m'a recruté dans son équipe. Je le remercie pour la liberté d'action et la confiance qu'il m'a accordées. Je fais partie des nombreux chercheurs qui lui doivent leur carrière et qui partagent des valeurs qu'il aura transmises par ses conseils et son exemple. Je lui suis profondément reconnaissant pour tout ce qu'il a fait et continue à faire pour moi.

VINCENT HILAIRE a été le premier à avoir proposé une approche organisationnelle dans notre laboratoire. Ses qualités scientifiques et humaines ont été autant d'inspirations pour gérer mes activités de recherche. C'est avec un grand plaisir que je le remercie d'avoir accepté de participer à mon jury.

NICOLAS GAUD a été mon premier doctorant. Je garderai un souvenir impérissable de notre expérience, étalonnant mes exigences pour le « malheur » de ses successeurs. Je tiens également à le remercier profondément pour son amitié, son soutien et sa présence durant ces années de labeur. Il est un pilier de notre équipe de recherche, initiateur et architecte de nombreuses idées qui ont contribué aux travaux de recherche présentés dans ce mémoire.

SEBASTIAN RODRIGUEZ est une inspiration pour ses qualités scientifiques et humaines. Architecte des premiers modèles holoniques dans notre laboratoire, sans lui, les travaux présentés dans ce mémoire n'auraient pas vu le jour. Je le remercie pour m'avoir permis de découvrir sa culture et son pays : l'Argentine. Mon amitié lui est acquise, ainsi qu'à sa famille.

Je remercie DAVID, DAVY, JOLECYN, MICHAËL, OLIVIER, PHILIPPE et RENAN sans qui la vie au laboratoire et à l'extérieur n'aurait pas eu ce « je ne sais quoi » éminemment agréable et divertissant. N'est-ce pas PHILIPPE !

Merci à ARIANE, CINDY, FABRICE, FRANCK, FRÉDÉRICK, GILLIAN, JALIL, PABLO et YASSINE ; nos petites causeries au coin café et ailleurs resteront des instants privilégiés. Merci à ANSAR, CHRISTOPHE, LUK, MASSIMO et THOMAS pour nos collaborations et échanges scientifiques vivifiants.

Une pensée pour mon fils ARTHUR, sans qui rien n'aurait été possible, pour Ève, source de maintes émotions, ainsi que pour AURORE, CHRISTELLE, DELPHINE, JEAN-CLAUDE, JEAN-FRANÇOIS, JÉRÔME, JOSETTE, MARIE-CLAUDE et tous mes autres proches, pour leur patience, leur amour et leurs encouragements durant cette dernière décennie. Merci infiniment.

SOMMAIRE

I Introduction 1

1 Introduction 3

1.1 Contexte . . . 3

1.1.1 Historique . . . 3

1.1.2 Contexte et Problématique . . . 3

1.2 Contributions . . . 5

1.2.1 Métamodèle et méthododologie pour la modélisation de systèmes complexes . . . 6

1.2.2 Simulation de foules dans un univers virtuel . . . 7

1.2.3 Évaluation des modèles multiniveaux . . . 7

1.2.4 Outils et environnement de simulation . . . 8

1.3 Organisation du mémoire . . . 8

II Modélisation organisationnelle et holonique de systèmes complexes 11

2 Métamodèle organisationnel et systèmes multiagents holoniques 13

2.1 Introduction . . . 13

2.2 Métamodèle organisationnel CRIO . . . 14

2.3 Approche MDA pour structurer le métamodèle CRIO . . . 15

2.4 Domaine du problème de CRIO . . . 16

2.4.1 Ontologie : représentation des connaissances liées au problème . . . 16

2.4.2 Organisation, rôle et interaction : décomposition comportementale d'un système . . . 18

2.4.3 Capacité : description des compétences d'une organisation ou d'un agent . . . 21

2.5 Domaine agent de CRIO . . . 24

2.5.1 Principes de la modélisation organisationnelle d'un SMAH . . . 24

2.5.2 De l'organisation au groupe . . . 25

2.5.3 De l'agent : une entité autonome et organisationnelle . . . 26

2.5.4 Au holon : un agent hiérarchiquement décomposé . . . 27

2.5.5 Service : réalisation des capacités d'un holon 35
2.6 Conclusion 38

3 Processus méthodologique ASPECS 41
3.1 Introduction 41
3.2 Motivations 42
3.3 Processus ASPECS 42
3.4 Activités du processus ASPECS 44
3.5 Fragments de méthode 44
3.6 Vers un outil d'ingénierie logicielle pour ASPECS 46
3.7 Conclusion 47

4 Plate-forme JANUS 49
4.1 Introduction 49
4.2 Pourquoi une nouvelle plate-forme ? 49
4.3 Métamodèle implanté dans JANUS 50
4.4 Architecture de la plate-forme 52
4.5 Conclusion 54

III Modélisation et simulation d'univers virtuels 57

5 Simulation d'individus dans des univers virtuels 59
5.1 Introduction 59
5.2 Vue général sur le modèle de simulation 61
5.3 Modèle de l'environnement 62
5.3.1 Missions de l'environnement 63
5.3.2 Vue générale du modèle de l'environnement 63
5.3.3 Vers un modèle organisationnel et holonique de l'environnement . . 67
5.3.4 Vers un modèle informé de l'environnement 70
5.4 Modèle des individus 73
5.5 Vers l'évaluation de la cohérence d'une simulation multiniveau 74
5.6 Plate-formes JASIM et Simulate® 76
5.7 Conclusion 78

6 Applications aux domaines du transport et de la mobilité 79
6.1 Introduction 79

6.2 Modélisation et évaluation d'un réseau de bus 80
6.2.1 Modélisation d'un réseau transport public 81
6.2.2 Évaluation du réseau de transport 82
6.2.3 Collecte d'informations dans les bus 83
6.3 Simulation des déplacements d'individus dans une ville 84
6.3.1 Modèle d'évitement de collision 85
6.3.2 Application à l'aménagement du centre-ville de Belfort 87
6.4 Modélisation et simulation du processus de covoiturage 88
6.4.1 Recherche et sélection de partenaires 89
6.4.2 Négociation du covoiturage 91
6.4.3 Réalisation des trajets de covoiturage ou en véhicule personnel . . . 91
6.5 Conclusion 92

IV Conclusion et Perspectives 95

7 Conclusion 97
7.1 Bilan 97
7.2 Perspectives 98

V Annexes 101

A Curriculum Vitæ 103
A.1 Thématique de la thèse 104
A.2 Activités de recherche après la thèse 105
A.2.1 Axe 1 : Métamodèles, méthodes et outils pour la modélisation et la simulation multiagent de systèmes complexes 106
A.2.2 Axe 2 : Modèles pour la simulation d'individus dans des d'environnements virtuels 3D 107
A.2.3 Axe 3 : Applications aux domaines du transport et de la mobilité . . 108
A.3 Perspectives 109
A.3.1 Axe 1 : Métamodèles et méthodes pour l'analyse, la conception et la programmation orientée-agent 110
A.3.2 Axe 2 : Modèles multiniveaux pour la simulation d'individus en environnement informé 3D 110
A.3.3 Axe 3 : Modèles de simulation pour le LUTI et le covoiturage 111
A.4 Insertion dans l'équipe de recherche 111

A.4.1 Animation de la recherche . . . 111
A.4.2 Coopération . . . 112
A.4.3 Contrats de recherche . . . 112
A.4.4 Brevets, dépôts logiciels et transferts de technologie . . . 114
A.4.5 Organisation de manifestations . . . 115
A.4.6 Insertion dans des réseaux . . . 115
A.4.7 Expertises, Invitations . . . 116
A.5 Encadrement . . . 117
A.5.1 Thèses soutenues . . . 117
A.5.2 Thèses en-cours . . . 117
A.5.3 Stages de recherche . . . 117
A.6 Autres activités . . . 118
A.6.1 Activités d'intérêt collectif . . . 118
A.6.2 Activités d'enseignement . . . 118

B Liste des publications de l'auteur 121

B.1 Journaux internationaux avec comités de lecture . . . 121
B.2 Chapitres de livres . . . 122
B.3 Conférences internationales avec comités de lecture et publiées dans Lecture Notes . . . 122
B.4 Conférences internationales avec comités de lecture . . . 123
B.5 Conférences nationales avec comités de lecture . . . 126
B.6 Conférences nationales sans comité de lecture . . . 126
B.7 Thèses et mémoires . . . 126
B.8 Autres publications . . . 126

I

INTRODUCTION

1

INTRODUCTION

1.1/ CONTEXTE

Avant de présenter le contexte et l'objectif de nos travaux, il me paraît utile de dresser un bref historique retraçant les différentes étapes qui ont marqué l'évolution de mes activités de recherche.

1.1.1/ HISTORIQUE

Après une thèse de doctorat préparée au sein de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE) et soutenue en décembre 2001, la suite de mes activités s'est déroulée à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Ma thèse a consisté en la proposition d'une méthodologie permettant la modélisation et la simulation de systèmes industriels composés de plusieurs entités autonomes et en interaction (groupement d'entreprises, entreprises virtuelles, ...) Cette méthodologie est basée sur un métamodèle décrivant les concepts associés à ces systèmes, selon une perspective systémique. La nécessité de simuler le sous-système décisionnel, en plus des sous-systèmes physique et informationnel, m'a poussé à proposer un modèle multiagent pour modéliser et simuler conjointement ces trois différentes vues. À mon arrivée à l'UTBM, une nouvelle thématique transversale a émergé au sein du laboratoire Systèmes et Transports : la simulation en environnement virtuel utilisant une plate-forme immersive 3D (ou plate-forme de réalité virtuelle). L'équipe « Systèmes Multiagents », par mon intermédiaire, s'est dès lors intéressée aux problématiques scientifiques et technologiques liées à la simulation en temps réel de systèmes et d'applications traitant de la mobilité des individus dans un univers virtuel. Ces systèmes étant complexes par nature, nous nous sommes particulièrement intéressés aux problématiques de leur modélisation en utilisant une approche organisationnelle et holonique. Dans ce mémoire, seuls les travaux postérieurs à ma thèse sont présentés.

1.1.2/ CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

La modélisation de la dynamique des piétons, des cyclistes et des conducteurs de véhicules est d'un grand intérêt théorique et pratique. Au cours des deux dernières décennies, la recherche dans un large éventail de domaines tels que l'infographie, la physique, la robotique, les sciences sociales, la sécurité et les systèmes de formation

a montré l'intérêt des simulations impliquant des entités de types hétérogènes (piétons, cyclistes, ...)

Deux grandes catégories de simulations d'individus dans des univers virtuels peuvent être distinguées selon qu'elles cherchent à atteindre un haut niveau de réalisme de comportement (simulation pour la sécurité ou les sciences sociales) ou une visualisation de haute qualité (productions de films, de jeux vidéos, d'outils de réalité virtuelle) [Thalmann and Musse, 2007]. Dans la première catégorie, les résultats de simulation sont généralement cohérents avec les observations réalisées sur la population réelle et peuvent servir de base à des études théoriques pour l'évaluation et la prévision des comportements des individus. Dans la seconde catégorie, les modèles de comportement ne sont pas la priorité et ne correspondent pas quantitativement au monde réel. Cependant, les individus sont des personnages en 3D entièrement animés et les utilisateurs de l'application peuvent avoir un degré élevé d'interaction avec ces éléments de la simulation. Les recherches et les applications récentes tendent à unifier ces deux catégories, en particulier dans le domaine des systèmes de formation où les deux aspects sont nécessaires pour une formation efficace.

Dans ce cadre, [Thalmann et al., 2009] propose une synthèse des défis théoriques et pratiques que l'on peut résumer par un ensemble de questions récurrentes :

1 - Génération d'individus virtuels: Comment générer une population d'individus possédant des propriétés physiques hétérogènes ? [Goto et al., 2001, Seo et al., 2002, Braun et al., 2003]

2 - Animation et mouvements des individus: Comment peut se déplacer chaque individu au sein de l'univers de manière réaliste et en tenant compte des objets statiques et dynamiques ? Comment peuvent se déplacer de manière coordonnée les individus formant un groupe ? [Ashida et al., 2001, Goldenstein et al., 2001, Anderson et al., 2003, Lamarche and Donikian, 2004, Braun et al., 2005, Van den Berg et al., 2008, Buisson et al., 2013]

3 - Génération de comportements individuels et collectifs: Comment peut réagir une population aux changements pouvant survenir dans son environnement ? Comment peut intéragir chaque individu avec ses voisins, et avoir une activité sociale avec eux ? [Reynolds, 1987, Tu and Terzopoulos, 1994, Hodgins and Brogan, 1994, Bouvier et al., 1997, Brogan and Hodgins, 1997, Reynolds, 1999, Musse and Thalmann, 2001, Ulicny and Thalmann, 2002, Niederberger and Gross, 2003, Galland et al., 2009, Razavi et al., 2011b]

4 - Modélisation de l'environnement virtuel: Quels aspects de l'univers (ou l'environnement virtuel) doivent être modélisés ? Quel est le modèle pouvant supporter efficacement l'ensemble des comportements des individus ? Comment générer efficacement les perceptions dans l'univers virtuel pour chaque individu ? Comment appliquer correctement les actions des individus tout en respectant l'intégrité de l'environnement ? [Farenc et al., 1999a, Bayazit et al., 2002, Kallmann et al., 2003, Loscos et al., 2003, Paiva et al., 2005, Gaud, 2007, Galland et al., 2009, Demange et al., 2010b, Behe et al., 2014a]

5 - Interaction avec la population virtuelle: Quelles informations doivent échanger un humain réel, immergé dans l'univers virtuel, et la population synthétique ? Comment mettre en œuvre ces interactions ? Quelle est la métaphore la plus appropriée pour « diriger » la population synthétique ? [Farenc et al., 1999b, Ulicny et al., 2004]

6 - Affichage des individus dans l'univers virtuel: Comment afficher de nombreux individus animés avec le minimum de latence ? Comment afficher une grande variété d'apparences ? [Aubel et al., 2000, Loscos et al., 2001, Tecchia et al., 2002, Wand and Strasser, 2002, Heras et al., 2005, Courty and Musse, 2005, Pettré et al., 2006]

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrivent principalement dans les défis 2, 3 et 4.

Les systèmes multiagents (SMA) proposent un paradigme prometteur pour l'analyse, la conception et l'implantation des systèmes complexes [Ferber, 1995, Jennings and Wooldridge, 1998, Jennings, 2001, Bergenti et al., 2004, Henderson-Sellers and Giorgini, 2005]. Les systèmes multiagents sont considérés comme des sociétés composées d'entités autonomes et indépendantes, appelées agents, qui interagissent en vue de résoudre un problème ou de réaliser collectivement une tâche. Grâce à la généricité de ces concepts, les domaines d'application des SMA sont vastes [Jennings and Wooldridge, 1998]. Les SMA offrent aussi un bon cadre pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes. Notamment, les travaux dans le domaine de la simulation de foules (cités sur la page précédente) illustrent l'usage quasiment systématique des SMA. Toutefois, pour qu'un nouveau paradigme d'ingénierie logicielle soit pleinement appliqué, il faut disposer d'abstractions et de modèles appropriés [Zambonelli et al., 2003]. Pour répondre à cette problématique d'ingénierie, trois approches ont été proposées : (i) la définition de systèmes et d'architectures d'agents spécifiques à un problème ou à une classe de problèmes [Ferber and Gutknecht, 1998] ; (ii) l'utilisation d'abstractions et de méthodes existantes, notamment celles dédiées au paradigme objet [Bergenti and Poggi, 2000, Iglesias et al., 1999] ; et (iii) la définition d'abstractions appropriées pour les SMA. Nos travaux se situent principalement dans ce dernier type d'approche. En effet, nous proposons dans ce mémoire des abstractions fondées sur les concepts organisationnels et holoniques.

Parallèlement à ces travaux sur les méthodologies de modélisation et de simulation, nous nous intéressons à deux problématiques transversales : la mise à l'échelle des modèles et les performances des outils de simulation associés. En effet, avec la complexité croissante des systèmes, la mise à l'échelle d'un modèle et les performances de son implantation deviennent des problèmes cruciaux et conditionnent la capacité de ce modèle à représenter la complexité du système [Pawlaszczyk and Strassburger, 2009].

1.2/ CONTRIBUTIONS

Nous nous plaçons dans le cadre de l'ingénierie logicielle pour la simulation multiagent dans des univers virtuels. La figure 1.1 schématise les contributions [1] présentées dans ce mémoire.

Les axes verticaux constituent trois points de vue sur le système étudié : l'environnement situé et informé, les individus, et les groupes d'individus. Chacun de ces points s'intéresse à l'une des problématiques citées ci-dessus par [Thalmann et al., 2009]. L'environnement est communément considéré comme l'une des parties essentielles d'une simulation multiagent [Michel, 2004]. Les instances d'environnements utilisées dans

1. Les parties grisées ne sont pas présentées dans ce mémoire. Elles correspondent à de travaux en cours dans notre équipe de recherche.

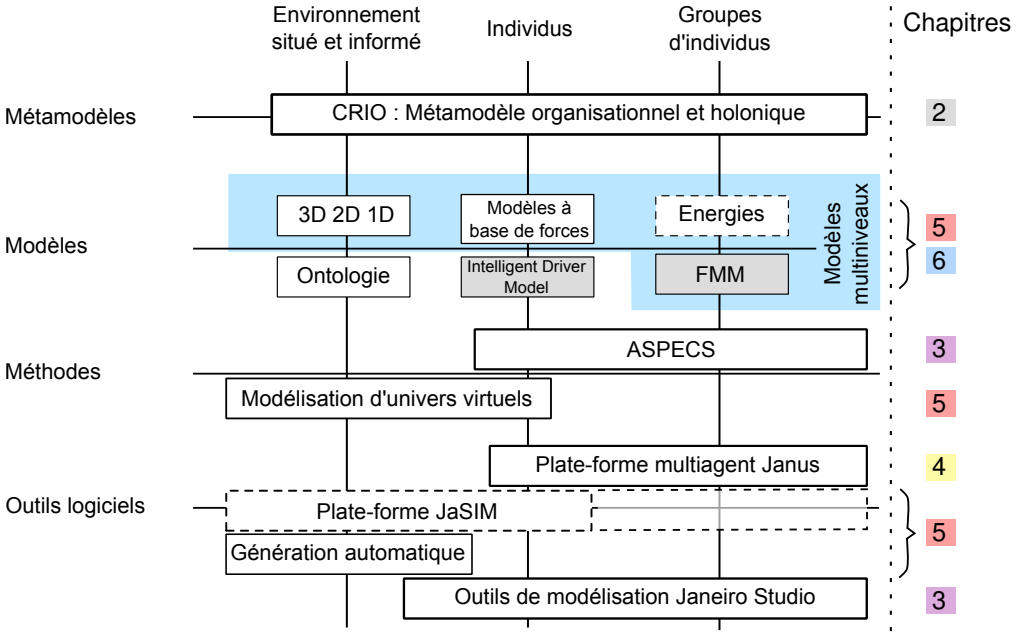


FIGURE 1.1 – Aperçu des contributions

nos travaux sont des cas particuliers d'« environnements physiques » [Odell et al., 2002, Weyns et al., 2005]. La notion d'« environnement physique » se réfère à la classe de systèmes dans laquelle les agents, ainsi que les objets, disposent d'une position explicite et produisent des actions, elles aussi localisées [Ferber and Müller, 1996]. La compréhension et l'analyse des comportements et des phénomènes liés à des individus ou des foules se déplaçant dans un univers virtuel nécessitent l'élaboration de modèles liés aux individus d'une part, et aux groupes d'individus d'autre part [Thalmann and Musse, 2007]. Les modèles appartenant à la première catégorie se focalisent sur les comportements de sélection d'actions et de mise en œuvre de ces actions par chaque individu. Nos travaux sur ces modèles s'intéressent également aux interactions entre un individu et son environnement et à la stigmergie [2] entre les individus. Les modèles relevant de la seconde catégorie s'intéressent particulièrement aux interactions physiques et sociales entre les individus et à la modélisation des comportements collectifs résultants.

Si les axes verticaux représentent les différentes parties des systèmes étudiés dans nos travaux, les axes horizontaux représentent les différents niveaux d'abstraction qui ont été abordés : métamodèle, modèles, méthodologie et outils.

Les sections suivantes présentent nos quatres contributions principales. Nous nous intéressons à la modélisation de systèmes complexes avec une approche organisationnelle et le paradigme de systèmes multiagent. Les résultats de ces travaux ont été utilisés pour la modélisation de foules dans des univers virtuels et leur simulation multiniveau. Afin d'évaluer la qualité des niveaux d'abstraction constituant nos modèles de simulation, nous proposons une approche d'évaluation inspirée de la physique. Enfin, nous fournis-

2. Le terme fut introduit par le biologiste français PIERRE-PAUL GRASSÉ en 1959, en référence au comportement des termites. Il le définit comme : « Stimulation des travailleurs par l'œuvre qu'ils réalisent. » Ce terme exprime la notion que les actions d'un agent laissent des signes dans l'environnement, signes perçus par lui-même et les autres agents et qui déterminent leurs prochaines actions [Parunak, 2003]

sons un ensemble d'outils logiciels dédiés.

1.2.1/ MÉTAMODÈLE ET MÉTHODODOLOGIE POUR LA MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES

Nous proposons un ensemble de concepts organisationnels permettant de décomposer un SMA en unités de comportement en interaction, appelées *rôles*. Ces concepts sont regroupés au sein du métamodèle CRIO (Capacité, Rôle, Interaction, Organisation). L'étude des systèmes complexes nous a conduit au paradigme holonique. Notre contribution dans ce cadre consiste en la définition d'une approche organisationnelle pour l'ingénierie de systèmes multiagent holoniques (SMAH). Pour ce faire, nous avons raffiné les concepts de CRIO pour la modélisation des agents et ajouté des concepts liés aux agents holoniques (ou holons). Le concept de capacité introduit dans CRIO a pour double objectif de décrire les compétences et le savoir-faire d'un comportement (rôle ou organisation), et ce qu'un rôle requiert pour mettre en œuvre son comportement. Ces aspects duaux permettent la mise en relation des rôles et des organisations à différents niveaux d'abstraction, et ainsi de construire une hiérarchie holonique (ou holarchie).

Nous avons également exploré le domaine des méthodes afin de proposer une approche méthodologique basée sur les abstractions définies dans CRIO. Cette méthododologie, appelée ASPECS, est essentiellement dédiée aux SMAH. Elle propose un processus allant de l'analyse à l'implantation et au déploiement. ASPECS est une méthodologie fondée sur l'ingénierie dirigée par les modèles.

1.2.2/ SIMULATION DE FOULES DANS UN UNIVERS VIRTUEL

La modélisation d'individus, de foules et de leurs environnements virtuels a été étudiée par notre équipe de recherche.

Dans ce cadre, nous proposons une approche de modélisation organisationnelle et multiniveau des aspects structurels et dynamiques de l'environnement. Cette vision nous permet de répondre à la problématique de mise à l'échelle du système en tentant de déterminer dynamiquement le meilleur compromis entre la qualité des entrées-sorties de l'environnement et les performances de calcul nous permettant de les obtenir. De plus, la qualité des comportements des individus immergés dans l'environnement dépend en partie de la qualité et de la précision de l'information dans celui-ci. Nous proposons d'intégrer la définition sémantique des objets constituant l'environnement en introduisant une ontologie respectant un standard reconnu. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser un standard ISO dans le domaine de l'architecture et de la construction de bâtiments : les ``*Industry Foundation Classes*´´. Ce standard nous permet de fournir une information précise et pertinente aux individus se déplaçant dans un bâtiment. De plus, les informations décrites dans ce standard permettent de construire automatiquement les bâtiments d'un univers virtuel. Son usage, en collaboration avec des systèmes d'information géographique et des modèles numériques de terrain, permet de construire de manière semi automatique un environnement urbain virtuel.

Pour concevoir le comportement des entités, nous proposons des modèles à base de forces permettant de calculer les déplacements à court terme des individus tout en minimisant les approximations de calcul des trajectoires rendant souvent les modèles exis-

tants moins réalistes. Nous proposons un cadre unique pour modéliser des piétons et des cyclistes. Afin de répondre à la problématique de mise à l'échelle, une approche de modélisation organisationnelle et multiniveau de la population d'entités est utilisée. Les modèles de comportement des individus sont adaptés aux niveaux supérieurs d'abstraction (groupes d'individus, groupes de groupes, ...) en appliquant le principe d'auto-similarité des holons.

1.2.3/ ÉVALUATION DES MODÈLES MULTINIVEAUX

Dès lors que l'on considère différents niveaux d'abstraction au sein d'une même simulation, la question de la transition entre ces niveaux devient cruciale. Nous proposons une approche basée sur la physique (énergies cinétique, potentielle de l'objectif, potentielle de contrainte) pour évaluer la « qualité » d'un modèle de simulation multiniveau : individu, groupe d'individus, groupes de groupes, ... En comparant dynamiquement ces énergies entre elles, il devient possible de sélectionner le niveau d'abstraction fournissant le meilleur compromis entre la qualité des résultats de simulation et les temps de calcul. Enfin, nous avons également exploré la possibilité d'utiliser la ``*Fast Multipole Method*'' dans le cadre de la simulation de groupes d'individus [Razavi et al., 2012].

1.2.4/ OUTILS ET ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

L'ensemble de nos propositions a fait l'objet d'outils logiciels dédiés. Ils ont permis de faire des preuves de concepts et ont servi de composants pour construire des prototypes et des logiciels dans le cadre de nos contrats de recherche. JANUS est une plate-forme de développement de SMA supportant nativement les concepts du métamodèle CRIO. La plate-forme JASIM propose une implantation des modèles d'univers virtuels en liaison avec JANUS. Ces univers sont partiellement générés par des outils logiciels collationnant diverses sources d'informations (systèmes d'information géographique, modèles numériques de terrain, ...) Enfin, nous proposons un prototype d'outil de modélisation, appelé JANEIRO STUDIO, basé sur le métamodèle CRIO et supportant le processus de la méthodologie ASPECS.

1.3/ ORGANISATION DU MÉMOIRE

Ce mémoire est structuré comme suit :

- La **partie II** présente nos travaux relatifs à la modélisation de systèmes complexes en utilisant une approche organisationnelle et holonique. Cette partie est constituée des trois chapitres suivants.
  - Le chapitre 2 décrit les concepts organisationnels qui sont au cœur de nos travaux. Ces concepts sont utilisés pour modéliser les systèmes en termes d'organisation composées de rôles en interaction. Ce chapitre propose également une infrastructure pour modéliser des systèmes multiagents holoniques. Les concepts, la structure et la dynamique d'un système multiagent holonique sont détaillés.
  - Le chapitre 3 pose la base de la méthodologie ASPECS. Elle est issue d'un travail initial concernant l'analyse et la conception de SMA holoniques dans un cadre

général, et est le résultat d'une collaboration avec l'équipe de recherche de MASSIMO COSSENTINO.
  - Le chapitre 4 décrit la plate-forme JANUS. Elle permet l'implantation, le déploiement et l'exécution de systèmes multiagents holoniques et organisationnels. Les concepts présentés dans les chapitres qui précèdent y sont directement implantés.

- La **partie III** résume nos travaux concernant la modélisation et la simulation d'individus et de foules dans des univers virtuels. Cette partie est composée des deux chapitres suivants.
  - Le chapitre 5 propose des modèles pour la simulation d'entités autonomes dans un univers virtuel. Les principes et les concepts permettant de modéliser une population virtuelle et l'environnement dans lequel elle évolue sont détaillés. Une approche organisationnelle et holonique est utilisée pour les modéliser. Ces modèles font l'objet d'un contrat de transfert de technologie avec la société Voxelia.
  - Le chapitre 6 décrit les modèles de trois applications venant raffiner et compléter le modèle général présenté dans le chapitre 5 : modélisation et évaluation d'un réseau de transport en commun, simulation de foules sur la Place d'Armes de Belfort, et modélisation et simulation du processus de covoiturage dans les Flandres. Ces trois applications sont issues de collaborations avec le Syndicat Mixte des Transports en Commun, la société Voxelia et l'Institut IMOB, respectivement.

- La **partie IV**, constituée du chapitre 7, conclut ce mémoire et présente quelques pistes de recherches futures.

- Les **annexes de ce mémoire d'habilitation** sont composées des chapitres suivants :
  - L'annexe A présente mon curriculum vitæ.
  - L'annexe B liste mes publications classées par types.
  - Une sélection d'articles scientifiques est présentée dans le document annexe à ce mémoire d'habilitation. Ces annexes sont divisés en deux parties correspondant aux parties II et III du présent mémoire. Les articles présentés permettront au lecteur intéressé d'obtenir des détails sur nos différentes propositions.

II

MODÉLISATION ORGANISATIONNELLE ET HOLONIQUE DE SYSTÈMES COMPLEXES

2

MÉTAMODÈLE ORGANISATIONNEL ET SYSTÈMES MULTIAGENTS HOLONIQUES

2.1/ INTRODUCTION

L'approche organisationnelle est désormais considérée comme une approche adaptée à l'analyse et à la conception des systèmes complexes. En effet, les méthodes orientées-agent ont évolué depuis une vision initiale où le système était essentiellement centré sur l'agent et ses aspects individuels, vers une vision où il est désormais considéré comme une organisation dans laquelle les agents forment des groupes et des hiérarchies, et suivent des règles et des comportements spécifiques [Argente et al., 2006]. Les évolutions des méthodes GAIA [Wooldridge et al., 2000, Zambonelli et al., 2003] et TROPOS [Giunchiglia et al., 2002, Kolp et al., 2006] en sont d'ailleurs les exemples les plus évidents. Dans leur majorité, les méthodes orientées-agent admettent qu'un SMA puisse être conçu comme une société organisée d'individus dans laquelle chaque agent joue des rôles spécifiques et interagit avec d'autres agents [Jennings, 2000, Zambonelli et al., 2003].

Cependant, dans ce contexte, modéliser le fait qu'un groupe d'agents en interaction exhibe, à un certain niveau d'abstraction, un comportement global spécifique et qu'en même temps, ses membres puissent se comporter comme des entités individuelles partiellement indépendantes demeurent des problèmes récurrents. De nombreux travaux ont déjà étudié cette question, et plusieurs modèles ont été proposés dans des domaines très variés [Ferber, 1995, Holland, 1995, Marcenac, 1997, Correa e Silva Fernandes, 2001, Odell et al., 2005]. Les systèmes holoniques offrent une approche permettant de faire cohabiter ces différents niveaux d'abstraction au sein d'un même système [Rodriguez et al., 2011].

Le terme holon a été introduit par le philosophe hongrois ARTHUR KOESTLER en 1967 pour désigner des structures naturelles ou artificielles qui ne sont ni tout ni parties dans un sens absolu [Koestler, 1967]. Selon KOESTLER, un holon doit posséder trois propriétés : (i) être stable, (ii) être autonome, (iii) être coopératif. La stabilité correspond à la capacité d'auto-organisation. L'autonomie désigne l'aptitude pour un agent de prendre des initiatives et d'agir sans intervention extérieure. La coopération implique l'habilité à travailler conjointement avec d'autres holons pour réaliser des

tâches communes. Les systèmes holoniques ont été utilisés dans plusieurs domaines d'applications [Bürckert et al., 1998, Bürckert et al., 2000, Maturana et al., 1999, Brussel et al., 1998, Adam et al., 2002, Ulieru and Geras, 2002]. L'une des propriétés les plus intéressantes des systèmes holoniques, qui constitue l'essence même de leur complexité, est qu'un holon peut être à la fois une entité et une organisation [Rodriguez, 2005a]. Même si l'idée d'agent holonique est déjà largement répandue dans la communauté multiagent, de nombreux métamodèles considèrent encore les agents comme des entités atomiques [Gasser, 1992, Giret and Botti, 2004], les rendant de fait inappropriées aux systèmes multiagents holoniques. Les métamodèles intégrant la notion de holon sont quant à eux généralement associés à un domaine d'application particulier tel que les systèmes holoniques manufacturiers par exemple [Maturana, 1997, Wyns, 1999]. Ce constat est également vérifié concernant les infrastructures telles PROSA [Brussel et al., 1998] et MetaMorph [Maturana et al., 1999].

L'élaboration d'un métamodèle est une première étape en vue de définir une méthodologie de modélisation de systèmes multiagents holoniques. C'est dans ce contexte que nous proposons CRIO (Capacité-Rôle-Interaction-Organisation), un métamodèle fondé sur une approche organisationnelle. CRIO diffère essentiellement d'autres métamodèles organisationnels [Ferber et al., 2004, Ferber and Gutknecht, 1998, Gutknecht, 2001, Hannoun et al., 2000] par la manière de définir le concept de rôle. En effet, le *rôle* est considéré comme une entité fondamentale, présente depuis l'analyse jusqu'à l'implantation. Ce concept de rôle est l'abstraction d'un comportement qui peut être défini indépendamment de l'entité qui le joue. Cette vision spécifique du concept du rôle, et son impact sur la modélisation organisationnelle d'un système constituent la seconde motivation qui justifie la création du métamodèle CRIO, et également du processus méthodologique ASPECS et de la plate-forme JANUS. De plus, certaines des plates-formes d'implantation les plus connues ne supportent pas le concept de rôle : Jade [Bellifemine et al., 2001], FIPA-OS [Poslad et al., 2000] pour n'en citer que quelques-unes.

Nous définissons dans la suite de ce chapitre les principes et les concepts du métamodèle CRIO et de notre cadriciel [1] pour la modélisation de systèmes multiagents holoniques. Le métamodèle CRIO s'inspire de l'approche de développement dirigée par les modèles. Il est divisé en trois parties appellées domaines. Le premier permet de décrire un problème indépendament d'une solution. Le second domaine propose les concepts permettant la proposition d'une solution orientée-agent. Le dernier domaine est relatif à l'implantation de la solution. La seconde partie de ce chapitre est dédiée aux concepts relatifs à la modélisation des agents et des holons. Elle présente également le cadre permettant de construire des hiérarchies de holons. Cette construction est rendue possible grâce aux concepts organisationnels, et notamment à celui de capacité.

La section 2.2 résume la génèse du métamodèle CRIO. La section 2.3 présente les différents domaines de définition de CRIO. La section 2.4 précise les définitions associées au *domaine du problème*. Le *domaine agent* est présenté dans la section 2.5. La section 2.6 conclut ce chapitre.

1. Au terme anglais ``*framework*´´, nous préférons le terme français « cadriciel », en usage depuis au moins 2000 [Guy, 2000, Barthez et al., 2000]. Les termes synonymes sont « cadre d'applications » (Office québécois de la langue française) et « canevas ».

2.2/ MÉTAMODÈLE ORGANISATIONNEL CRIO

CRIO est un métamodèle organisationnel destiné à la modélisation de systèmes complexes ouverts. Un métamodèle se doit de définir de manière exhaustive l'ensemble des concepts manipulés dans le processus de développement. Le métamodèle CRIO est issu de l'intégration et l'extension de deux métamodèles existants. Le premier, RIO (Rôle-Interaction-Organisation), a été proposé dans [Hilaire, 2000]. Il fut conçu pour la modélisation organisationnelle de systèmes multiagents. Le second est le cadriciel pour la modélisation de systèmes multiagents holoniques, proposé par [Rodriguez, 2005b]. CRIO précise et redéfinit certains des concepts précédemment proposés dans RIO et introduit le concept de Capacité.

2.3/ APPROCHE MDA POUR STRUCTURER LE MÉTAMODÈLE CRIO

CRIO s'inspire de l'approche de développement dirigée par les modèles[2] (ou MDD). Ce type de méthode est de plus en plus utilisé dans l'industrie du logiciel. En témoignent, l'adoption par l'``*Object Management Group*´´ (OMG) en 2003 du standard ``*Model Driven Architecture*´´ [MDA, 2003] et le nombre grandissant d'ateliers de génie logiciel basés sur les principes de cette approche (Eclipse, Borland Together Architect, Codagen Architect, ...). L'approche MDD place la notion de modèle au cœur du processus de conception d'un logiciel et ses principes sont les suivants : (i) spécifier le système cible indépendamment d'une plate-forme d'implantation donnée, (ii) spécifier les plates-formes d'implantation, et déterminer une plate-forme particulière pour le système considéré, (iii) et finalement transformer la spécification du système en une spécification compatible avec la plate-forme choisie.

Sur la base de ces principes, MDA considère trois niveaux de modèles :

– Le modèle indépendant de la solution (CIM[3]) se focalise sur l'environnement du système et la spécification des besoins que le système devra satisfaire. Les détails de la structure et du fonctionnement du système sont cachés ou indéterminés. Le CIM est parfois nommé modèle du domaine. Dans ce type de modèle, un vocabulaire spécifique aux acteurs du domaine de l'application est employé dans la spécification. Le CIM a pour objectif de combler le fossé entre les experts du domaine de l'application et leurs besoins d'une part, et les experts de la conception du système chargés de satisfaire ces besoins d'autre part.
– Le modèle indépendant d'une plate-forme d'implantation (PIM[4]) se concentre sur le fonctionnement d'un système tout en dissimulant les détails nécessaires à son implantation sur une plate-forme particulière. Ce type de modèle décrit la partie de la spécification complète qui ne change pas d'une plate-forme d'implantation à l'autre. Un tel modèle peut employer un langage de modélisation générique ou un langage spécifique au domaine dans lequel le système sera utilisé.
– Le modèle spécifique à une plate-forme (PSM[5]) combine le PIM avec un modèle décrivant les détails de l'utilisation d'une plate-forme d'implantation spécifique.

2. MDD : ``*Model Driven Development*´´
3. CIM :``*Computation Independent Model*´´
4. PIM :``*Platform Independent Model*´´
5. PSM :``*Platform Specific Model*´´

Pour assurer la transition entre ces différents modèles, l'approche MDD définit des transformations entre modèles. Une transformation de modèle consiste à combiner un modèle avec un ensemble d'informations additionnelles, et à appliquer des règles de transformation pour dériver un autre modèle. Le guide MDA de l'OMG [MDA, 2003] décrit ainsi un patron de transformation pour transformer un modèle PIM vers un modèle spécifique à une plate-forme donnée (PSM) (voir figure 2.1).

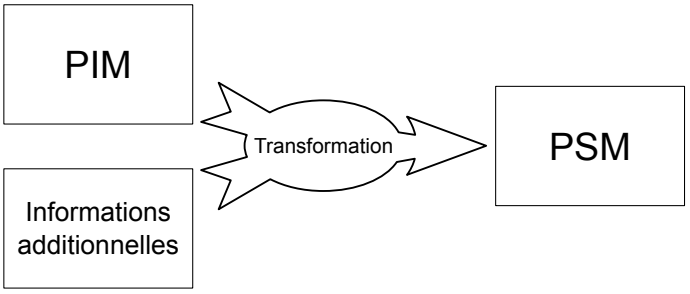


FIGURE 2.1 – Le patron de transformation de PIM vers PSM dans l'approche MDA

Dans la logique de l'approche MDD, CRIO offre trois niveaux de modèles. Chacun de ces trois niveaux est qualifié de domaine [6] :

- **Le domaine du problème (≈CIM)** fournit la description organisationnelle du problème indépendamment d'une solution spécifique. Les concepts introduits dans ce domaine sont principalement utilisés durant la phase d'analyse et au début de la phase de conception du processus de développement.
- **Le domaine agent (≈PIM)** introduit les concepts multiagents et fournit une description d'une solution multiagent, éventuellement holonique, basée sur les éléments du *domaine du problème*. Le *domaine agent* est davantage associé à la fin de la phase de conception.
- **Le domaine de la solution (≈PSM)** est relatif à l'implantation de la solution sur une plate-forme spécifique. Cet aspect est donc dépendant d'une plate-forme de déploiement particulière. Dans le cas présent, cette phase repose sur la plate-forme JANUS qui fut spécifiquement développée pour faciliter l'implantation de modèles organisationnels et holoniques. Les concepts liés à ce domaine ainsi que la plate-forme JANUS sont décrits au chapitre 4 de ce document. Ils ne sont donc pas détaillés dans ce chapitre.

Les concepts définis dans les *domaines du problème* et *agent* sont décrits dans la suite de ce chapitre (respectivement dans les sections 2.4 et 2.5). Une implantation du métamodèle CRIO, correspondant au *domaine de la solution*, est présentée dans le chapitre 4. Tout au long de ce chapitre, la notation UML est utilisée pour décrire les parties du métamodèle et les exemples qui leur sont associés.

2.4/ DOMAINE DU PROBLÈME DE CRIO

La figure 2.2 présente le diagramme UML de la partie du métamodèle CRIO consacrée à la modélisation d'un problème. Le *domaine du problème* introduit les concepts au cœur de

6. en référence au métamodèle de la méthode PASSI, qui constitue également l'une des inspirations pour ces travaux

l'approche proposée : organisation, rôle, interaction, capacité et ontologie. Ces concepts sont présentés dans la suite de cette section.

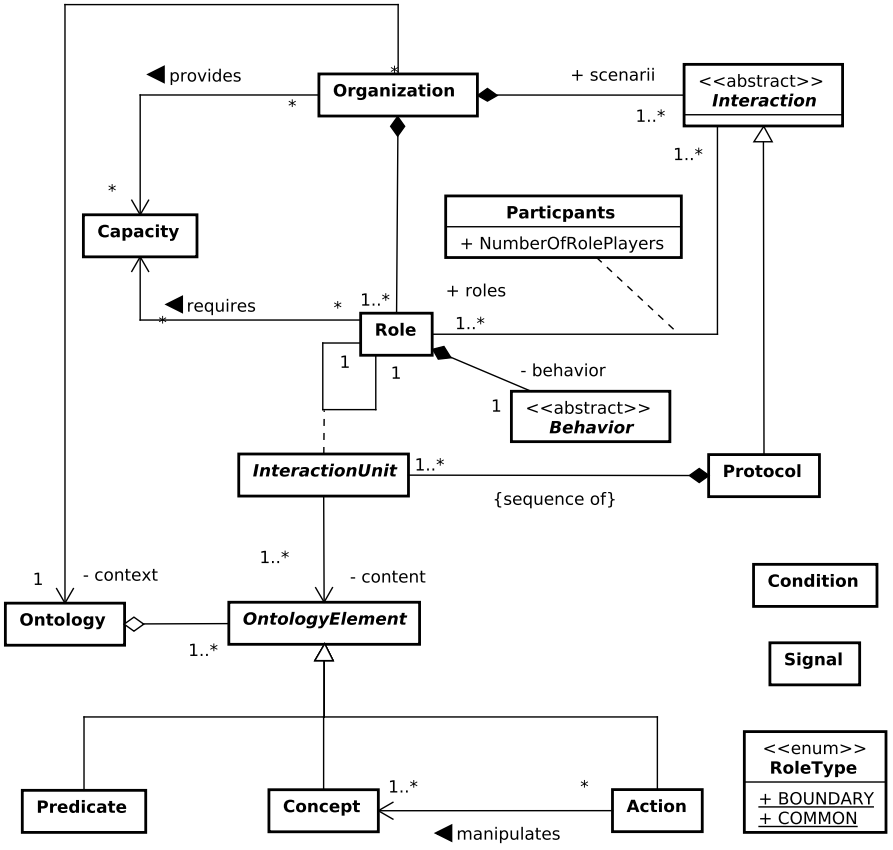


FIGURE 2.2 – Diagramme UML du domaine du problème du métamodèle CRIO

2.4.1/ ONTOLOGIE : REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES LIÉES AU PROBLÈME

L'ontologie (``*Ontology*´´) et les éléments d'ontologie (``*Ontology Element*´´) sont utilisés pour décrire les connaissances du domaine de l'application et définir le contexte des organisations du système. Une ontologie est un ensemble structuré de concepts visant à décrire un ou plusieurs domaines d'étude. Les relations entre concepts peuvent être sémantiques, de composition ou d'héritage.

[Gruber, 1995] fournit une définition générale de la notion d'ontologie : « Une ontologie est la spécification d'une conceptualisation d'un domaine de connaissance ». Dans [Cossentino et al., 2010c, Gaud, 2007], nous adoptons une définition plus opérationnelle, proposée par l'OMG dans le document de spécification ``*Ontology Definition Metamodel*´´ [7] (ODM) : « Une ontologie définit un ensemble de termes et de concepts communs utilisés pour décrire et représenter un domaine de connaissance. Une ontologie peut prendre diverses formes telles qu'une taxonomie (ensemble de connaissances

7. http://www.omg.org/ontology/

avec une hiérarchie minimale), un thésaurus (mots et synonymes), un modèle conceptuel (avec des connaissances plus complexes) ou une théorie logique (avec des connaissances très riches, complexes, consistantes et significatives). Une ontologie bien formée est celle qui est exprimée dans une syntaxe bien définie et qui dispose d'un interpréteur bien précis et conforme avec la définition ci-dessus. »

Dans le métamodèle CRIO, l'ontologie possède une double fonction. Elle permet tout d'abord de rassembler et d'organiser l'ensemble des connaissances disponibles sur le problème et sur son domaine, et de définir le contexte des organisations utilisées pour les modéliser. La structuration des concepts de l'ontologie du problème permet notamment de renseigner le concepteur sur la structure éventuelle du système. Concernant la capitalisation des connaissances du domaine, l'ontologie constitue également une base de connaissances commune à tous les acteurs intervenant dans le développement du système. Elle permet ainsi de regrouper les concepts issus du vocabulaire spécifique des experts du domaine et de les organiser de sorte à faciliter leur compréhension par les équipes chargées de la conception du système.

L'ontologie regroupe également l'ensemble des connaissances pouvant être échangées au cours des interactions entre les rôles qui composent les organisations du système. Dans le *domaine agent*, l'ontologie constitue ainsi la base de connaissances nécessaire à la définition des communications entre les agents.

Une ontologie est composée d'*éléments abstraits* pouvant être (voir figure 2.2) :
- un **concept**, une catégorie ou une abstraction qui abrège et résume une multiplicité d'objets par généralisation de traits communs identifiables.
- une **action** qui est un mécanisme réalisé par un acteur modifiant une ou plusieurs propriétés (et par conséquent leurs états) d'un ou plusieurs concepts récepteurs.
- un **prédicat** qui est une assertion sur les propriétés des concepts.

2.4.2/ ORGANISATION, RÔLE ET INTERACTION : DÉCOMPOSITION COMPORTEMENTALE D'UN SYSTÈME

L'organisation est, avec l'interaction, l'un des concepts clefs des systèmes multiagents. D'ailleurs, ces deux concepts sont intrinsèquement liés. L'interaction a lieu au sein d'une organisation. Selon [Ferber, 1995], les organisations constituent à la fois le support et la manière dont se déroulent les interactions, c'est-à-dire la façon dont sont réparties les tâches, les informations, les ressources, et la coordination des actions. La vision proposée de l'organisation, présentée dans la définition 1, est très proche de ce que [Ferber, 1995, chap. 3] qualifie de *structure organisationnelle*.

Définition 1 : Organisation, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Une organisation est définie par un ensemble de rôles qui participent à un schéma d'interaction avec d'autres rôles dans un contexte commun. Ce contexte consiste en un partage des connaissances, des règles, de normes sociales, de sentiments sociaux, ... Il est défini selon une ontologie. Le but de l'organisation est de répondre à certains besoins fonctionnels du système modélisé.

Chaque organisation est associée à au moins un besoin fonctionnel qui correspond à l'objectif qu'elle doit satisfaire, à la tâche qu'elle doit effectuer, ou au comportement global qu'elle doit exhiber. L'objectif de chaque organisation est donc de satisfaire les différents

besoins auxquels elle est associée. Chacun d'entre eux devra être satisfait soit par le comportement individuel de l'un des rôles de l'organisation, soit par le comportement global émergent des interactions de tout ou d'une partie des rôles.

L'organisation étant à la fois le support et la manière de satisfaire un besoin, elle peut être considérée comme la description d'un comportement global auquel devront se plier une ou plusieurs entités, afin de satisfaire les objectifs qui leur sont attribués. Si l'on cherche à étudier ce comportement et à le décomposer d'un point de vue fonctionnel, on obtient un ensemble de comportements de complexité inférieure interagissant pour satisfaire les objectifs associés à l'organisation. Selon le niveau d'abstraction considéré, une organisation peut être vue soit comme un comportement unitaire soit comme un ensemble de comportements en interaction. L'organisation est donc un concept intrinsèquement récursif.

Cette dualité est également présente dans le concept de *holon* comme cela est démontré par [Rodriguez et al., 2011] et résumé dans la section 2.5. Tous deux sont d'ailleurs souvent illustrés par la même analogie : la composition du corps humain. Le corps est considéré d'un certain point de vue comme une entité à part entière disposant d'une identité et d'un comportement propre. Il peut être également considéré comme un agrégat d'organes, eux-mêmes composés de cellules, ... À chaque niveau de cette hiérarchie de composition, des comportements spécifiques apparaissent [Chauvet, 1998]. Le corps dispose d'une identité et d'un comportement unique pour chaque individu. Les organes disposent chacun d'une mission qui leur est propre : filtration pour les reins, extraction de l'oxygène pour les poumons ou encore circulation du sang pour le cœur.

L'organisation est à la fois l'agrégation d'un ensemble de comportements, et un comportement composant une organisation de niveau supérieur ; le tout constituant une hiérarchie de comportements spécifiques avec à chaque niveau des objectifs précis à satisfaire. Cette définition récursive de l'organisation constitue la base du processus d'analyse associé à ASPECS (chapitre 3). Les comportements considérés comme élémentaires à un niveau donné de la hiérarchie sont appelés *rôles*. La définition 2 a été retenue pour définir le concept de *rôle*. Cette vision de l'organisation qui est perçue tantôt comme comportement à part entière, tantôt comme un rôle dans une organisation de niveau d'abstraction supérieur est partagée par d'autres auteurs [Anderson and Reenskaug, 1992, Singh, 1992].

Définition 2 : Rôle, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Un rôle est à la fois un comportement et un ensemble de droits et d'obligations dans le cadre d'une organisation. Le but de chaque rôle est de contribuer totalement ou partiellement à la réalisation des objectifs de l'organisation au sein de laquelle il est défini. Un rôle peut être instancié soit comme un rôle « commun » ou un rôle « frontière » (``*Boundary role*´´). Un rôle commun est un rôle à l'intérieur du système conçu. Il interagie avec des rôles communs ou frontières. Un rôle frontière est un rôle situé à la frontière entre le système et son environnement. Il est responsable des interactions qui se produisent à cette frontière (interaction avec une interface graphique, une base de données, ...)

Chaque rôle est défini dans une et une seule organisation. Dans le contexte de son organisation, un rôle définit un comportement et un statut.

Le statut d'un rôle définit la position de ce dernier au sein de son organisation ainsi qu'un

ensemble de droits et d'obligations pour l'agent qui le joue. Le statut définit également l'interface au travers de laquelle l'agent jouant le rôle est perçu par les autres entités de la même organisation. Il fournit à cet agent le droit d'exercer ses capacités (compétences) dans le contexte de l'organisation et l'obligation de respecter le comportement décrit par le rôle. Le statut d'un rôle est caractérisé par au moins un concept de l'ontologie définissant le contexte de son organisation.

Le comportement d'un rôle fixe les responsabilités qui sont associées au rôle et la méthode pour les satisfaire. Pour définir ce comportement, chaque rôle dispose d'attributs qui lui sont propres. L'objectif d'un rôle est de contribuer, pour toute ou partie, aux besoins associés à l'organisation dans laquelle il est défini. Le comportement d'un rôle est spécifié par un plan comportemental (ou plan de comportement) qui peut être représenté par un diagramme d'activité UML ou un diagramme état-transition (``*state-chart*´´). Un tel plan décrit comment un ou plusieurs objectifs d'un rôle peuvent être satisfaits par son comportement.

L'aspect dual du concept de rôle dans CRIO, combinant statut et comportement, est une différence majeure avec bien des définitions existantes de ce concept. En effet, le rôle est souvent considéré comme une interface au travers de laquelle les autres agents perçoivent l'agent qui le joue. Le rôle est alors assimilé à une sorte de filtre pour l'agent, ce qui correspond à la notion de statut dans l'approche proposée. Dans MESSAGE [Caire et al., 2002] par exemple, la relation entre le rôle et l'agent est considérée comme analogue à celle entre l'*interface* et la *classe* dans les modèles orientés-objet. Dans [Kristensen and Osterbye, 1996], les auteurs nomment cette approche la métaphore du filtre (ou ``*Filter Metaphor*´´) et examinent les problèmes liés à une telle vision : ``*This is mistaken because the filter metaphor implies that the persons has all the properties from the outset, and we choose to see only some of them. This neglects the important meaning behind roles, that the properties are extrinsic, — the person only has them because of the role*´´. Une étude du concept de rôle pour les objets, qui partage d'ailleurs de nombreux points communs avec l'approche présentée ici peut être trouvée dans la thèse de [Graversen, 2006].

De nombreux auteurs s'accordent sur le fait que la complexité des SMA est une conséquence directe de l'interaction entre les agents [Jennings, 2001, Odell, 2002]. La notion d'interaction est fondamentale puisqu'elle permet à un groupe d'agents d'accomplir davantage ensemble que la somme de leurs actions individuelles. Mais l'interaction va également de pair avec la nécessité de coordination et l'émergence de conflits. Une interaction entre rôles est définie de la manière suivante :

Définition 3 : Interaction, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Une interaction est un ensemble dynamique d'événements connus à priori et échangés entre les rôles, ou des rôles et des entités en dehors du système. Les rôles peuvent réagir aux événements en fonction de leurs comportements.

Les interactions survenant entre les rôles au sein d'une organisation sont décrites dans un scénario d'interaction qui est généralement représenté par un diagramme de séquence UML, nommé protocole. Un scénario d'interaction décrit comment un ensemble de rôles interagissent et se coordonnent pour satisfaire un objectif commun, lequel peut lui-même être associé à un rôle de niveau d'abstraction supérieur. Cette association implique de pouvoir faire transiter de l'information entre deux niveaux d'abstraction adjacents. Ce mécanisme est géré dans CRIO par l'utilisation combinée des concepts de

capacité, d'organisation et de services. Il sera présenté à la section 2.5.5.

Les concepts jusqu'alors introduits dans le *domaine du problème* permettent d'assurer l'identification des besoins, et de dresser une première décomposition du système sous la forme d'une hiérarchie d'organisations ; chacune de ces organisations ayant pour objectif de satisfaire un ou plusieurs besoins fonctionnels. Cependant, la phase d'analyse d'un système passe, certes, par l'identification des besoins auxquels il devra répondre, mais également par la délimitation du périmètre du système. Ce périmètre marque la frontière entre le système et son environnement. Il est modélisé par un rôle spécifique qualifié de rôle frontière (``*Boundary Role*´´) et qui est responsable des interactions entre le système et son environnement. Dans CRIO et ASPECS, et contrairement à ce qui est parfois recommandé dans la littérature, aucun modèle global de l'environnement n'est explicitement fourni. En effet, le point de vue adopté sur l'environnement dépend du contexte et de l'organisation considérés. Cette vision est donc distribuée, et le modèle d'environnement l'est également au travers des différentes organisations situées à la frontière du système. Distribuer le point de vue adopté sur l'environnement facilite la distribution des applications dans des environnements hétérogènes et distribués. De plus, l'environnement est par nature à l'extérieur du système, par conséquent seules les parties manipulées par le système ou en interaction avec lui sont effectivement modélisées.

2.4.3/ CAPACITÉ : DESCRIPTION DES COMPÉTENCES D'UNE ORGANISATION OU D'UN AGENT

Les systèmes de grande échelle doivent pouvoir coopérer et fonctionner en environnement ouvert. Les agents impliqués dans de tels systèmes doivent par conséquent collaborer avec d'autres agents, éventuellement intégrés à des systèmes différents, pour satisfaire leurs objectifs. Il en découle que tout agent doit être en mesure d'évaluer les compétences de ses partenaires potentiels et ainsi identifier les collaborateurs les plus appropriés. La notion de capacité fut initialement introduite pour permettre aux agents de raisonner sur leurs propres compétences et celles de leurs collaborateurs de sorte à pouvoir s'adapter et satisfaire des objectifs nouveaux [Rodriguez et al., 2007].

Le but de l'introduction du concept de capacité est de disposer d'un outil permettant de décrire les compétences d'un agent ou d'un groupe d'agents de manière générique, tout en faisant abstraction de l'architecture interne de l'agent (voir définition 4).

Définition 4 : Capacité, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Une capacité est une spécification d'une transformation d'une partie du système conçu ou de son environnement. Cette transformation garantit des propriétés résultantes si le système avant la transformation répond à un ensemble de contraintes. Il peut être considéré comme les spécifications des préconditions et postconditions d'une réalisation d'un objectif.

Les propriétaires de capacités peuvent être des agents, des holons, des rôles ou des organisations. Les utilisateurs sont généralement des rôles ou des organisations.

La capacité possède une double fonction dans le métamodèle CRIO :

1. Elle constitue tout d'abord une interface entre l'agent et le rôle. Elle permet de définir le comportement du rôle en faisant abstraction de l'architecture de l'agent. Cette notion permet d'obtenir des modèles génériques d'organisation. Une capa-

cité représente en effet une compétence d'un agent ou d'un groupe d'agents. Le rôle requiert certaines compétences pour définir son comportement, lesquelles sont modélisées par des capacités. Les capacités peuvent ensuite être invoquées dans l'une des tâches qui composent le comportement du rôle. En contrepartie, une entité qui souhaite accéder à un rôle doit fournir une réalisation concrète (ou implantation) à chacune des capacités exigées par le rôle. Ces relations entre capacité, rôle et agent sont décrites dans la figure 2.3. La relation entre capacité et agent sera approfondie dans le *domaine agent*.

2. La capacité permet également, dans le processus de modélisation, d'effectuer l'interface entre deux niveaux d'abstraction adjacents dans la hiérarchie organisationnelle du système. La figure 2.5 décrit cette seconde fonction de la notion de capacité.

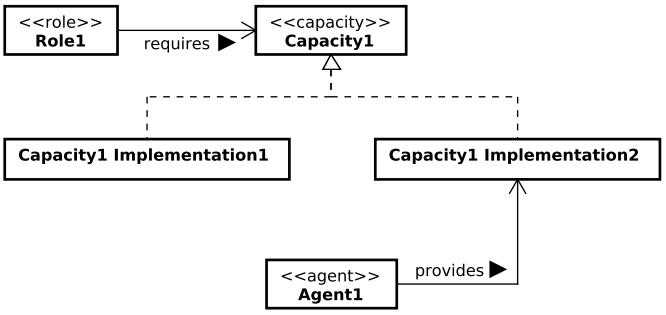


FIGURE 2.3 – Relations entre les concepts de Capacité, de Rôle et d'Agent [Gaud, 2007]

Afin d'illustrer ce double aspect du concept de capacité, considérons la capacité à trouver le plus court chemin dans un graphe pondéré et connexe $\mathcal{G}(N, E)$ depuis un nœud source s vers un nœud destination d (capacité que l'on nommera `TrouverPlusCourtChemin`). La description associée à une telle capacité est présentée dans la figure 2.4. Cette capacité est paramétrée par le graphe $\mathcal{G}$, défini par son ensemble de nœuds N et d'arêtes E pondérées par la fonction w, ainsi que les nœuds source s et destination d du plus court chemin à identifier. Le résultat de cette capacité est matérialisé par le plus court chemin P liant s à d. Ce chemin représente une séquence de nœuds adjacents du graphe. La clause `requiert` précise que les ensembles de nœuds et d'arêtes ne doivent pas être vides. Elle impose également que les nœuds source et destination appartiennent au graphe et que les poids associés aux arêtes soient positifs ou nuls. La clause `garantit`, précise qu'il n'existe aucun chemin Q du graphe, liant s à d, qui soit plus court que P.

La définition d'une `Capacité` ne contient aucune référence aux entités ou groupes d'entités susceptibles de posséder ou d'exhiber ce savoir-faire. Ainsi, la notion de capacité est clairement distincte de la manière dont elle est réalisée. En effet, une capacité décrit ce qu'une entité ou un groupe d'entités est capable de faire, indépendamment de sa réalisation effective. Par exemple, la capacité `TrouverPlusCourtChemin` peut être réalisée de diverses manières. Il est possible d'utiliser l'algorithme de *Dijkstra*, ou celui de *Bellman-Ford* si l'on considère le savoir-faire d'une unique entité. D'autres exemples de réalisations peuvent être apportés, notamment si l'on considère la capacité d'un groupe d'entités, plutôt que celle d'une entité individuelle. En effet, une *Colonie de fourmis* est une organisation connue pour être capable d'offrir une solution au problème du plus court chemin dans un graphe. La solution (le plus court chemin) émerge des interactions entre

- **Nom : :** `TrouverPlusCourtChemin` - `FindShortestPath`
- **Paramètres : :**
  - $\mathcal{G} = (N, E)$, graphe orienté. $E = N \times N$
  - $w : E \rightarrow \mathbb{R}$, fonction de poids.
  - $s \in N$, nœud source.
  - $d \in N$, nœud destination.
- **Résultats : :** $P = \langle s = i_0, i_1, \cdots, i_{n-1}, d = i_n \rangle$, with $\forall k \in \{0..n\}, i_k \in N$
  Le plus court chemin P entre s et d.
- **Requiert : :** $N \neq \emptyset$ et $E \neq \emptyset$ et $\forall (u, v) \in E / w(u, v) \geq 0$
- **Garanti : :** $\forall j_t \in N, t \in \{0..m\}$
  $\nexists\, Q = \langle s = j_0, j_1 \cdots, j_m = d \rangle / P \neq Q \wedge \sum_{t=0}^{m-1} w(j_t, j_{t+1}) < \sum_{k=0}^{n-1} w(i_k, i_{k+1})$
  Il n'existe aucun chemin Q du graphe, liant s à d, plus court que P.
- **Description Textuelle : :** Fournit une solution au problème de plus court chemin à un seul nœud source dans un graphe connexe et pondéré dont le poids lié aux arcs est positif ou nul.

FIGURE 2.4 – La capacité `TrouverPlusCourtChemin` [Gaud, 2007]

fourmis dans leur environnement. En accord avec la description fournie dans la figure 2.4, l'environnement est représenté par le graphe $\mathcal{G}$, le nœud source s est assimilé à la fourmilière, et le nœud destination d à une source de nourriture.

La figure 2.5 présente le diagramme UML des organisations *Colonie de fourmis* et *Calcul de chemin dans un graphe*, et décrit leurs relations. Ces deux organisations se situent à deux niveaux d'abstraction différents :
– le niveau n où le plus court chemin émerge des interactions entre les fourmis ; et
– le niveau $n+1$ où ce plus court chemin est exploité.

Au niveau $n+1$, le rôle `Route Provider` requiert la capacité à trouver le plus court chemin dans un graphe. Cette capacité est ensuite fournie par une organisation située au niveau inférieur dans la hiérarchie. Au niveau n, le comportement global de l'organisation *Colonie de fourmis* fournit la capacité permettant de déterminer le plus court chemin.

Le concept de capacité permet ainsi de définir comment une organisation de niveau n peut contribuer au comportement d'un rôle de niveau $n+1$. La manière précise permettant à une organisation de fournir une capacité n'est pas l'objet du *domaine du problème*. Cet aspect sera raffiné et spécialisé dans le *domaine agent* (cf. section 2.5.5) notamment grâce à l'introduction du concept de service.

En revanche, les conditions nécessaires pour qu'une organisation donnée soit effectivement en mesure de fournir une capacité peuvent d'ores et déjà être précisées, et spécifiées directement sur le diagramme UML représentant la hiérarchie d'organisation du système sous la forme de contraintes OCL [8].

8. OCL :``*Object Constraint Language*´´ [OMG, 2006]

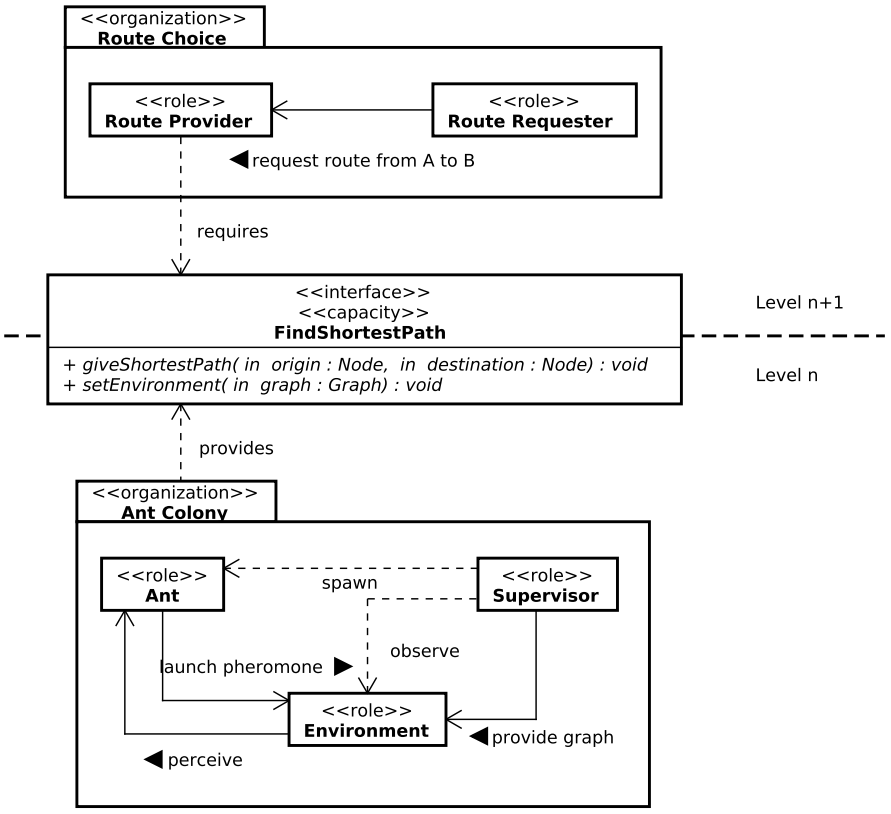


FIGURE 2.5 – Le concept de capacité en tant que charnière entre deux niveaux adjacents d'abstraction [Gaud, 2007]

2.5/ DOMAINE AGENT DE CRIO

Le *domaine du problème* de CRIO permet la modélisation du problème en termes d'organisations, de rôles, de capacités et d'interactions. Le résultat de cette modélisation doit aboutir à la définition d'une hiérarchie d'organisations combinant leurs comportements respectifs pour satisfaire les besoins identifiés. Disposant désormais d'un modèle du problème, l'objectif est alors de concevoir le *modèle d'une solution multiagent*. Il s'agit d'élaborer le modèle d'une société d'agents (ou de holons) capable d'offrir une solution au problème étudié, en décrivant les interactions entre les agents ainsi que leurs éventuelles dépendances. La figure 2.6 présente le diagramme UML du *domaine agent* du métamodèle CRIO.

Les sections suivantes présentent les principes de modélisation et les concepts du métamodèle CRIO appartenant au domaine agent. Le cœur de ce domaine tient évidemment dans la définition des entités qui seront à la base de la solution du problème traité : les agents et les holons.

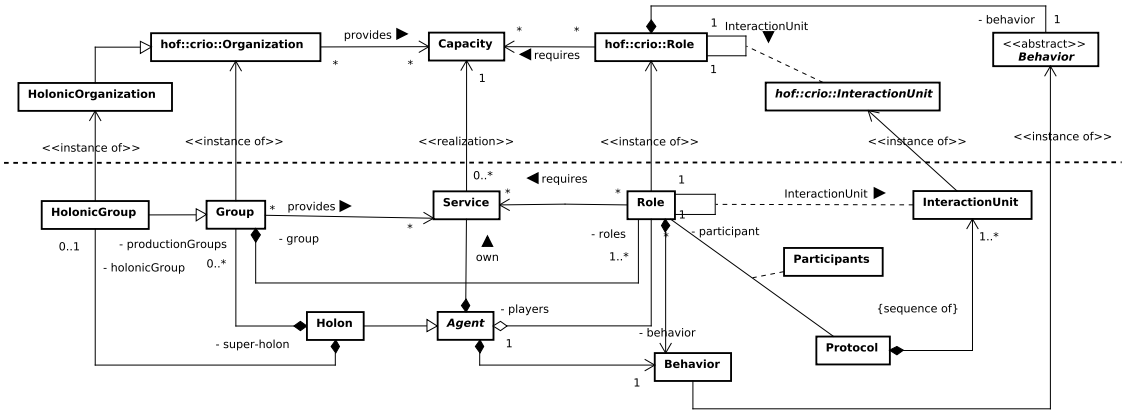


FIGURE 2.6 – Diagramme UML du domaine agent du métamodèle CRIO

2.5.1/ PRINCIPES DE LA MODÉLISATION ORGANISATIONNELLE D'UN SMAH

Nous avons fait le choix de décomposer un SMAH selon deux perspectives complémentaires [Cossentino et al., 2007a, Cossentino et al., 2010c]. La première perspective relative aux individus ou holons est la décomposition verticale de la figure 2.7. Chaque holon y est vu comme une entité autonome qui a des buts et qui peut être composée d'autres holons, appelés sous-holons. Un holon composé est appelé super-holon. Un super-holon n'est pas seulement caractérisé par ses membres, mais également par leurs interactions. Pour décrire ces interactions, nous utilisons une décomposition dite horizontale (voir figure 2.7). Cette décomposition correspond à la relation de mise en œuvre de rôles par les sous-holons. Chaque sous-holon peut ainsi jouer un ou plusieurs rôles au sein de groupes, instances d'organisations, qui font partie du super-holon. Certains de ces groupes représentent le fonctionnement d'une holarchie (hiérarchie de holons), et sont systématiquement présents quelque soit l'application. Ces groupes constituent le cadre organisationnel que nous proposons pour les SMAH (voir section suivante). Le reste des groupes représentent les aspects dépendants de l'application.

2.5.2/ DE L'ORGANISATION AU GROUPE

Au sein du *domaine agent*, les organisations issues du modèle du problème sont instanciées sous forme de *groupes*. Les rôles qui composaient ces organisations sont eux aussi instanciés. Ces concepts de *groupe* et de *rôle* dans le *domaine agent* sont définis de la manière suivante :

> **Définition 5 : Groupe, traduit de [Cossentino et al., 2010c]**
>
> Un groupe est une instance concrète d'une organisation. Il modélise un groupe de rôles en interaction qui sont joués par des d'agents pour satisfaire un ou plusieurs objectifs du groupe.

Deux agents ne peuvent communiquer que s'ils jouent un rôle dans un groupe commun. Un agent jouant un rôle dans un groupe donné se doit de respecter le comportement de ce rôle. Le comportement global du groupe doit suivre le schéma spécifique d'interaction

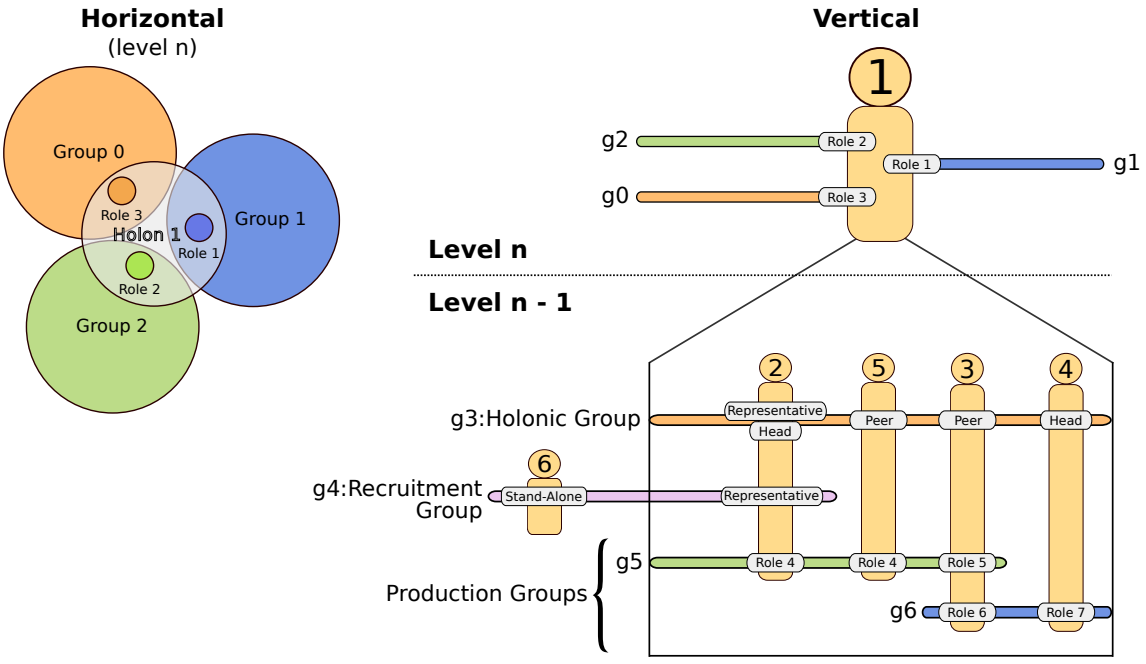


FIGURE 2.7 – Décompositions horizontales et verticales d'un holon

décrit par l'organisation qu'il instancie.

Définition 6 : Rôle d'agent, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Un rôle d'agent est une instance concrète d'un rôle. Il décrit un comportement dans le contexte défini par un groupe. Il confère à l'agent un statut dans ce groupe et les moyens d'interagir avec les autres agents jouant des rôles au sein du même groupe.

Un rôle d'agent est local à un groupe. L'accès à un tel rôle n'est pas automatique. Il doit être demandé par l'agent qui désire le jouer. Cet accès est soumis à des conditions que doit valider l'agent pour accéder effectivement au rôle. Les conditions d'obtention d'un rôle sont nommées `obtainConditions`, et l'une d'elles spécifie que l'agent doit disposer de toutes les capacités requises par le rôle. Ces conditions d'obtention constituent un moyen de vérifier que l'agent valide effectivement un certain nombre de prérequis nécessaires au rôle et notamment qu'il dispose de toutes les compétences requises pour mettre en œuvre le comportement du rôle. Un rôle ne peut pas être libéré directement, car sa libération est également soumise à des conditions. Les conditions de libération, nommées `leaveConditions`, permettent par exemple d'empêcher un agent de quitter un groupe alors qu'il avait la charge d'effectuer une tâche donnée.

Ces différentes conditions permettent de fixer le niveau d'engagement d'un agent dans un groupe. En somme, lorsqu'un agent entre dans un groupe, il accepte non seulement de se plier aux comportements définis dans les rôles qu'il joue, mais également de mettre à disposition tout ou partie de ses compétences. Ces aspects sont directement liés au statut du rôle qui définit les droits dont dispose l'agent, mais également les obligations auxquelles il doit se plier.

Un agent doit jouer au moins un rôle dans un groupe pour pouvoir communiquer, mais

il peut également jouer plusieurs rôles au sein d'un même groupe ou plusieurs rôles au sein de groupes différents.

Au cours du processus d'instanciation, une même organisation peut être instanciée plusieurs fois. De manière analogue, un rôle peut être instancié sous forme de plusieurs rôles d'agent, plusieurs fois au sein d'un même groupe ou au sein de groupes différents. La relation entre les concepts d'organisation et de groupe, et celle entre rôle et rôle d'agent peuvent être considérées comme analogues à la relation qui lie les concepts de classe et d'objet dans les modèles orientés-objet. À noter que les définitions et les relations entre les concepts d'agent, de groupe et de rôle d'agent au sein du *domaine agent* sont très proches de celles fournies dans le métamodèle AGR [Ferber et al., 2004].

2.5.3/ DE L'AGENT : UNE ENTITÉ AUTONOME ET ORGANISATIONNELLE

Le concept d'agent est défini comme suit :

Définition 7 : Agent, traduit de [Cossentino et al., 2010c]

Un agent est une entité ayant des objectifs et possédant des compétences concrètes. Il joue un ensemble de rôles qui peuvent être définis dans plusieurs groupes.

Derrière cette définition minimale, on retrouve un concept relativement proche de la définition fournie par [Ferber, 1995]. Cependant, une partie de ce qui était attribué directement à l'agent est désormais externalisée dans ses rôles ou ses capacités.

En effet, chaque agent dispose de la capacité de base qui lui permet de jouer des rôles et donc de communiquer avec d'autres agents. Chaque agent possède ensuite des capacités ou compétences spécifiques, qu'il peut mettre au service d'autres agents, soit en partageant un groupe commun, soit par la publication d'un service (cf. section 2.5.5).

Le comportement global d'un agent résulte de la combinaison des rôles, connaissances et capacités dont il dispose à un instant donné. Chaque agent tend à satisfaire les objectifs qui ont été attribués aux rôles qu'il joue, et qui sont spécifiés dans leur comportement. Mais le comportement d'un rôle peut indirectement être influencé par les caractéristiques propres de l'agent (ses accointances ou ses tendances). L'accès aux caractéristiques propres de l'agent ne s'effectue généralement que par l'intermédiaire d'une implantation particulière d'une capacité requise par le rôle. Cette approche garantit un certain niveau de généricité du rôle en faisant abstraction de l'architecture interne de l'agent.

Un aspect important à retenir dans la définition 7 est qu'elle autorise, voire favorise, une dynamique importante des rôles au sein de l'agent, et du système dans sa globalité. Un agent joue simultanément ou séquenciellement au cours de son exécution un grand nombre de rôles. Si l'on considère l'exemple d'un enseignant-chercheur dans une université, ce dernier exerce généralement au moins deux rôles. En effet, en qualité d'enseignant, il est habilité à donner des cours à des étudiants, mais il pratique généralement en parallèle une activité de recherche au sein d'un laboratoire. La figure 2.8 illustre l'exemple d'un agent Enseignant-Chercheur qui joue simultanément plusieurs rôles dans des groupes différents. L'agent A_1 joue ainsi le rôle d'enseignant dans le groupe $g1 : Lecture$. Parallèlement, il participe à un projet de recherche au sein du groupe $g2 : Research\ Project$, tout en prenant également part aux décisions du conseil du département d'enseignement de son université, modélisé dans l'exemple par

le groupe $g2$: $Council$. Cette dernière dénomination signifie que le groupe $g2$ est une instance de l'organisation `Council`. Quelques-unes des organisations impliquées dans la modélisation d'une université sont présentées dans la partie haute de la figure.

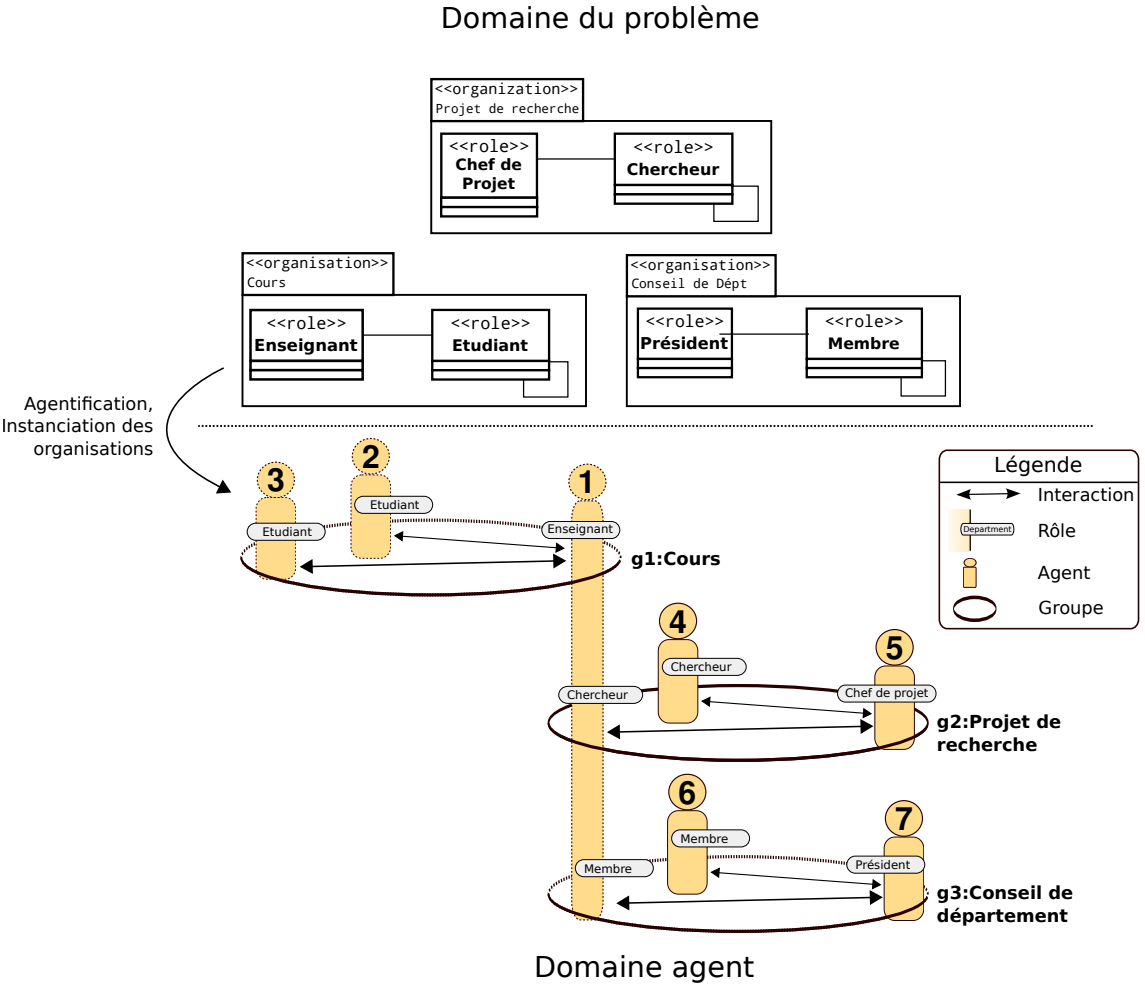


FIGURE 2.8 – Exemple d'un agent jouant simultanément deux rôles dans trois groupes distincts [Gaud, 2007]

2.5.4/ AU HOLON : UN AGENT HIÉRARCHIQUEMENT DÉCOMPOSÉ

En complément de la notion d'agent, CRIO introduit la notion de holon. Cette section est dédiée à la présentation des multiples facettes de ce concept et à la manière de le représenter en adoptant une approche organisationnelle.

2.5.4.1/ INTRODUCTION ET TERMINOLOGIE

Un holon est une entité autosimilaire composée de holons comme sous-structures [Koestler, 1967]. La structure hiérarchique composée de holons est appelée *holarchie*. Un holon peut être vu, en fonction du niveau d'observation, tantôt comme une

entité atomique, tantôt comme un groupe de holons en interaction. De la même manière, un ensemble constitué de différents holons peut être considéré comme un ensemble d'entités en interaction ou comme des parties d'un holon de niveau supérieur. Cette dualité est parfois appelée l'*effet Janus*. La figure 2.7 décrit cet aspect dual de la notion de holon. À un niveau d'observation donné, le holon composé n°1 est qualifié de super-holon. Les holons qui composent un super-holon sont appelés sous-holons ou holons membres.

De nombreux exemples de holarchies peuvent être trouvés dans la vie quotidienne : le corps humain, les villes, les entreprises ou encore les galaxies. Si l'on considère une université d'un point de vue holonique, on peut alors la décomposer en différents départements et laboratoires. De la même manière, un département peut être décomposé en un ensemble d'organisations (conseil de département, cours, ...) peuplées d'enseignants et d'étudiants. Cette holarchie de l'université est décrite dans la figure 2.9. Au niveau le plus haut (niveau $n+2$) se trouve le holon université, qui dans notre exemple est composé de trois sous-holons : le département informatique, le département mécanique et un laboratoire (niveau $n+1$). Au niveau le plus bas se trouvent les enseignants, les étudiants et les chercheurs (niveau n).

Un holon est à la fois un tout composé d'autres holons, et une partie composante d'un (ou plusieurs) holon de plus haut niveau. En cela, la notion de holon peut être rapprochée de celle d'organisation en tant que comportement à part entière ou composante d'un comportement de plus haut niveau. Ce parallèle entre ces deux concepts facilitera d'autant le processus d'agentification du modèle du problème.

La figure 2.9 illustre cette association entre la décomposition hiérarchique organisationnelle d'un problème et la création d'une holarchie solution associée à ce problème. En respectant l'approche décrite dans le domaine du problème, le système est décomposé en différents niveaux d'abstraction. Chaque niveau est composé d'un ensemble d'organisations, lesquelles, situées à un niveau d'abstraction donné (niveau n), peuvent contribuer aux comportements de rôles définis à un niveau supérieur (niveau $n+1$). Pour construire la holarchie, les organisations sont instanciées sous forme de groupes. Un ensemble de holons est ensuite créé à chaque niveau, chacun d'eux jouant un ou plusieurs rôles dans un ou plusieurs groupes du niveau considéré. Les relations de composition entre super-holons et sous-holons sont ensuite définies. Par exemple, les super-holons de niveau $n+1$ jouent des rôles dans les groupes de niveau $n+1$. Les membres respectifs de ces super-holons jouent des rôles dans les différents groupes de niveau n, qui contribuent au comportement des rôles de niveau $n+1$ joués par leur super-holon. Les aspects individuel et collectif d'un holon sont ainsi pleinement exploités.

2.5.4.2/ DÉFINITION DE HOLON

À un niveau d'observation donné, un super-holon peut être considéré comme un ensemble de sous-holons en interaction. Ces interactions définissent la structure et le comportement global du super-holon. Afin de modéliser de manière ordonnée et modulaire les interactions et les comportements des membres d'un super-holon, ces derniers sont regroupés par contexte commun via un ensemble de groupes. Un holon peut alors être défini de la manière suivante :

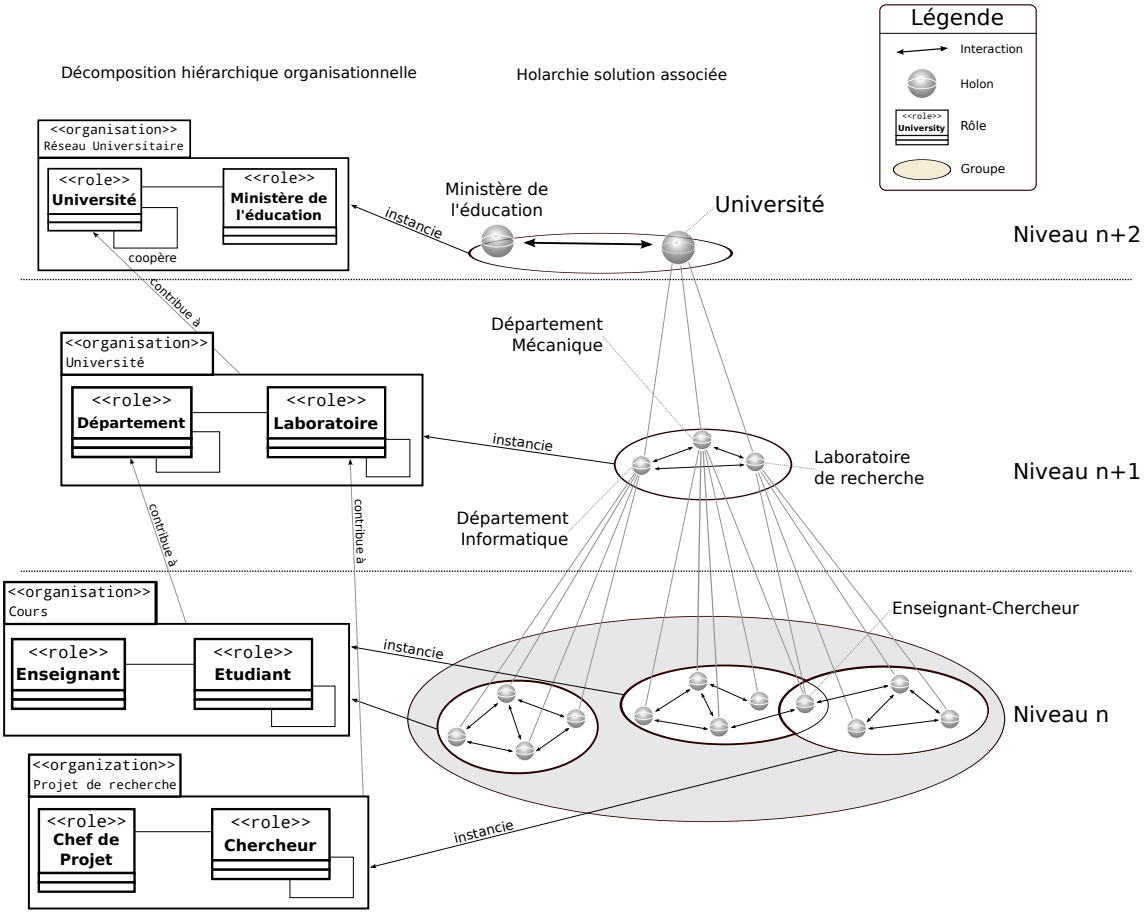


FIGURE 2.9 – Lien entre décomposition hiérarchique organisationnelle et holarchie d'exécution [Gaud, 2007]

Définition 8 : Holon, [Gaud, 2007, Cossentino et al., 2010c]

Un Holon $\mathcal{H}_n$ de niveau n peut être défini par le quadruplet suivant :

$$\mathcal{H}_n =< R_n, H_{n-1}, OP, \psi >$$

avec :

- R_n **: :** l'ensemble des rôles joués par $\mathcal{H}_n$, $R_n = 2^{roles(O_n)}$ avec O_n l'ensemble des groupes où $\mathcal{H}_n$ joue au moins un rôle.
- H_{n-1} **: :** l'ensemble des sous-holons membres du super-holon $\mathcal{H}_n$.
- OP **: :** l'ensemble des groupes qui participe à la vie et au fonctionnement du super-holon $\mathcal{H}_n$ et qui contribue notamment à la satisfaction des objectifs liés aux rôles de R_n.
- $\psi : H_{n-1} \rightarrow 2^{roles(OP)}$ **: :** fonction associant un sous-holon membre à l'ensemble des rôles qu'il joue dans les groupes définis au sein de $\mathcal{H}_n$, tel que $\forall h_i \in H_{n-1}, \psi(h_i) \neq \emptyset$ et $card(\psi(h_i)) \geq 2$. La fonction `roles` fournit l'ensemble des rôles définis dans les groupes de `OP`.

Cette définition implique que des holons ne peuvent générer un super-holon que s'ils interagissent. Un super-holon n'est pas uniquement défini par ses membres, mais

également par leur manière d'interagir, leur schéma d'interaction. Il en découle que deux super-holons peuvent être créés depuis le même ensemble de sous-holons si leurs manières d'interagir et d'influencer les comportements des super-holons diffèrent.

Un point important à souligner est que, lorsqu'un holon devient membre d'un super-holon, il s'engage auprès de ce dernier et également auprès des autres membres. Cet engagement se traduit par la mise à disposition de tout ou partie des capacités que possède un holon, qu'elles soient requises ou non dans l'immédiat par les rôles qu'il joue au sein de son super-holon. À la création du super-holon le niveau d'engagement de chaque membre doit être spécifié. Quand un holon prend un rôle au sein d'un super-holon, il accepte d'honorer le comportement associé à ce rôle. Les engagements de chaque membre caractérisent ainsi la structure du super-holon et garantissent la stabilité de ce dernier.

Dans la suite de ce mémoire d'habilitation, toutes les entités autonomes mentionnées sont des holons. Nous utilisons les termes « holon » et « agent » de manière interchangeables.

2.5.4.3/ STRUCTURE D'UN SUPER-HOLON

CRIO est basée sur une approche organisationnelle de sorte à minimiser l'impact de l'architecture sous-jacente des entités impliquées dans la solution développée. Or, pour conserver cette généricité, deux aspects se superposant dans la notion de holon doivent être clairement distingués :

- **Administration — Gouvernement et structure :** ce premier aspect est directement lié à la nature holonique de l'entité. Il décrit les processus de prise de décision et de gestion au sein d'un super-holon. Il précise notamment la répartition des pouvoirs entre les différents membres. Cet aspect, commun à tous les holons composés, est qualifié d'*aspect holonique*. Il est modélisé par une organisation spécifique : l'*organisation holonique*, qui sera détaillée dans la section suivante (cf. section 2.5.4.4).
- **Production — Les interactions dépendantes des objectifs du problème :** ce second aspect est dépendant de l'application. Il concerne les mécanismes de coordination et d'interaction entre les membres visant à satisfaire les objectifs du super-holon, les tâches à effectuer et éventuellement la prise de décision pour un objectif particulier. Cet aspect est relatif aux organisations utilisées pour modéliser un système donné. Il est par conséquent nommé *aspect production*.

Chacun de ces aspects est traité et modélisé de manière séparée. Le lecteur pourra trouver davantage de détails sur l'approche utilisée pour modéliser les systèmes holoniques dans la thèse de SEBASTIAN RODRIGUEZ [Rodriguez, 2005b] et de NICOLAS GAUD [Gaud, 2007]. Mais avant d'étudier chacun de ces aspects, la précédente définition 8 de la notion de holon doit être raffinée pour distinguer les deux aspects.

Un holon est d'une entité jouant des rôles qui peuvent être définis dans plusieurs groupes. Il peut être composé d'un ensemble de groupes qui précisent comment ses membres sont organisés et interagissent en son sein pour satisfaire les objectifs qui lui sont assignés. Un holon non composé est considéré comme un agent atomique. Un holon composé contient :

- un et un seul *groupe holonique*, instance de l'*organisation holonique* qui précise comment les membres sont organisés et gèrent le super-holon.
- un ou plusieurs *groupes de production*, instances d'organisations qui décrivent com-

	Objectifs	*Stratégies*
Gouvernement Administration	– Définir les objectifs et attribuer les tâches – Contrôler le processus d'auto-organisation – Superviser le processus de prise de décision – Filtrer ou traduire l'information – Recruter ou bannir des membres	– Un rôle – Une élection d'un agent ou d'un groupe d'agents – Un comité
Production	– Accomplir des tâches – Produire des services	– une capacité – un service – orchestrer des capacités ou des services élémentaires

TABLE 2.1 – Description des objectifs et stratégies associés aux deux aspects se superposant au sein d'un super-holon [Gaud, 2007]

ment les membres interagissent et se coordonnent pour satisfaire les objectifs et les tâches assignés à leur super-holon. La définition de ces organisations est dépendante du problème traité.

Un holon composé peut contenir plusieurs instances de la même organisation de production. La table 2.1 détaille les objectifs associés aux aspects holoniques et de production d'un holon et les principales stratégies possibles et disponibles dans CRIO pour les satisfaire.

2.5.4.4/ MODÉLISATION DE L'ASPECT HOLONIQUE

Un super-holon est une communauté de sous-holons qui coopèrent pour satisfaire des objectifs communs. Au sein d'une communauté, de nombreuses structures peuvent être utilisées pour clarifier les responsabilités et les engagements de chacun. Cette section décrit une manière de définir le statut de chaque membre ainsi que les mécanismes de gestion et de prise de décision au sein d'un super-holon. Quelques structures définissant la répartition des pouvoirs au sein d'un super-holon et considérées comme caractéristiques sont également présentées.

L'organisation *holonique* a été initialement conçue pour décrire le mode de gestion et la structure d'un super-holon en termes de répartition d'autorité et de pouvoirs. Elle est inspirée de la notion de *Groupe Modéré* [Gerber et al., 1999] et fut choisie pour sa souplesse et le large panel de configurations qu'elle offre, en modifiant simplement le degré d'engagement des holons membres envers leur(s) super-holon(s). Dans un groupe modéré, un sous-ensemble des membres représente les autres à l'extérieur du groupe. Pour représenter un groupe modéré avec une approche organisationnelle, cinq rôles, qualifiés de rôles *holoniques*, ont été identifiés :

– **Head :** représente un statut privilégié auquel les membres peuvent conférer un certain

degré d'autorité et certains droits particuliers. Il prend part au processus de prise de décision et, en contrepartie, il assure une partie de la charge d'administration du super-holon. Cette charge dépend de la configuration choisie et peut varier au cours de la vie du super-holon.
- **Representative :** il fait partie de l'interface visible du super-holon. Il joue le rôle d'interface entre l'intérieur et l'extérieur du super-holon. Il assure la redistribution et l'éventuelle traduction de l'information arrivant de l'extérieur. Il représente les autres membres à l'extérieur du super-holon. Plusieurs `Representatives` peuvent être chargés de représenter les autres membres.
- **Part :** identifie les membres d'un unique super-holon. Ils sont normalement chargés de l'exécution des tâches qui leur sont affectées par les `Heads`. Ils peuvent éventuellement prendre part au processus de décision. Cette participation à la prise de décision dépend de la structure de gouvernement choisie pour le super-holon.
- **MultiPart :** extension du rôle `Part`, il identifie les membres partagés entre plusieurs super-holons. Le fait qu'un membre puisse être partagé entre plusieurs super-holons peut éventuellement générer des conflits d'intérêt ou d'autorité. Si au cours de la vie du super-holon, un de ses membres `Part` rejoint un autre super-holon, il devra changer de rôle pour devenir `Multipart`.
- **Stand-Alone :** Ce rôle représente le statut attribué aux holons non membres. Tous les holons non membres sont extérieurs au super-holon, et sont perçus par les membres à travers le statut `Stand-Alone`. Ce rôle a été ajouté pour gérer le recrutement de nouveaux membres au sein d'un super-holon.

Les quatre premiers rôles holoniques décrivent le statut d'un membre au sein d'un super-holon et participent à la définition de l'organisation *holonique*. Chacun de ces rôles peut être joué par un ou plusieurs membres, sachant que tout super-holon doit disposer d'au moins un `Representative` et un `Head`. Les rôles `Head`, `Part` et `multiPart` sont exclusifs entre eux, alors que `Representative` peut être joué simultanément avec l'un des trois autres.

Les interactions, au sein de la communauté des membres du super-holon, relatives à l'aspect holonique sont décrites par l'organisation holonique. Une instance de cette organisation est nommée *groupe holonique*. Chaque membre d'un super-holon doit jouer au moins un rôle dans ce groupe, et tout holon qui rejoint le super-holon après sa création, devra également jouer un rôle dans ce groupe.

L'organisation holonique définit de manière générale la répartition des pouvoirs au sein d'un super-holon, et précise comment les décisions sont prises. Il est également possible de surcharger ce comportement global en créant une organisation de production spécifique pour préciser comment seront prises les décisions pour certains objectifs ou certaines tâches particulières. L'organisation holonique offre cependant un large panel de configurations possibles pour définir le gouvernement d'un super-holon.

En considérant seulement le mode de répartition des rôles holoniques au sein des membres d'un super-holon, plusieurs types de gouvernement peuvent être distingués. Quatre types, considérés comme caractéristiques, sont détaillés ci-dessous et dans la table 2.2 :
- **Monarchie :** Le commandement est centralisé au niveau d'un `Head` unique. La notion de monarchie ne réfère pas ici au mode de nomination du `Head`, mais uniquement à la répartition des pouvoirs au sein de la communauté et au fait qu'un unique `Head` contrôle l'intégralité du processus de prise de décision. Le mode de nomination est

Nom	*Configuration*
Monarchie	un Head, un Votant, pas de Part votant
Oligarchie	n Heads, n Votants, pas de Part votant
Polyarchie	n Heads, $n+k$ Votants, k Part votant
Apanarchie	Tout le monde est Head, tout le monde vote

TABLE 2.2 – Les formes caractéristiques de gouvernements d'un super-holon [Rodriguez, 2005b]

partie intégrante de la dynamique de création d'un super-holon et se doit d'être spécifié séparément.
– **Oligarchie :** Un petit groupe de `Heads` partage le commandement sans en référer aux autres membres de statut `Part`.
– **Polyarchie :** Un petit groupe de `Heads` partage le commandement, mais ils peuvent se référer aux `Parts` pour certaines décisions (via un vote par exemple). Nous empruntons ici le terme inventé par ROBERT A. DAHL pour décrire un type spécifique de gouvernement démocratique.
– **Apanarchie :** Le commandement est entièrement partagé entre tous les membres du super-holon. Toute la communauté est impliquée dans le processus de prise de décision.

2.5.4.5/ CRÉATION D'UN SUPER-HOLON ET INTÉGRATION DE NOUVEAUX MEMBRES

Cette section décrit un sous-ensemble des mécanismes qui gouvernent la dynamique d'un super-holon. Seuls les aspects relatifs à la création d'un super-holon et au recrutement d'un nouveau membre sont abordés. La thèse de [Rodriguez, 2005b] fournit davantage de détails sur la dynamique et sur les processus d'auto-organisation des systèmes multiagents holoniques.

Deux approches sont généralement distinguées pour créer un super-holon :
– **Ascendante (``*bottom-up*'') ou fusion (``*merging*'') :** un ensemble de holons s'associent pour créer un nouveau super-holon chargé de satisfaire un objectif donné.
– **Descendante (``*top-down*'') ou subdivision (``*splitting*'') :** un holon dont les tâches deviennent trop complexes décide de créer un ensemble de groupes de production pour exécuter ses tâches. Pour peupler ces différents groupes, le super-holon peut ensuite recruter des membres disposant des capacités requises ou créer de nouveaux holons.

Les objectifs et les tâches d'un super-holon peuvent évoluer au cours de sa vie. Il peut par conséquent avoir besoin de recruter de nouveaux membres pour satisfaire aux nouveaux objectifs.

À un niveau d'abstraction donné, le holon est considéré comme un ensemble de groupes et donc de membres en interaction. Cependant, depuis l'extérieur du super-holon, ces membres sont invisibles par le reste du système. Aucun holon non membre ne peut interagir directement avec les membres, excepté avec le ou les représentants de ceux-ci, les `Representatives`. Un holon peut demeurer seul, et dans ce cas, ces décisions ne sont pas restreintes et ne dépendent que de ses objectifs propres. Un holon demeure généralement dans cet état tant qu'il est satisfait. En accord avec ses besoins,

un holon peut décider de rejoindre un super-holon existant afin de satisfaire des objectifs communs. Pour ce faire, il doit demander son admission à l'un des représentants des membres, lequel sert d'interface entre la communauté du super-holon et le candidat à l'intégration. Les `Heads` du super-holon décident ensuite, en fonction des capacités du candidat. Si son admission est acceptée, le holon devient un membre à part entière et peut interagir directement avec les autres membres. Ce nouveau membre intègre le groupe holonique du super-holon ainsi que les groupes de production qui participent à satisfaire les objectifs qu'ils ont en commun.

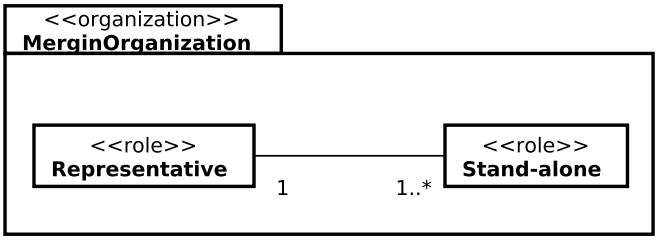


FIGURE 2.10 – L'organisation `Merging` pour gérer l'intégration de nouveaux membres au sein d'un super-holon [Gaud, 2007]

L'organisation `Merging` de la figure 2.10 décrit le processus d'intégration de nouveaux membres. Elle introduit deux rôles : `Representative` joué par l'un des représentants des membres du super-holon, et `Stand-Alone` joué par le candidat au recrutement. Lorsqu'un candidat demande son intégration à un super-holon existant, cette organisation est instanciée sous forme de groupe. Le candidat obtient le rôle `Stand-Alone` et l'un des représentants du super-holon intègre le groupe, lequel constitue le support nécessaire aux négociations de recrutement. La figure 2.11 présente un exemple d'instanciation de l'organisation `Merging` au sein d'un super-holon.

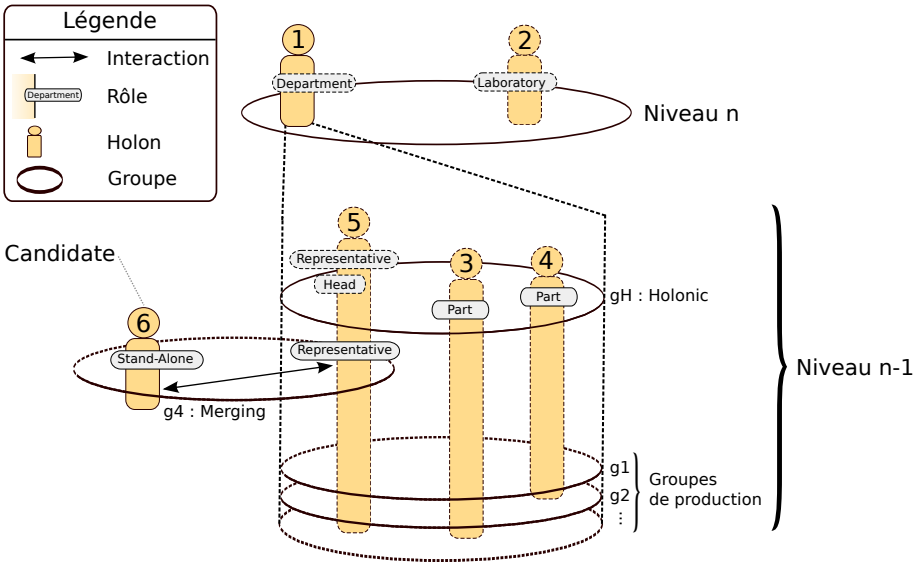


FIGURE 2.11 – Le groupe `Merging` pour gérer l'intégration de nouveaux membres au sein d'un super-holon [Gaud, 2007]

Un holon peut changer ses rôles en accord avec ses besoins et ses objectifs, et tenter de fusionner avec des holons ou d'intégrer des super-holons existants.

Il est alors possible de déterminer si deux holons sont, ou non, prédisposés à collaborer en accord avec leurs objectifs respectifs et les capacités dont ils disposent. Un holon peut ainsi calculer l'affinité qu'il a avec d'autres holons en comparant leurs objectifs. Cette affinité peut ensuite être utilisée pour décider de fusionner, ou non, les holons au sein d'un super-holon. La mesure de l'affinité entre holons constitue la base du processus de création des super-holons et des holarchies.

La notion d'affinité est dépendante des objectifs à satisfaire et donc de l'application étudiée. Diverses définitions ou formulations peuvent être fournies selon la nature du problème. Dans un sens général, l'affinité mesure, en accord avec les objectifs de l'application, la propension de deux holons à collaborer pour satisfaire un objectif commun. Cette définition d'affinité est ensuite affinée dans le contexte de chaque problème. Un exemple concret, détaillant la manière de calculer l'affinité entre deux holons, est présenté au chapitre 5 dans le cadre d'une simulation de piétons dans un univers urbain virtuel.

2.5.5/ SERVICE : RÉALISATION DES CAPACITÉS D'UN HOLON

Il est maintenant possible de s'intéresser aux relations qui existent entre les concepts de service et de capacité pour montrer comment un super-holon peut pleinement exploiter les compétences de ses membres. Cette section se focalise en effet sur l'exploitation des compétences émergentes d'un groupe de holons en interaction. La clef d'un tel mécanisme repose sur le fait qu'un groupe d'agents est en mesure de fournir un service. Dans l'approche proposée, la notion de service se définit de la manière suivante :

Définition 9 : Service [Cossentino et al., 2010c]

Il fournit le résultat de l'exécution d'une capacité accomplissant ainsi un ensemble de fonctionnalités pour le compte de son propriétaire : un rôle, un groupe, un agent ou un holon. Ces fonctionnalités peuvent être effectivement considérées comme la mise en œuvre concrète de différentes capacités. Par conséquent, un rôle peut publier certaines de ses capacités et des autres membres du groupe peuvent tirer profit de ces capacités au moyen d'un échange de services. De même, un groupe, en mesure de fournir une capacité collective peut la partager avec d'autres groupes en fournissant un service. Une capacité est un aspect interne d'une organisation ou d'un agent, alors que le service est conçu pour être partagé entre diverses organisations ou entités. Pour publier une capacité et permettre ainsi à d'autres entités d'en bénéficier, un service est créé.

D'après la définition précédente, un agent ou un groupe est en mesure de fournir un service qui peut réaliser une capacité. Si on prend le cas d'un rôle, cette définition prend un sens tout particulier. En effet, un rôle requiert des capacités pour définir son comportement, mais peut également les mettre à la disposition d'autres rôles en publiant un service. Les différents rôles d'un groupe peuvent alors exploiter leurs capacités respectives par échanges de services. Un groupe est également capable de fournir une capacité « collective », qu'il peut partager avec les autres groupes en publiant un service à son tour. Ces capacités de groupe résultent de la collaboration entre les différents membres

du groupe.

Cette section montre comment exploiter dans le cadre des systèmes multiagents holoniques, ces compétences qui *émergent* des interactions entre les différentes parties d'un système. En effet, le groupe est considéré comme capable de fournir un service. Or, un service peut être vu comme une manière possible de réaliser une capacité. Dès lors, un super-holon peut posséder une capacité qui peut être réalisée par un service et fournie par tout ou partie de ses membres. Ce super-holon est alors en mesure d'accéder à des rôles inaccessibles à ses membres.

Si l'on considère à nouveau l'exemple de la capacité `TrouverPlusCourtChemin`, présentée plus tôt dans ce chapitre, l'organisation *Colonie de fourmis* est capable de fournir la capacité `TrouverPlusCourtChemin` (voir figure 2.5, page 23). Cette capacité est ensuite requise pour définir le comportement du rôle `Route Provider` de l'organisation *Détermination de route dans un graphe*. Ces deux organisations se situent à deux niveaux d'abstraction différents.

Comme l'illustre la figure 2.12, l'approche holonique permet de représenter simplement ces deux niveaux en créant un super-holon dont les membres seront les fourmis. Les deux organisations précédentes sont instanciées sous forme de groupes $g0$ et $g1$. Le groupe $g0$ est composé de deux membres H_1 et H_2 de niveaux n. Le holon H_1 joue le rôle `Route Requester` ; il désire obtenir la route la plus courte pour atteindre sa destination, et pour cela, il interroge le holon H_2 jouant le rôle `Route Provider`. Le comportement de ce rôle est basé sur la capacité `TrouverPlusCourtChemin`. Le holon H_2 doit donc posséder une réalisation de cette capacité. Supposons pour l'exemple qu'il opte pour la réalisation basée sur l'organisation *Colonie de fourmis*. Dans ce cas, le holon H_2 contient une instance de cette organisation, notée `g1: Ant Colony`. Dès lors, les membres de H_1 intégrés à ce groupe jouent l'un des rôles définis dans le diagramme UML de l'organisation (cf. figure 2.5, page 23).

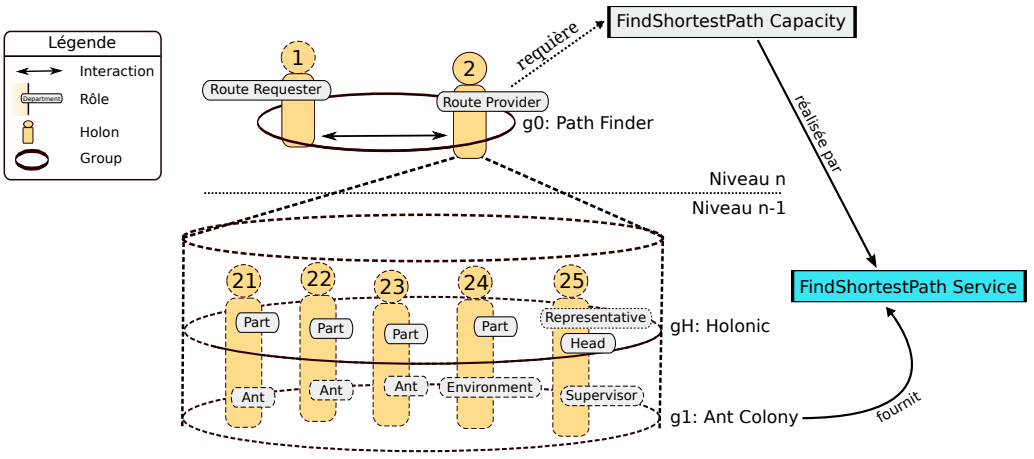


FIGURE 2.12 – Structure d'un super-holon exploitant la capacité collective d'une colonie de fourmis [Gaud, 2007]

L'exemple précédent illustre le fait qu'un groupe peut réaliser une capacité grâce à un service. Ce type de réalisation implique que deux niveaux d'abstraction peuvent cohabiter au sein d'un même système. L'approche holonique permet de prendre en considération ce type de configuration.

En effet, le super-holon (ici H_2) peut exploiter les comportements émergents des interactions entre ses membres et ainsi jouer des rôles inaccessibles à ses membres. Un super-holon peut donc réaliser une capacité, soit en possédant directement une réalisation sous la forme de composants logiciels, soit en intégrant un groupe (de production) capable de fournir un service qui réalise la capacité dont il a besoin.

Il demeure un aspect à détailler lorsque l'on considère une réalisation collective d'une capacité : comment rediriger les stimulus externes du super-holon vers ses membres ? Le rôle holonique `Representative` constitue la solution à ce problème. En effet, les membres jouant ce rôle font partie de l'interface du super-holon. Ils sont chargés de la redistribution et de l'éventuelle traduction de l'information arrivant de l'extérieur du holon vers les autres membres. Ce mode de transfert de l'information requiert parfois l'adaptation des organisations avant leur intégration au modèle holonique. C'est pourquoi dans l'organisation `Colonie de fourmis`, un rôle nouveau est introduit : le `Supervisor`. Ce rôle impose que l'agent qui le joue assume également le rôle `Representative`. L'information peut alors transiter entre ces rôles. Le rôle `Supervisor` observe l'environnement jusqu'à ce que le plus court chemin soit disponible et le transmet alors au super-holon. Le plus court chemin émerge des interactions entre les fourmis, la présence d'un observateur est donc impérative pour déterminer la disponibilité de ce résultat.

Une organisation peut fournir un service de différentes manières. On peut distinguer trois approches possibles :
- **Atomique :** le service est fourni par l'un des rôles de l'organisation. Le rôle possède une capacité disposant d'une description compatible avec celle du service.
- **Composé :** le service est obtenu depuis les interactions d'un sous-ensemble de rôles de l'organisation en suivant un protocole connu. Ceci est un scénario de composition de service où le plan d'obtention est a priori connu et où les performances peuvent être connues et assurées.
- **Émergent :** le service est obtenu grâce aux interactions d'un sous-ensemble de rôles de l'organisation, mais le plan d'obtention n'est pas connu a priori. Le résultat du service est émergent.

Dans ce dernier cas, la gestion du service fourni par le comportement global de l'organisation est généralement assurée par l'un de ses rôles, comme c'est le cas dans la colonie de fourmis avec le rôle `Supervisor`.

La section suivante s'intéresse au processus d'acquisition dynamique de capacité pour un holon. Elle s'attachera notamment à montrer l'intérêt dans ce cadre des relations entre les concepts d'organisation et de capacité.

2.6/ CONCLUSION

L'approche organisationnelle est considérée comme une approche adaptée à l'analyse et à la conception des systèmes complexes [Jennings, 2000, Zambonelli et al., 2003, Argente et al., 2006]. De nombreuses méthodes orientées-agent admettent qu'un SMA puisse être conçu comme une société organisée d'individus dans laquelle chaque agent joue des rôles spécifiques et interagit avec d'autres agents [Ferber et al., 2004, Ferber and Gutknecht, 1998, Gutknecht, 2001, Hannoun et al., 2000, Hübner et al., 2002, Wooldridge et al., 2000, Zambonelli et al., 2003, Bernon et al., 2002, Picard, 2004, Chella et al., 2004,

Cossentino and Potts, 2002, Cossentino, 2005, Caire et al., 2002, Pavón et al., 2005, Giret, 2005, Giret and Botti, 2005, Giret et al., 2005]. L'agent et ses aspects individuels ne constituent plus alors la vision principale du système. Ce dernier est désormais considéré comme une organisation dans laquelle les agents forment des groupes et des hiérarchies.

La modélisation organisationnelle d'un système complexe nécessite la définition des concepts permettant de le modéliser. Ces concepts sont regroupés au sein d'un métamodèle. Nous proposons CRIO (Capacité-Rôle-Interaction-Organisation), un métamodèle fondé sur une approche organisationnelle. Il définit notamment les concepts de rôle, d'interaction, d'organisation et de capacité.

En adoptant une approche de développement dirigée par les modèles, nous décomposons le métamodèle CRIO en trois domaines :
- Le **domaine du problème** fournit les concepts organisationnels permettant de décrire un problème indépendamment d'une solution spécifique (y compris orientée-agent).
- Le **domaine agent** introduit les concepts relatifs aux agents et permet de construire un modèle multiagent du système.
- Le **domaine de la solution** contient les concepts relatifs à l'implantation du modèle orienté-agent sur une plate-forme spécifique.

Dans ce chapitre, nous présentons le métamodèle associé au **domaine du problème** et les principaux concepts associés. Le lecteur intéressé peut se référer à [Cossentino et al., 2010c, Cossentino et al., 2010b, Cossentino et al., 2007a] pour obtenir plus de détails.

Une approche holonique est proposée pour le **domaine agent**. Elle permet de modéliser des systèmes dans lesquels chaque agent peut se comporter comme une entité atomique ou comme un groupe d'agents en interaction. Les infrastructures proposées dans la litérature pour modéliser ces sytèmes sont généralement liées à un domaine d'application spécifique. Citons par exemple PROSA [Brussel et al., 1998], utilisé dans le domaine des systèmes manufacturiers. Ces infrastructures manquent de cadre méthodologiques et de concepts leur petmettant d'être réutilisés dans d'autres domaines d'application.

Pour remédier à ce problème, nous proposons un cadre de modélisation des SMAH basé sur les concepts organisationnels. Chaque holon peut jouer un rôle dans un groupe (instance d'une organisation), et peut se décomposer en un ensemble de sous-holons et interagir avec ses membres. L'architecture d'un holon est basée sur la définition d'un groupe « d'administration » au sein du holon. Ce groupe décrit la politique de prise de décisions par les sous-holons indépendament du problème. Chaque holon décomposé doit également définir un ou plusieurs groupes de « production ». Ils permettent de répondre à tout ou partie des objectifs du holon, et sont par conséquent dépendants du problème. Le concept de capacité (et sa réalisation sous la forme de services) permet de faire le lien entre deux niveaux dans la hiérarchie des holons. En effet, alors qu'une capacité est requise par le rôle joué au niveau supérieur, les organisations du niveau inférieur fournissent une implantation de celle-ci.

Les modèles présentés dans ce chapitre ont été notamment appliqués à la résolution de problèmes [Rodriguez et al., 2007], la simulation multiniveau de piétons et de cyclistes [Gaud et al., 2009, Buisson et al., 2013] et la simulation d'un système à large échelle de covoiturage [Galland et al., 2013]. Les SMAH peuvent également être appliqués à de nombreux autres domaines comme la gestion des connaissances [Monticolo et al., 2007]. Toutefois, nous sommes conscients des difficultés d'ana-

lyse, de conception et d'implantation qu'engendrent ces systèmes. C'est dans ce cadre que nous avons développé une méthodologie permettant de guider le processus d'analyse et de conception de SMAH (chapitre 3).

3

PROCESSUS MÉTHODOLOGIQUE ASPECS

3.1/ INTRODUCTION

Une méthode est un plan d'action qui décrit les étapes pour atteindre un ou plusieurs objectifs. Lors des débuts du paradigme des SMA, les développeurs utilisaient des méthodes *ad hoc*, ce qui nuisait à la qualité et à la réutilisabilité des systèmes développés. À l'heure actuelle, les travaux sur les méthodes ont acquis une certaine maturité, même si aucune ne couvre l'ensemble des problèmes que les SMA peuvent traiter [Henderson-Sellers and Giorgini, 2005]. Cette absence de consensus tient du fait que, à la différence des méthodes orientées-objet, les méthodes orientées-agent doivent prendre en compte des aspects tels que l'autonomie et les buts propres des agents, la dynamique de l'environnement, l'auto-organisation, l'ouverture du SMA, ... Ces différents aspects sont difficiles à traiter simultanément au sein d'une méthode et peuvent être traités de façons différentes. Nos travaux sont orientés vers des SMA à base d'abstraction organisationnelle. Certaines méthodes ont pris le parti de décrire des SMA sans concept organisationnel. Adelfe [Bernon et al., 2005], par exemple, vise l'analyse et la conception de SMA adaptatifs. Pour notre part, nous nous sommes concentrés sur les méthodes propres à l'analyse et au développement de systèmes complexes. Pour cela, notre hypothèse est de considérer un système complexe comme une hiérarchie au sens holonique où chaque holon (ou sous-système) est dit presque décomposable [Simon, 1996] ; c'est-à-dire que les interactions entre les sous-systèmes sont faibles, mais non négligeables. En d'autres termes : (i) le comportement de chaque sous-système à court terme est indépendant du comportement des autres sous-systèmes ; (ii) à long terme, le comportement d'un sous-système dépend faiblement de la somme du comportement des autres sous-systèmes.

Nous avons proposé une méthode, appelée ASPECS, issue d'une collaboration avec MASSIMO COSSENTINO du laboratoire ICAR (Palerme, Italie). Nos motivations concernant la proposition d'un processus méthodologique sont présentées dans la section 3.2. Le processus d'ASPECS est décrit dans la section 3.3. Les phases et les activités liées à ce processus sont brièvement abordées dans la section 3.4. Notre travail sur la définition des fragments de méthode d'ASPECS est introduit dans la section 3.5. La section 3.6 présente un outil de modélisation basé sur le processus ASPECS. La section 3.7 conclut ce chapitre.

Le lecteur, désirant davantage de détails, peut se reporter à la spécification

complète du processus ASPECS [1] [Cossentino et al., 2010c, Cossentino et al., 2007b, Gaud et al., 2008b, Cossentino et al., 2013].

3.2/ MOTIVATIONS

La méthode ASPECS est fondée sur des concepts de l'ingénierie des méthodes [Henderson-Sellers, 2003]. Elle s'appuie sur un processus itératif et incrémental comme cela est le cas pour de nombreuses méthodes d'analyse et de conception de SMA [Kolp et al., 2006, Bernon et al., 2005, Pavón et al., 2005, Padgham and Winikoff, 2002]. ASPECS s'appuie également sur les concepts de l'ingénierie dirigée par les modèles [MDA, 2003]. En particulier, les concepts manipulés au cours du processus sont représentés au sein de métamodèles. Ces métamodèles sont au nombre de trois en référence aux trois niveaux proposés par l'OMG (CIM, PIM et PSM, *cf.* section 2.3, page 15). Des mécanismes de transformation et de raffinement de ces modèles sont également proposés.

L'objectif de cette méthode est d'analyser et de concevoir des SMA holoniques pour des systèmes complexes, ouverts et exhibant des caractéristiques dynamiques. Les concepts à la base de cette méthode sont ceux déjà abordés dans le chapitre 2. Le processus d'ASPECS couvre l'intégralité du processus d'analyse et de développement de logiciel depuis l'analyse des besoins jusqu'à l'implémentation et le déploiement (grâce à la plateforme JANUS [Gaud et al., 2009], présentée dans le chapitre 4).

La notation employée est basée sur UML en tant que langage de modélisation. Pour satisfaire les besoins spécifiques aux agents et à l'approche organisationnelle, la sémantique et la notation ont été étendues en utilisant des profils UML.

La structure du processus d'ASPECS est basée sur le standard SPEM (``*Software Process Engineering Metamodel*´´). La spécification de l'OMG [OMG, 2007] propose l'idée qu'un processus de développement logiciel est basé sur la collaboration entre entités abstraites, appelées *rôles* [2], qui effectuent des *activités*, sur des entités concrètes appelées *produits*. Selon cette approche, le processus d'ASPECS s'appuie sur une hiérarchie à trois niveaux : phases, activités et tâches. Une phase construit un produit composite, constitué d'un ou plusieurs composants qui peuvent être de types différents. Une activité construit un produit principal, comme un diagramme ou un document texte, et est composée de tâches. Une tâche contribue à la réalisation d'un produit. Cette contribution peut prendre la forme d'une réalisation d'une partie de produit, et peut par la-même instancier, mettre en relation ou raffiner des éléments du métamodèle.

3.3/ PROCESSUS ASPECS

Le cycle de développement d'ASPECS est composé des quatre phases décrites ci-dessous et illustrées par la figure 3.1 :

1. L'*analyse des besoins* vise à fournir une description organisationnelle du système (décomposition hiérarchique du système). Elle doit également collecter les connais-

1. Les spécifications d'ASPECS sont disponibles sur http://www.aspecs.org
2. Ces rôles doivent être distingués du concept possédant le même nom dans CRIO.

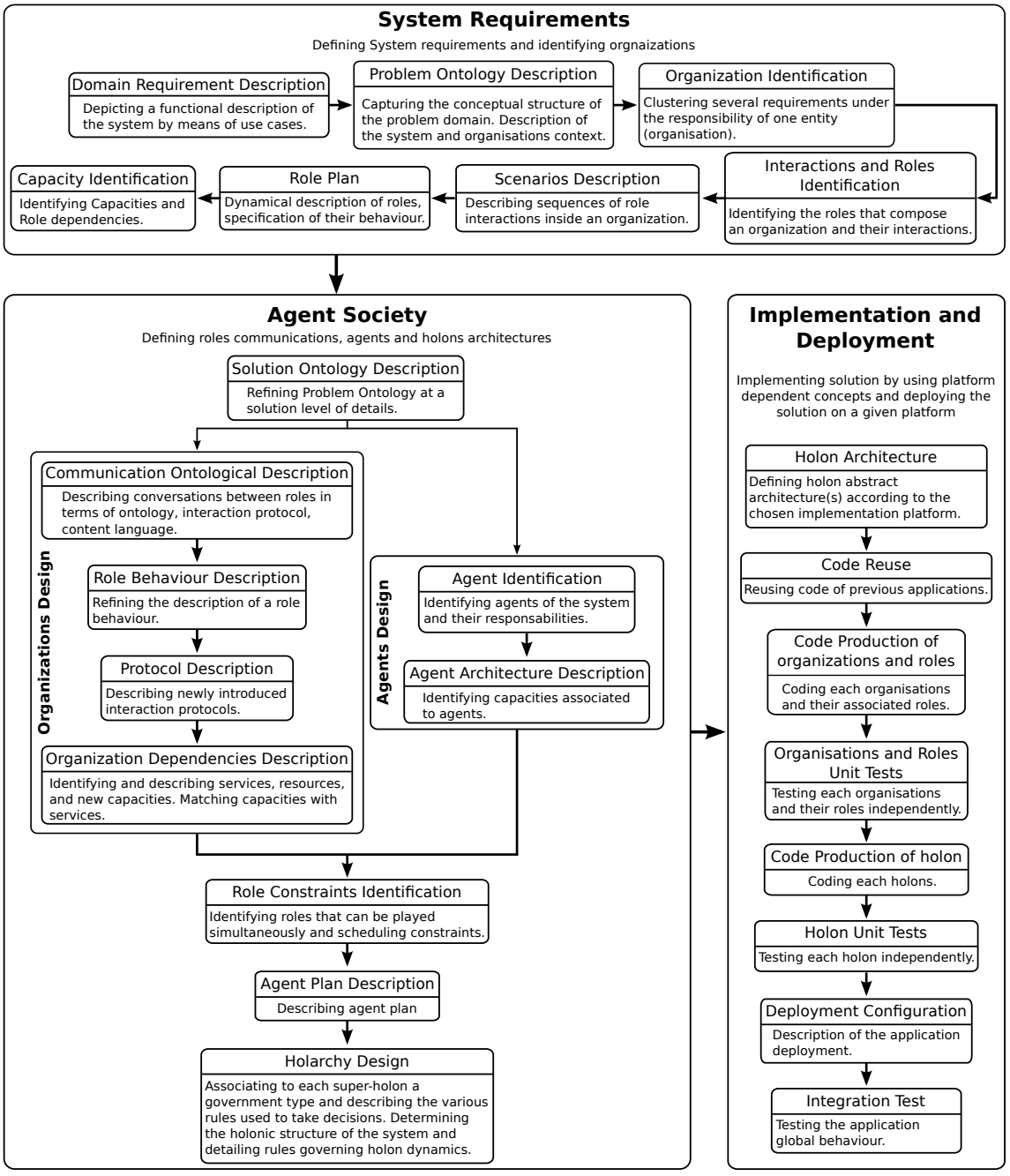


FIGURE 3.1 – Aperçu des tâches et des activités d'ASPECS

But	Objectifs de l'activité
Entrées	Éléments nécessaires à la réalisation de l'activité
Sorties	Éléments produits par l'activité
Élements du métamodèle	Éléments du métamodèle CRIO définis ou associés par l'activité
Ce qui doit être réalisé	Description du contenu de l'activité
Règles méthodologiques	Heuristiques, règles et éléments méthodologiques pouvant aider à la réalisation de l'activité
Notation suggérée *Exemple*	Suggestion d'une notation Exemples de réalisation de l'activité

TABLE 3.1 – Patron de description de chaque activité de ASPECS

sances disponibles sur le domaine du problème et les organiser au sein d'une ontologie.

2. La *conception d'une société d'agents* cherche à construire le modèle d'un SMA, dont le comportement global doit être en mesure de fournir une solution au problème décrit dans la phase précédente. Les connaissances sur le système sont affinées et intègrent les éléments spécifiques à la solution proposée.
3. L'*implantation* de la solution décrit l'architecture des holons impliqués dans la solution et doit fournir le code source de l'application.
4. Le *déploiement* de la solution constitue la phase finale chargée du déploiement de l'application sur la plate-forme choisie.

3.4/ ACTIVITÉS DU PROCESSUS ASPECS

Chaque activité du processus ASPECS est décrite selon la structure donnée dans la table 3.1. La table 3.2 fournit un exemple sous la forme de la description de l'activité d'identification des organisations du système durant l'analyse des besoins. Pour obtenir les descriptions détaillées des autres activités, le lecteur peut consulter le site web d'ASPECS [3] ou l'article de référence [Cossentino et al., 2010c].

3.5/ FRAGMENTS DE MÉTHODE

Il est communément admis dans le génie logiciel et le génie logiciel orienté-agent qu'il n'existe pas de processus méthodologique permettant de répondre à l'ensemble des besoins en modélisation. En effet, comme cela est indiqué dans [Ralyte and Rolland, 2001], « les méthodes traditionnelles d'ingénierie logicielle et de modélisation de systèmes d'information (SI) ne fournissent pas le support nécessaire pour le développement de nouveaux SIs. De nouvelles méthodes, plus souples et pouvant être adaptées à chaque projet de développement, doivent être proposées ». Une solution est proposée par le paradigme des méthodes d'ingénierie situationnelle. Ce paradigme fournit des moyens

3. http://www.aspecs.org

But	Le but de l'activité d'identification des organisations est d'identifier, pour chaque besoin du système, un comportement global incarné par une organisation capable de l'accomplir. Les identifications des organisations et des rôles sont deux activités clés et probablement les deux plus difficiles dans le processus ASPECS. Ces deux aspects forment la base de l'ensemble du processus méthodologique.
Entrées	Les organisations sont identifiées par l'étude des cas d'utilisation et de la structure de l'ontologie, et par l'association entre les cas d'utilisation et les concepts de l'ontologie. L'utilisation d'``*Organizational Design Patterns*´´ est également encouragée pour favoriser la réutilisabilité et valider la solution obtenue.
Sorties	Durant la première itération, le résultat de cette activité est un ensemble d'organisations, chacune étant associée à au moins un cas d'utilisation. Pour décrire ces associations, nous ajoutons directement l'organisation sous la forme d'un paquet dans le diagramme UML de cas d'utilisation. Ce nouveau diagramme est appelé diagramme de cas d'utilisation organisationnel. Durant les itérations suivantes, le résultat de cette activité est un ensemble d'organisations qui contribuent à une partie du comportement des organisations identifiées précédemment. Cet aspect est décrit en utilisant des contraintes dans un diagramme de classes.
Éléments du métamodèle	Define(Organization), Quote(Functional Requirement), Quote(Non-Functional Requirement), Relate(Organization, Functional Requirement), Relate(Organization, Non-Functional Requirement).
Ce qui doit être réalisé	L'identification des organisations repose sur la décomposition fonctionnelle et comportementale des cas d'utilisation. À partir d'un schéma détaillé des fonctionnalités du système, nous regroupons un ou plusieurs cas d'utilisation dans des paquets stéréotypés de manière à former un nouveau schéma. Pour ce faire, chaque paquet définit les objectifs qui doivent être remplis par l'organisation. [. . .]
Règles méthodologiques	Pour identifier les organisations, nous proposons d'exploiter les différents points de vue que nous pouvons adopter sur un système : – **Structurel :** L'analyse structurelle vise à identifier la structure du système, c'est-à-dire comment le décomposer en sous-éléments. Cette analyse et la structure résultante dépendent de l'objectif de l'organisation qui est définie par le cas d'utilisation associé. Dans l'identification structurelle des organisations, des cas d'utilisation qui traitent de mêmes concepts ontologiques sont souvent regroupés dans la même organisation. Cette approche suppose que les mêmes connaissances sont probablement partagées ou gérées par les différents membres d'une même organisation. L'association entre le concept d'organisation et le concept de rôle est une relation très importante dans notre processus. Il fournit souvent des lignes directrices dans de nombreuses activités. La structure de l'ontologie elle-même peut souvent constituer un bon guide pour identifier les rôles et les organisations. Le principe consiste dans l'étude de l'ontologie afin de trouver des éléments qui suggèrent une structure hiérarchique, comme une relation de composition par exemple. – **Comportemental ou fonctionnel :** L'analyse comportementale vise à identifier un comportement global de l'organisation pour remplir les cas d'utilisation. L'ensemble des rôles de l'organisation et leurs interactions doivent être en mesure de « générer » ce comportement de niveau supérieur. Des patrons de conception organisationnelle peuvent être utiles à ce stade. Dans l'identification des comportements des organisations, des cas d'utilisation traitant d'éléments connexes du comportement du système sont regroupés (par exemple un cas d'utilisation et un autre inclus dans le premier). Cela signifie que les membres de la même organisation partagent des objectifs similaires. Ces deux aspects correspondent également aux deux aspects se chevauchant dans la notion de holon. Ils peuvent être utilisés conjointement pour identifier les organisations. L'approche complète consiste à les utiliser en parallèle et à comparer les résultats pour obtenir finalement un modèle représentant le compromis entre un modèle structurel et un modèle comportemental.
Notation suggérée	Les organisations sont représentée par des diagrammes UML de cas d'utilisation et de classes avec des paquets stéréotypés par « `organisation` ».

TABLE 3.2 – Activité d'identification des organisations

pour construire des processus d'ingénierie logicielle *ad hoc* en suivant une approche fondée sur la réutilisation de parties de processus existants de conception. Ces parties sont appellées fragments de méthode. Ils sont stockés dans un référentiel, appelé base de la méthode. Deux problèmes sont soulevés par ce type d'approches : (i) décrire ou documenter les fragments, et (ii) réaliser un choix parmi les fragments existants afin de construire un nouveau processus méthodologique. L'utilisation de concepts et de processus différents, ainsi que de nombreuses directives de modélisation, par les différentes méthodes renforce l'existence de ces deux problèmes. L'hétérogénéité des fragments, hypothèse communément admise dans le domaine de l'ingénierie des méthodes logicielles, rend difficile la conception d'une notation pouvant décrire ces fragments et faciliter la recherche des fragments les plus appropriés pour un objectif donné.

Afin de rendre plus aisé le travail de l'ingénieur de méthode, nous proposons d'utiliser le métamodèle associé à la méthode comme la base des descriptions des fragments [Seidita et al., 2010].

De plus, nous proposons une approche basée sur le formalisme OWL-S, proposé par [Martin et al., 2004], pour décrire les fragments de méthode [Hilaire et al., 2010]. L'idée est de considérer chaque fragment comme un service et d'utiliser les trois ontologies englobées par OWL-S pour décrire un fragment. L'ontologie « profil du service » peut décrire les entrées et les sorties des éléments du métamodèle qui sous-tendent le fragment. Le résultat fourni par le fragment peut être décrit par le résultat fourni par un service. L'ontologie « modèle du service » de OWL-S peut décrire les tâches d'un fragment. L'ontologie « Base du service » permet d'indiquer les lignes méthodologiques associées au fragment et leurs possibilités d'utilisation. Les avantages d'une telle approche sont : (i) la possibilité de décrire, à l'aide d'ontologies, la sémantique entre chaque fragment et leurs méthodes associées ; (ii) l'utilisation les mécanismes de jumelage autorisés par OWL-S. Ces deux avantages peuvent répondre aux problématiques de description et de sélection des fragments.

Dans ce contexte, nous avons proposé de décrire les fragments d'ASPECS et de les déposer au sein d'un référentiel [Cossentino et al., 2008a, Cossentino et al., 2010a]. Dans le cadre de notre participation au groupe ``*FIPA Design Process Documentation and Fragmentation*´´, nous avons contribué à la formalisation d'une méthode de description des fragments de méthode [Cossentino et al., 2010a].

3.6/ VERS UN OUTIL D'INGÉNIERIE LOGICIELLE POUR ASPECS

Dans le contexte de notre collaboration avec le laboratoire ``*Grupo de Investigación en Tecnologías Informáticas Avanzadas*´´ (GITIA) de Tucumán en Argentine, dirigé par SEBASTIAN ROGRIDUEZ, nous développons les outils logiciels associés au métamodèle CRIO et au processus ASPECS. Ces travaux ont déjà donné lieu à la création de la plate-forme JANUS, présentée dans le chapitre 4. Toutefois, la plate-forme JANUS fournit uniquement un support pour l'implantation et l'exécution des modèles basés sur CRIO. Elle ne propose pas d'outil facilitant le processus de modélisation à proprement parlé. Pour remédier à ce problème, nous développons un Atelier de Génie Logiciel (AGL) dédié à ASPECS.

Un AGL ou atelier CASE [4] est un ensemble intégré d'outils qui permet aux développeurs

4. CASE : Computer Aided Software Engineering

de logiciels de documenter et modéliser un système dès la spécification initiale des besoins jusqu'à son implantation [Noran, 1999]. D'autres méthodes ont fait l'objet de la création d'AGL : MAML [Gulyás et al., 1999], PASSI [Cossentino and Potts, 2002] par exemple.

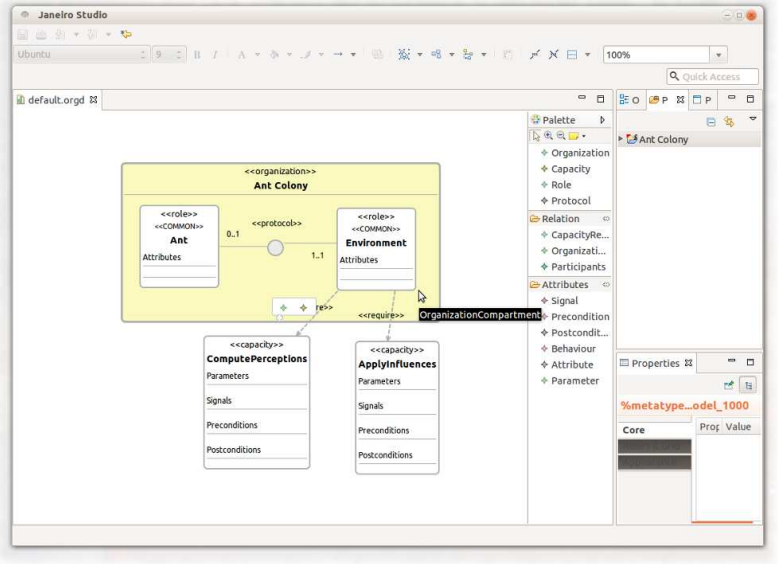


FIGURE 3.2 – Capture d'écran de JANEIRO STUDIO

L'outil développé, nommé JANEIRO STUDIO (illustré par la figure 3.2), est basé sur la bibliothèque ``*Rich Component Programming*´´ de l'environnement Eclipse et sur la définition des différents diagrammes associés à CRIO et ASPECS avec le métamodèle et le langage de l'``*Eclipse Modelling Framework*´´ [5] (EMF). EMF est un cadriciel de modélisation et de génération de code pour construire des outils basés sur des modèles de données structurées.

3.7/ CONCLUSION

Ce chapitre introduit le processus de développement logiciel ASPECS, conçu pour fournir un guide méthodologique pour l'exploitation des abstractions fournies par le métamodèle CRIO. ASPECS couvre l'intégralité du processus de développement, de l'analyse des besoins jusqu'au déploiement. Cette section résume brièvement les principales contributions associées à ce nouveau processus de développement [Gaud, 2007].

ENCOURAGER LA RÉUTILISATION ET LA MODULARITÉ DES MODÈLES ET DES CONNAISSANCES

La réutilisation des modèles et l'utilisation des schémas de conception organisationnels sont des points clefs d'ASPECS. La définition du comportement des rôles, sur la base des capacités, permet d'augmenter la généricité des organisations et ainsi favoriser leur

5. EMF : http://www.eclipse.org/modeling/emf/

réutilisation dans de futures applications. La réutilisation est également encouragée dans la modélisation des connaissances. Grâce à l'ontologie, considérée comme la base commune de connaissances dans le processus de modélisation, les connaissances du domaine du problème sont regroupées et classifiées.

L'APPROCHE ORGANISATIONNELLE : DE L'ANALYSE À L'IMPLANTATION

Utilisé de concert avec la plate-forme JANUS, ASPECS permet d'implanter les organisations et les rôles en tant qu'entités de premier ordre et indépendamment des entités qui les jouent. Ce point de vue permet de conserver les avantages de l'approche organisationnelle depuis l'analyse jusqu'à l'implantation.

MODÉLISATION DISTRIBUÉE DE LA RELATION ENVIRONNEMENT-SYSTÈME

L'environnement est modélisé selon le point de vue des organisations qui le manipulent. L'utilisation des `boundary roles` permet de délimiter le périmètre de l'application à développer. Des capacités spécifiques sont ensuite utilisées pour faire l'interface entre ces rôles et les ressources environnementales nécessaires à l'application. Ces capacités permettent de définir le comportement des `boundary roles` en faisant abstraction de la représentation spécifique des ressources environnementales. L'usage de ces capacités permet de modifier la représentation de l'environnement, sans avoir pour autant à modifier le comportement des rôles. Cette approche facilite la distribution des applications dans des environnements hétérogènes et distribués.

PERMETTRE LA MODÉLISATION DU SYSTÈME À PLUSIEURS NIVEAUX D'ABSTRACTION

Par définition, l'approche holonique permet de modéliser un système à différents niveaux d'abstraction. La décomposition organisationnelle hiérarchique d'un système peut être affinée jusqu'au niveau où le concepteur considère que la complexité des comportements est suffisamment faible pour une implantation immédiate.

RESPECTER LES STANDARDS

Le respect des standards actuels est également l'un des points clefs du processus ASPECS. Cette volonté s'intègre dans la perspective, à terme, de pouvoir transférer les technologies multiagents dans le milieu industriel. Le respect des standards se traduit, d'une part dans la conception même du processus de développement, puisque ce dernier a été créé en conformité avec le modèle de processus [OMG, 2007] fourni par l'OMG, et d'autre part dans le choix des langages et notations qui sont utilisés pour supporter le processus de développement : le standard actuel étant incarné par UML 2.0. Afin de pleinement satisfaire les besoins liés à l'approche orientée-agent, les notations UML ont été étendues en utilisant les mécanismes d'extension fournis par ce langage (et notamment les profils UML).

4

PLATE-FORME JANUS

4.1/ INTRODUCTION

Le présent chapitre traite des étapes du processus méthodologique ASPECS qui sont consacrées à l'implantation et au déploiement d'applications multiagents. Il présente une plate-forme, nommée JANUS [1], spécifiquement dédiée à l'implantation de systèmes multiagents holoniques et développée en collaboration avec le laboratoire ``*Grupo de Investigación en Tecnologías Informáticas Avanzadas*´´ (GITIA) de Tucumán en Argentine, dirigé par SEBASTIAN ROGRIDUEZ. Le modèle de cette plate-forme est une implantation du troisième et dernier domaine du métamodèle CRIO : le domaine de la solution. Afin de faciliter la transition entre la phase de conception et la phase d'implantation, le modèle de JANUS définit un ensemble de concepts relativement proches de ceux introduits dans CRIO.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : la section 4.2 résume les principaux besoins qui nous ont poussés à développer une nouvelle plate-forme. La section 4.3 présente le modèle de JANUS. La section 4.4 décrit l'architecture et les différentes fonctionnalités de la plate-forme. La section 4.5 conclut ce chapitre.

4.2/ POURQUOI UNE NOUVELLE PLATE-FORME ?

Notre approche consiste à réduire l'écart entre le métamodèle de conception et celui de l'implantation, et à faciliter ainsi d'autant la transformation entre ces deux métamodèles [Zeigler et al., 2000]. Réduire cet écart impose de disposer d'une plate-forme, dont le modèle offre une implantation aussi directe que possible des concepts utilisés lors de la conception du système. Pour aisément implanter les modèles conçus sur la base du métamodèle CRIO, les concepts de holon, d'organisation, de rôle et de capacité sont indispensables.

L'implantation de modèles holoniques nécessite une plate-forme capable de gérer la notion de hiérarchie de composition entre entités. Malheureusement, la plupart des plates-formes SMA existantes considèrent les agents comme des entités atomiques (non décomposables). Il est par conséquent difficile d'implanter la notion de holon, et de fournir une représentation opérationnelle des modèles combinant plusieurs niveaux d'abstraction.

1. Le site officiel de la plate-forme est : http://www.janus-project.org

Dans le métamodèle CRIO, les organisations sont considérées comme des modules complètement indépendants des agents et aisément réutilisables dans diverses applications. La clef de cette définition modulaire des organisations repose sur les concepts de rôle et de capacité. Implanter aisément les modèles basés sur CRIO nécessite une plate-forme dont le métamodèle considère le rôle comme une entité de premier ordre, indépendante de l'agent. Sur cet aspect, la plate-forme Madkit [Gutknecht, 2001, Gutknecht and Ferber, 2000, Gutknecht et al., 2000] et son extension MOCA [Amiguet et al., 2002, Amiguet, 2003] ont retenu notre attention. En effet, elles gèrent toutes deux le concept de rôle. Cependant, Madkit ne considère pas le rôle comme une entité de premier ordre. En effet, le comportement associé au rôle est directement implanté dans l'agent qui le joue. Les rôles sont donc fortement liés à l'architecture des agents. Cette approche nuit à la réutilisation et à la modularité des organisations. MOCA considère les rôles comme des entités de premier ordre. Mais elle impose des contraintes strictes concernant leur mise en œuvre. Par exemple, un agent ne peut jouer plusieurs fois le même rôle. Enfin, aucune de ces deux plates-formes ne gère la notion de capacité.

En d'autres termes, aucune plate-forme existante ne permet d'implanter aisément des systèmes multiagents holoniques conçus avec une approche organisationnelle. Une nouvelle plate-forme d'implantation a donc été créée : JANUS. Elle se fonde sur la combinaison des approches organisationnelle, multiagent et holonique.

Notons toutefois que JANUS est également capable d'exécuter des modèles n'utilisant pas une approche organisationnelle ou holonique. En effet, le noyau de JANUS a été implanté pour permettre son utilisation à la place de plates-formes « uniquement orientées-agent » comme NetLogo.

L'un des objectifs poursuivis par la plate-forme JANUS est, à terme, de faciliter le transfert de la technologie multiagent et l'utilisation des approches organisationnelles et holoniques dans le cadre de projets industriels. Dans [Dastani and Gomez-Sanz, 2005], les auteurs considèrent que les applications multiagents ne pourront effectivement convaincre les industriels que si les fossés qui séparent l'analyse et la conception des SMA d'une part et leur implantation d'autre part sont comblés.

4.3/ MÉTAMODÈLE IMPLANTÉ DANS JANUS

Cette section vient compléter la présentation du métamodèle CRIO réalisée dans le chapitre 2 en proposant un modèle d'implantation. Les concepts définis dans CRIO forment le point de départ du modèle de JANUS [Gaud et al., 2007a]. Ce dernier est présenté sur les figures 4.1 et 4.2. La figure 4.1 représente les concepts du domaine du problème directement implantés dans la plate-forme. La figure 4.2 illustre le modèle d'implantation des concepts du domaine agent.

Le modèle de JANUS est conçu pour faciliter la transition entre la conception et l'implantation d'un système multiagent. JANUS fournit ainsi une implantation directe des concepts au centre de CRIO : organisation, rôle, interaction, capacité, agent/holon.

L'organisation est considérée comme une classe (au sens du métamodèle objet) qui regroupe un ensemble de classes de rôles. Une organisation peut être instanciée sous forme de groupes, chaque groupe contenant un ensemble d'instances des différentes classes de rôles, associées à l'organisation qu'il implémente. Le nombre d'instances

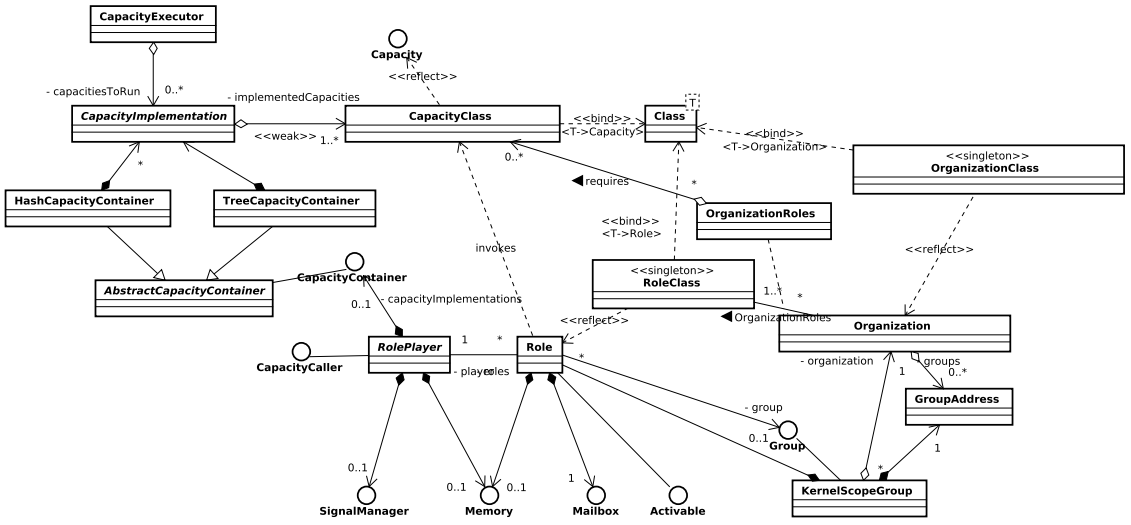


FIGURE 4.1 – Diagramme UML du domaine de la solution du métamodèle CRIO et implanté dans la plate-forme JANUS

autorisées pour chaque rôle est spécifié dans l'organisation. Un rôle est restreint à un groupe et fournit les moyens de communiquer au sein de celui-ci. L'un des aspects les plus intéressants de JANUS concerne l'implantation du concept de rôle en tant qu'entité de premier ordre. Le rôle est considéré comme une classe à part entière, et les rôles sont implantés indépendamment des entités qui les jouent. Cette approche facilite la réutilisation des organisations dans d'autres solutions, et autorise également une grande dynamique pour les rôles.

Dans JANUS, un agent est un holon atomique (non décomposé). Un holon peut jouer simultanément plusieurs rôles définis dans plusieurs groupes. Il peut accéder dynamiquement à de nouveaux rôles et libérer des rôles dont il n'a plus l'usage. Lorsqu'un holon accède à un rôle, il obtient une instance de la classe de ce rôle qu'il stocke dans son conteneur de rôles ; respectivement, lorsqu'il libère un rôle, l'instance correspondante est supprimée. La taille, en terme de code, d'un holon est toujours minimale, car il ne contient que le code des rôles qu'il joue à un instant donné. Pour accéder ou libérer un rôle, un holon doit satisfaire les conditions d'obtention ou de libération du rôle et du groupe correspondant (`obtainConditions` et `leaveConditions`). Ce mécanisme offre de nombreux avantages en terme de sécurité, puisqu'un holon ne pourra accéder au comportement d'un rôle, et donc obtenir le code exécutable correspondant, que s'il valide les conditions d'accès du rôle et celles de son groupe. Pour une même organisation, chacune de ses instances (ou groupes) peut disposer de droits d'accès et de libération spécifiques. Les conditions d'accès et de libération des rôles sont en revanche définies au niveau de l'organisation.

La notion de capacité permet de représenter les compétences d'un holon. Tout holon dispose, dès sa création, d'un ensemble de compétences de bases, dont la possibilité de jouer des rôles (et donc de communiquer), d'obtenir des informations sur les organisations et les groupes existants au sein de la plate-forme, de créer des holons, et d'obtenir de nouvelles capacités. Tout comme dans le domaine agent du métamodèle CRIO, la capacité permet de faire l'interface entre le holon et les rôles qu'il joue. Le rôle requiert

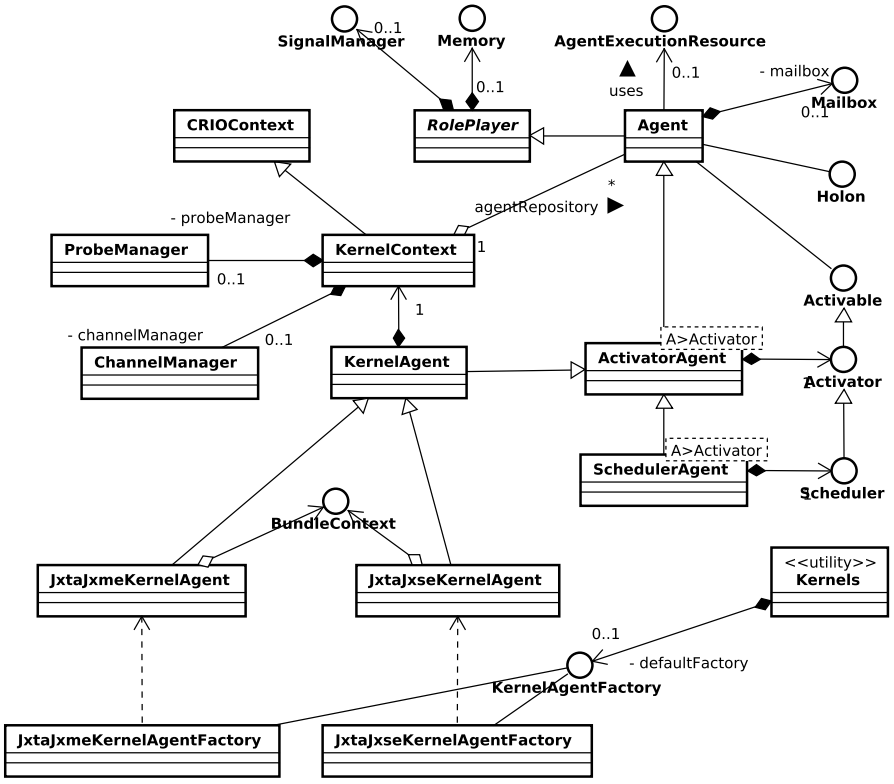


FIGURE 4.2 – Diagramme UML du domaine agent du métamodèle CRIO et implanté dans la plate-forme JANUS

certaines capacités pour définir son comportement, lesquelles peuvent ensuite être invoquées dans l'une des tâches qui composent le comportement du rôle. L'ensemble des capacités requises par un rôle est spécifié dans les conditions d'obtention du rôle. Une capacité peut être réalisée de diverses manières, et chacune de ces réalisations concrètes est modélisée par la notion d'implantation de capacité (ou ``*Capacity Implementation*´´). Ce concept correspond à une implantation d'un service au sein du domaine agent. Il ne porte pas le nom de « service » afin de le distinguer clairement du concept de *service* proposé par le noyau de JANUS et que nous prévoyons d'intégrer dans les futures versions de JANUS.

En plus de ces différents concepts, JANUS fournit toute une gamme d'outils pour faciliter le travail du développeur. Les différentes fonctionnalités offertes par JANUS sont décrites dans la section suivante.

4.4/ ARCHITECTURE DE LA PLATE-FORME

L'architecture complète de la plate-forme JANUS est présentée dans la figure 4.3. La plate-forme JANUS est développée en Java 1.6. Le cœur de la plate-forme est constitué par son noyau qui fournit l'implantation du modèle organisationnel et de la notion de holon. Le noyau est étendu pour intégrer le module de simulation et les holons chargés du fonctionnement de la plate-forme et de son intégration avec les applications externes.

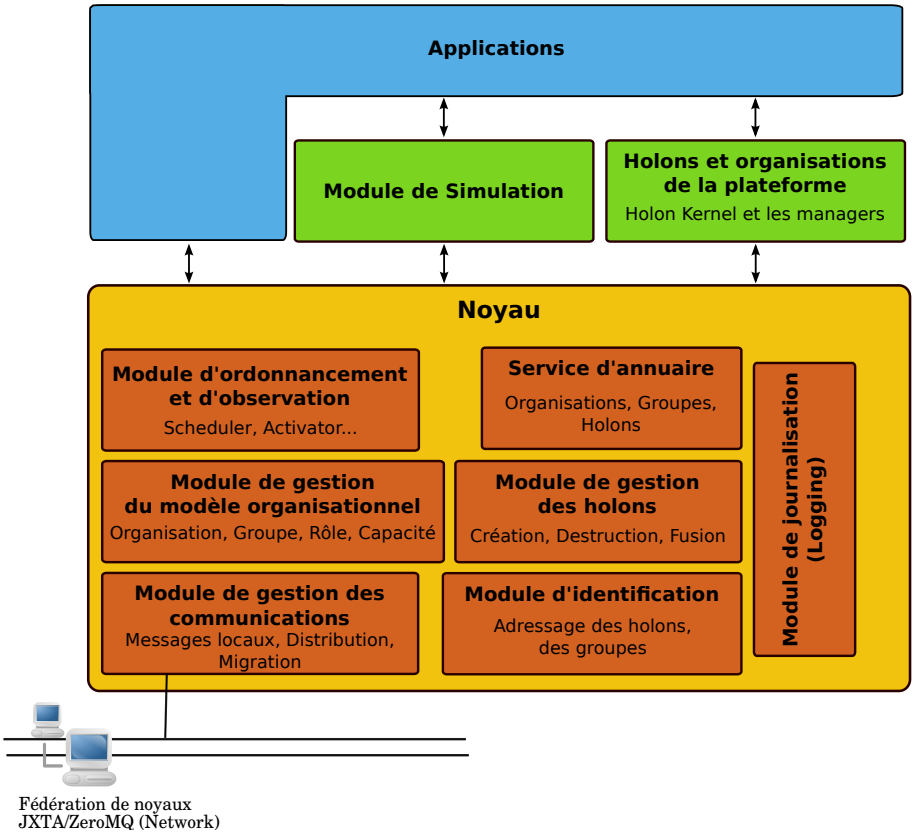


FIGURE 4.3 – Structure générale de la plate-forme JANUS [Gaud, 2007]

Les diverses fonctionnalités fournies par le noyau JANUS sont décrites ci-dessous :

- **Gestion du modèle organisationnel :** Ce module gère les organisations et leurs instanciations sous forme de groupes. Il fournit également les mécanismes d'acquisition, d'instanciation et de libération des rôles, ainsi que les mécanismes d'acquisition et d'exécution des capacités. Cette gestion de l'information organisationnelle est gérée au plus bas niveau afin que tout holon, y compris ceux de la plate-forme, ait accès à ces fonctionnalités. Ce module est en relation avec le holon noyau chargé du maintien de cette information avec les autres noyaux distants.
- **Gestion des holons :** Le noyau fournit également l'ensemble des outils nécessaires à la gestion du cycle de vie des holons : adressage, lancement, arrêt, ... Chaque classe de holon propose, en natif, un ensemble de politiques d'exécution pour les rôles qu'il joue, ainsi que différentes politiques pour la gestion des messages.
- **Gestion des communications :** Le noyau assure l'acheminement des messages en local et au sein de la fédération de noyaux lorsque l'application est distribuée, en utilisant le protocole JXTA, ou ZeroMQ [Feld et al., 2012]. Le fait de considérer le rôle comme une classe à part entière affecte également cet aspect de la plate-forme.
- **Gestion de l'identification :** Le noyau fournit l'ensemble des mécanismes nécessaires pour l'attribution d'une adresse unique (GUID) à tous les éléments du modèle qui le nécessitent. Ainsi, les holons, les groupes, et les rôles disposent d'une adresse unique au sein d'une fédération de noyaux.
- **Service d'annuaires :** Un service d'annuaire est également disponible au sein de la plate-forme. Il référence notamment l'ensemble des groupes, des holons et des orga-

nisations définis dans le noyau.

– **Gestion de l'ordonnancement des holons :** JANUS fournit deux politiques de base pour l'ordonnancement des holons : un modèle pour l'exécution concurrente et un moteur d'exécution synchrone inspiré de celui de Madkit. Ce module fournit également une instrumentation à base de sonde permettant à un rôle d'observer un autre rôle. Contrairement à Madkit qui gère les droits d'observation au niveau de l'agent (agent qui implante ou non l'interface `ReferencableAgent`), JANUS les gère au niveau du rôle. Elle permet ainsi une gestion plus fine des droits d'observation. Un holon peut donc autoriser l'observation de l'un de ses rôles et l'interdire pour les autres.
– **Gestion de la journalisation des événements :** Toutes les applications basées sur JANUS ont accès à un système de journalisation intégré à la plate-forme, ce qui facilite le processus de débogage. Le journal des événements peut être directement affiché ou stocké dans un fichier. Ce système peut être changé et intégré à des systèmes existants. L'implantation actuelle de cette fonctionnalité est basée sur le système `log4j` [2] fourni par l'Apache Software Foundation.

Comme Madkit, JANUS exploite son propre modèle dans la conception même de la plate-forme. Tous les services, excepté ceux assurés directement par le noyau, sont assurés par des agents ou des holons. Le noyau est ainsi associé à un holon `KernelAgent`, qui contient l'ensemble des organisations locales chargées de gérer la plate-forme, et qui représente son noyau dans la fédération distribuée sur le réseau. Une fédération est, en fait, une organisation en charge de gérer les différents échanges entre noyaux et de propager l'information de gestion du modèle organisationnel : création d'une nouvelle organisation ou d'un nouveau groupe, migration d'un holon, ...

L'architecture de JANUS respecte globalement l'architecture abstraite définie par la FIPA pour les plates-formes multiagents [3]. À plus long terme, JANUS devra être associée à un AGL spécifique supportant le métamodèle CRIO, afin d'assurer une transition rapide entre les phases de conception et d'implantation.

4.5/ CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons brièvement introduit la plate-forme JANUS destinée à l'implantation et au déploiement de systèmes multiagents holoniques. JANUS permet véritablement de considérer l'organisation comme un module Java à part entière. La gestion native du concept de capacité permet d'implanter un rôle, sans faire de présupposition sur l'architecture des holons qui le jouent, et favorise ainsi la réutilisation des organisations dans diverses applications. Il faut relativiser cette approche qui nécessite tout de même la définition d'un nombre assez important de classes, et cela même pour de petites applications (une classe par organisation, par rôle, par type de holon ou d'agent). Par conséquent, JANUS se destine avant tout à des applications de grande taille où la modularité est un élément essentiel. Ce problème du nombre de classes dans l'implantation confirme la nécessité de proposer des outils pour simplifier l'intervention du programmeur : (i) fournir un langage proche des langages de script, pour rendre la programmation des agents et des rôles plus intuitive et rapide ; et (ii) intégrer JANUS à un AGL tel que JANEIRO STUDIO, pour générer automatiquement des portions importantes de code.

2. Plus de détails à l'adresse suivante :http://logging.apache.org/log4j/docs/index.html
3. FIPA Abstract Architecture :http://fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html

En outre, JANUS fournissant une implantation directe des concepts à la base de CRIO (capacité, rôle, organisation et holon) contribue à réduire l'écart entre la conception et l'implantation. Cette plate-forme s'intègre ainsi dans la perspective consistant à fournir une suite complète d'outils logiciels pour le développement d'applications complexes à vocation industrielle. De nombreux modules et extensions sont fournis avec la plate-forme dans ce but : ``*Agent Communication Language*´´ (ACL), ``*Belief-Desire-Intention*´´ (BDI), architecture d'éco-résolution, modèle discret d'environnement situé (JAAK), ``*Scripting*´´ des agents, ...

III

Modélisation et simulation d'univers virtuels

5

SIMULATION D'INDIVIDUS DANS DES UNIVERS VIRTUELS

5.1/ INTRODUCTION

L'étude des phénomènes de mobilité individuelle suscite un intérêt important dans l'aménagement des sites urbains, l'étude de la sécurité, l'architecture, et l'analyse des flux, où les deux classes d'applications dominantes sont la simulation d'évacuations et l'analyse des flux des déplacements d'un grand nombre d'individus dans un environnement intérieur ou extérieur [Thalmann and Musse, 2007]. L'objectif de ces simulations est d'aider les décideurs et les experts à comprendre la « relation entre l'organisation de l'espace et les comportements humains » [Okazaki and Matshushita, 1993]. Les environnements considérés sont hétéroclites : les rues [Farenc et al., 1999a, Thomas and Donikian, 2000], les bâtiments [Braun et al., 2005, Thompson and E., 1995], les métros [Hareesh, 2000], les bateaux [Klüpfel et al., 2000], les avions [Owen et al., 1998], les stades [Still, 2000] ou encore les aéroports [Szymanezyk et al., 2011].

Les modèles de simulation de ces systèmes peuvent être classés en quatre grandes familles : macroscopique, microscopique, mésoscopique, et multiniveaux.

Les modèles de simulation macroscopiques sont basés sur des relations déterministes entre la circulation, la vitesse et la densité de population, constituant la foule ou le trafic routier simulé [Helbing and Treiber, 1998]. La simulation d'un modèle macroscopique se focalise principalement sur des régions ou des populations plutôt que sur les comportements individuels. Ces modèles ont été initialement développés pour modéliser le trafic dans les réseaux de transport, tels que les autoroutes, les réseaux de rues, et les routes rurales. Cette approche permet la simulation d'une très grande population avec un relativement faible coût de calcul. Toutefois, en raison de son haut niveau de représentation, les résultats sont agrégés, imprécis et liés à la masse de la population simulée.

Les modèles de simulation microscopiques s'intéressent aux mouvements des personnes sur la base de comportements dynamiques et individuels. Citons par exemple les comportements de véhicule-suiveur et de changement de voie pour représenter des conducteurs, ou les comportements basés sur des forces pour les piétons [Reynolds, 1987, Thalmann and Musse, 2007, Thalmann and Musse, 2007, Dey and Roberts, 2007, Razavi et al., 2011b, Razavi et al., 2011a, Galland et al., 2009]. Ces modèles sont efficaces pour l'évaluation des conditions d'encombrement et de sa-

turation d'un système, l'étude de la configuration topologique du système, et l'évaluation des impacts des comportements individuels sur ce système. Cependant, ces modèles sont difficile à mettre en œuvre, coûteux en termes de temps de calcul, et peuvent être difficiles à calibrer.

Les modèles mésoscopiques combinent les propriétés des modèles de simulation microscopiques et macroscopiques. Par exemple, ils peuvent se focaliser sur des entités composant le système en utilisant des modèles ne permettant pas de distinguer les individus les uns des autres comme les modèles particulaires [Schaefer et al., 1998] ; en regroupant les individus au sein d'entités de plus haut niveau comme des groupes de piétons [Gaud et al., 2008a] ; ou encore en utilisant un modèle discret de l'environnement comme les automates cellulaires [Karafyllidis and Thanailakis, 1997].

Les modèles multiniveaux sont constitués de plusieurs des niveaux mentionnés ci-dessus. L'utilisation conjointe de ces niveaux peut être abordée selon deux approches : les niveaux sont conjointement simulés et les sorties de l'un peuvent servir d'entrées à un autre [Burghout et al., 2005] ; un niveau de simulation est dynamiquement sélectionné afin de fournir le meilleur compromis entre la qualité des résultats obtenus et le temps de calcul pour les obtenir [Gaud et al., 2008a, Galland et al., 2008].

Dans les simulations de foules, les environnements sont généralement étudiés suivant deux principaux points de vue. Le premier concerne l'évolution de la structure de l'environnement [Pouyanne, 2004, Lamarche and Donikian, 2004], et le second traite davantage les activités sociales, et notamment l'analyse du trafic et des déplacements de foules [Jian et al., 2005, Thalman et al., 1999]. L'étude de ces points de vue nécessite la prise en compte non seulement des aspects macroscopiques, mais aussi des entités du point de vue microscopique. Quel que soit l'environnement étudié, extérieur ou intérieur, l'approche multiagent est un outil particulièrement bien adapté à l'étude des dynamiques des déplacements de populations. Les systèmes multiagents s'avèrent plus flexibles que les modèles macroscopiques à base d'équations différentielles pour simuler des phénomènes spatiaux et évolutifs [Bretagnolle et al., 2003].

Les modèles présentés ci-dessus sont confrontés à deux problèmes principaux qui sont également au centre de nos travaux.

1 - Approximation du système et précision des résultats: Les résultats de la simulation sont dépendants de l'approximation introduite par le modèle sélectionné pour représenter le système, et également par l'approximation introduite par l'implantation de ce modèle [Zeigler et al., 2000]. Tous les modèles précédents se concentrent principalement sur les entités du système plutôt que sur l'environnement. Ainsi, les travaux de recherche sont souvent menés pour optimiser le comportement des entités et de leurs interactions à l'aide d'une représentation très simple de l'environnement. Nous considérons que ces modèles d'environnement introduisent des biais qui ne permettent pas de simuler précisément les comportements d'individus sous certaines conditions. Par exemple, il est difficile de prendre en compte la visibilité de la signalétique d'urgence lors de la simulation de l'évacuation d'un bâtiment en feu : la fumée peut cacher partiellement ou totalement cette signalétique.

2 - Mise à l'échelle du modèle et performances du simulateur: La simulation, et notamment la simulation multiagent, est un outil approprié pour les domaines et les applications mentionnées au début de ce chapitre. L'un des objectifs communément admis est de modéliser et de simuler des systèmes complexes

réels. La conséquence directe est une demande croissante pour simuler de « grands » modèles avec de nombreuses entités. Avec la complexité croissante et un nombre croissant d'entités à simuler, la mise à l'échelle d'un modèle de simulation, et les performances de son implantation, deviennent des problèmes cruciaux et conditionnent la capacité de ce modèle à représenter la complexité du système modélisé [Pawlaszczyk and Strassburger, 2009]. Ce point de vue est partagé par de nombreux auteurs s'intéressant à la simulation d'individus dans des univers virtuels 3D [Stylianou and Fyrillas, 2004, Thalmann and Musse, 2007, Gupta et al., 2009, Veksler, 2013].

Nous proposons d'utiliser conjointement les approches organisationnelles et holoniques, présentées dans les chapitres précédents, et d'utiliser un modèle de simulation multi-niveau afin d'adapter dynamiquement la simulation aux objectifs et aux contraintes imposées par les scénarios de simulation et les ressources de calcul disponibles.

Ce chapitre est structuré comme suit : une vision générale de notre modèle de simulation est présentée dans la section 5.2. Les sections 5.3 et 5.4 détaillent les parties dédiées à l'environnement et aux comportements des individus, respectivement. La section 5.5 présente une approche d'évaluation de la cohérence dans nos modèles de simulation multiniveau. L'implantation de notre modèle (dans une version académique et une version commerciale) est succinctement présentée dans la section 5.6. Enfin, la section 5.7 conclut ce chapitre.

5.2/ VUE GÉNÉRAL SUR LE MODÈLE DE SIMULATION

Dans [Michel, 2004, Michel, 2006, Gaud et al., 2008a], les auteurs considèrent que les modèles de simulation peuvent être décomposés en quatre parties principales :
- **Comportements des agents :** modélisation du processus délibératif des agents ;
- **Interactions :** modélisation des actions et des interactions des agents ;
- **Environnement :** définition et spécification des objets qui composent le monde simulé, ainsi que les dynamiques endogènes à l'environnement ;
- **Ordonnancement et exécution :** modélisation du passage du temps, et définition du modèle d'ordonnancement des agents.

La limite entre ce qui est considéré comme un agent et ce qui est considéré comme partie de l'environnement dépend du problème considéré. Toutefois, les agents représentent toujours les composants actifs du problème étudié.

Un certain nombre de principes fondamentaux doivent être respectés pour garantir la qualité d'une simulation et limiter les biais de simulation : (i) respecter la contrainte d'intégrité de l'environnement, (ii) respecter la contrainte de localité des agents, (iii) une distinction claire entre le corps de l'agent (variables d'état en dehors du contrôle de l'agent et faisant partie de la représentation de l'agent dans l'environnement, par exemple : sa vitesse, sa position, . . .) et l'esprit de l'agent (variables d'état sous le contrôle de l'agent, par exemple son émotivité, ses objectifs, ses motivations, . . .). Cette distinction peut être rapprochée de la disctinction proposée par GALILEO GALILEI entre les « qualités premières », qui pouvaient être décrites mathématiquement (Physique), et les « qualités secondes », plus subjectives [Burtt, 1932].

Nous proposons un modèle de simulation respectant ces principes pour créer des modèles de simulation d'individus dans des univers virtuels. L'architecture de notre

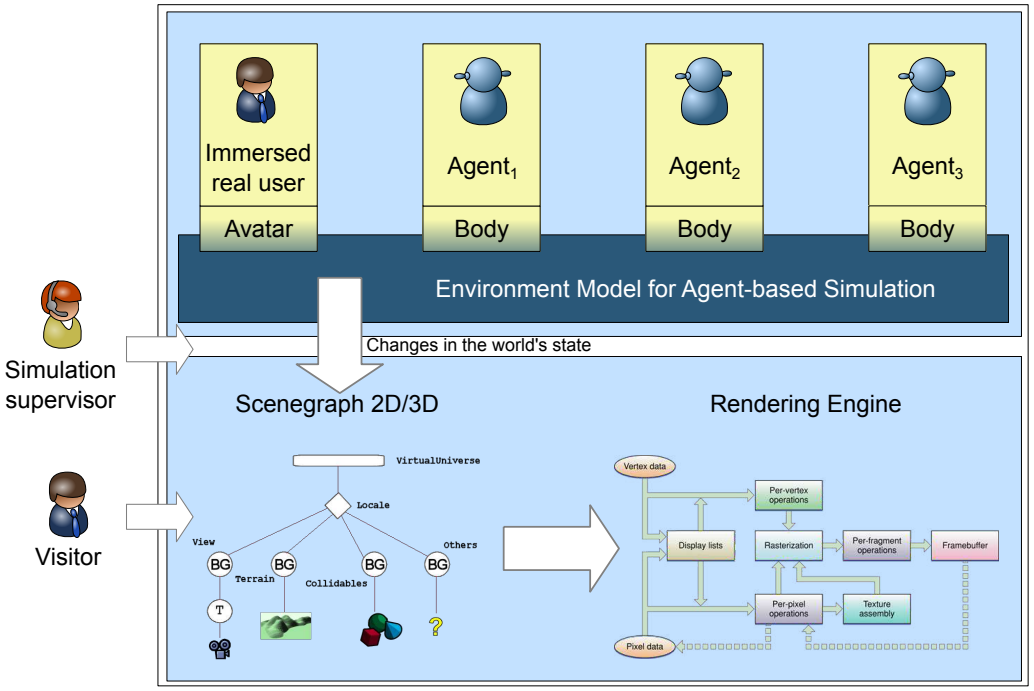


FIGURE 5.1 – Architecture générale d'un simulateur pour un environnement virtuel

modèle est illustrée par la partie supérieure de la figure 5.1. Chaque agent peut interagir avec les autres agents, soit directement, soit par stigmergie. L'agent ne peut percevoir et agir sur l'environnement physique que par l'intermédiaire de sa représentation dans celui-ci : son corps. La partie inférieure de la figure représente le logiciel d'affichage. Notons la présence d'un « avatar ». L'avatar est la représentation d'un utilisateur humain réel dans l'univers simulé. Afin de garantir la cohérence des interactions entre cet avatar et les agents peuplant l'univers, l'avatar est soumis aux mêmes contraintes que les corps des agents (imposés par les principes ci-dessus) : l'avatar respecte les lois du monde virtuel et ne peut agir en dehors de leurs limites.

Les deux sections suivantes présentent les modèles de l'environnement et des agents (architecture d'agent) à la base de nos simulations.

5.3/ MODÈLE DE L'ENVIRONNEMENT

L'environnement est communément considéré comme l'une des parties essentielles d'une simulation multiagent. Cependant, différentes perspectives existent sur le rôle qu'il joue dans un système multiagent et sur sa définition. Les environnements utilisés dans nos travaux peuvent également être considérés comme des cas particuliers d'« environnement physique » [Odell et al., 2002, Weyns et al., 2005]. La notion d'« environnement physique » se réfère à la classe de systèmes dans laquelle les agents, ainsi que les objets, disposent d'une position explicite et produisent des actions elles aussi localisées [Ferber and Müller, 1996].

Le modèle d'environnement proposé est un modèle d'environnement situé dédié à la simulation dans des environnements virtuels 1D, 2D ou 3D. Il est considéré comme inac-

cessible, non deterministe, dynamique et continu [Russell and Norvig, 2003]. Il est principalement conçu pour la simulation de foules et de trafic routier. Le modèle combine l'approche organisationnelle orientée-agent de CRIO avec les structures orientées-objet et les algorithmes classiquement utilisés dans les domaines de la simulation en réalité virtuelle et des jeux vidéos. Ce modèle est conçu pour fournir des mécanismes de perception et d'action réalistes aux agents. Il s'agit d'un cadriciel fournissant une collection d'outils connus ou adaptés pour une mise en œuvre plus facile et efficace de simulation de foules.

Les missions dévolues à l'environnement sont décrites dans la section 5.3.1. La section 5.3.2 présente les concepts principaux associés à l'environnement. Dans la section 5.3.3, nous proposons un modèle organisationnel et holonique de l'environnement.

5.3.1/ MISSIONS DE L'ENVIRONNEMENT

Les missions d'un environnement dans une simulation multiagent, initialement proposées par [Weyns et al., 2006], peuvent être adaptée à notre cadre et résumées par :

M1 - Partager l'information: L'environnement est une structure partagée par les agents, où chacun d'entre eux perçoit et agit. Les données associées sont généralement composées de structures hiérarchiques regroupant tous les objets qui composent le monde virtuel et sont utiles aux agents. L'environnement est ainsi hiérarchiquement décomposé en un ensemble de zones, sous-zones et ainsi de suite. Chaque zone est associée à l'ensemble des objets y étant localisés. À chaque niveau de la hiérarchie, les objets sont eux-mêmes reliés par le biais d'un ensemble de structures pour maintenir l'information topologique. De plus, chaque objet est associé à un ensemble d'informations sémantiques. Cela donne naissance à une structure complexe de données qui peut être considérée comme une sorte de ``*clustered graph*´´ ou hypergraphe. Cette partie de l'environnement contient toutes les structures utilisées pour organiser les informations structurelles, topologiques et sémantiques telles que des graphes, octrees, quadtrees, grilles, ...

M2 - Gérer les actions des agents et leurs interactions: Cet aspect est lié à la gestion des actions simultanées et conjointes des agents, et à la préservation de l'intégrité environnementale. Par exemple, lorsque deux agents poussent la même boîte, l'environnement peut calculer l'emplacement réel de la boîte selon les lois de la physique, et les forces appliquées. Sur cet aspect, le modèle influence-réaction [Michel, 2007] fournit une solution efficace.

M3 - Gérer les perceptions et les observations des agents: L'environnement doit être localement et partiellement observable. L'accès aux informations environnementales par les agents peut être géré et contrôlé. Ainsi il est possible de garantir le caractère partiel et local des perceptions.

M4 - Maintenir la dynamique endogène: L'environnement est une entité active, il peut avoir ses propres processus, indépendamment de ceux des agents. Un exemple typique est l'évaporation de phéromones dans les algorithmes basés sur les colonies de fourmis.

5.3.2/ VUE GÉNÉRALE DU MODÈLE DE L'ENVIRONNEMENT

L'ensemble des missions citées ci-dessus a abouti la proposition d'une architecture abstraite pour le modèle de l'environnement, et illustrée par la figure 5.2 et le diagramme UML sur la figure 5.3. Cette architecture est proche de celle proposée par [Weyns et al., 2005] tout en se focalisant sur la modélisation d'univers virtuels.

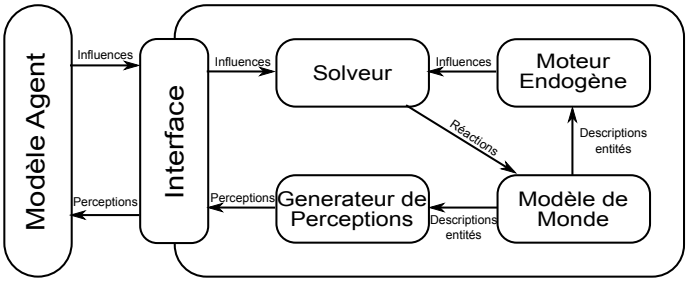


FIGURE 5.2 – Modèle de l'environnement dans JASIM

5.3.2.1/ ÉTAT DE L'ENVIRONNEMENT

L'environnement est caractérisé par son état $\sigma_t \in \Sigma$ à l'instant t. σ_t est constitué des états des objets composant l'environment (`WorldModel`, `WorldEntity`, ...) et des variables associées aux dynamiques endogènes de l'environnement (attributs de `EndogenousEngine`). Pour représenter les différentes possibilités de modification de l'état de l'environnement, nous introduisons le concepts de meterio et raffinons les concepts d'action et d'influence [Galland et al., 2009, Behe et al., 2014a, Behe et al., 2012a, Behe et al., 2014b].

5.3.2.2/ GESTION DU TEMPS DANS L'ENVIRONNEMENT

Nous avons spécialisé et raffiné le modèle formel de [Weyns and Holvoet, 2004] afin de résoudre les nœuds scientifiques décrits par les auteurs :

- **Synchronisation des agents et de la dynamique endogène :** Le problème est, que dans de nombreux cas, les activités en cours dans l'environnement sont associées au temps physique. L'évaporation de phéromones, par exemple, est principalement mise en œuvre en fonction du temps physique [Sauter et al., 2002]. Toutefois, la charge sur un système informatique fluctue continuellement. En conséquence, le déclin de l'intensité des phéromones n'évolue pas au prorata du temps de calcul disponible pour les agents.
- **Évolution du temps :** L'évolution temporelle d'un SMA peut être considérée comme une machine à états abstraite qui exécute, à chaque cycle, les activités des agents et l'activité dans l'environnement au même instant. De cette façon, le modèle assure la simultanéité conceptuelle entre les agents et l'environnement. Toutefois, l'exécution sur un calculateur étant séquentielle, la mise en œuvre pratique pose également le problème de la simultanéité des actions dans l'environnement.

Ces deux points sont primordiaux dans le cadre d'une simulation dans un univers virtuel. L'environnement représentant le monde physique, le temps évolue pour tous

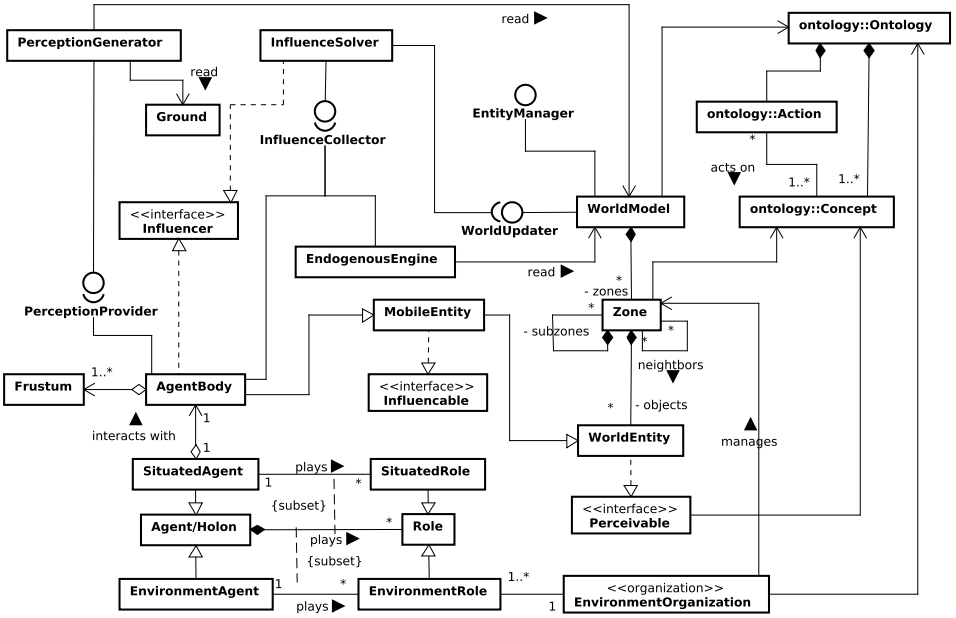


FIGURE 5.3 – Diagramme simplifié de classes du modèle de l'environnement

les agents de manière synchronisée. Ainsi, à chaque instant, tous les agents doivent percevoir le même état de l'environnement. De plus, la moindre incohérence concernant l'application simultanée de changements de l'état de l'environnement peut être perçue par l'utilisateur réel et ainsi provoquer une perte de l'immersion de ce dernier [Fuchs and Moreau, 2006]. Concernant la synchronisation des agents et de l'environnement, nous proposons d'intégrer et d'adapter le modèle d'interaction entre un agent et son environnement proposé dans [Ferber and Müller, 1996]. Concernant le second point, nous proposons d'intégrer une horloge globale dans l'environnement : c'est le modèle de l'environnement qui fait évoluer le temps dans la simulation. La valeur associée à cette horloge pourra être perçue par les agents. Mais elle ne peut pas changer durant la phase d'exécution des agents. Cette évolution du temps est représentée dans le cycle d'exécution illustré par la figure 5.4

5.3.2.3/ METERIO, ACTION ET INFLUENCE

Meterio : Une meterio [1] est une représentation abstraite participant à la modélisation des diverses interactions qui sont possibles pour un agent (agent-agent et agent-environnement). Les meterios sont les éléments d'entrée ou de sortie des interactions d'un agent. Ainsi, chaque meterio représente un changement d'état de l'environnement ou de l'agent. Ce changement d'état peut être réellement appliqué ou simplement désiré par un agent :

$$\begin{array}{rccll} Meterio: & \Sigma & \longrightarrow & \Sigma & \\ & E_t^r & \longmapsto & E_{t+\Delta t}^d & (t,\Delta t) \in \mathbb{N}^+ \times \mathbb{N}^+ \end{array} \tag{5.1}$$

Lorsqu'elle est appliquée à l'agent, une meterio correspond à un changement de l'état

1. Le mot « Meterio » est la contraction de trois termes : *meta*, *inter* et *actio*.

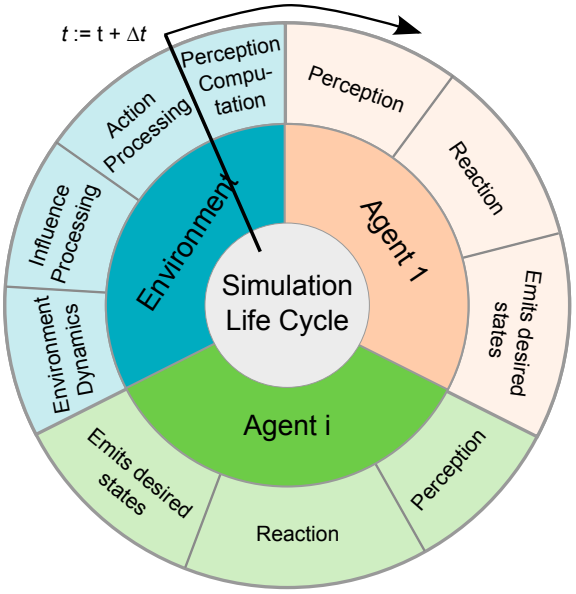


FIGURE 5.4 – Cycle d'exécution du modèle de simulation

mental de cet agent. Lorsqu'elle est associée à l'environnement, une meterio est un changement d'état de ce dernier. Dans ce cas, l'ensemble des agents et l'environnement formant un système complexe, il est impossible de prédire ou de garantir à chaque agent que l'état qu'il veut atteindre $E^d_{t+\Delta t}$ est accessible ou peut être atteint dans le temps indiqué Δt. Par conséquent, lorsqu'une meterio est appliquée à l'environnement, l'état d'arrivée associé est décrit comme étant un état souhaité de l'environnement : l'influence ; soit comme un changement réel de cet état : l'action (aussi appelée réaction dans le modèle de [Ferber and Müller, 1996]). La meterio est une abstraction commune aux concepts d'action et d'influence, décrits dans les paragraphes ci-dessous. Initialement, le concept de meterio a été proposé dans [Behe et al., 2014a] pour permettre la construction d'une ontologie de bâtiments virtuels, et l'inférence sur le contenu de cette ontologie. Le modèle de l'environnement ainsi enrichi est qualifié d'informé, et est détaillé dans la section 5.3.4.

Influence : Une influence est une meterio représentant une modification incertaine de l'état de l'environnement. Elle peut être émise soit par un agent, soit par les processus dynamiques endogènes à l'environnement. Ainsi, l'état retourné par une influence est un état désiré. Une influence est considérée comme valide seulement si l'état lié à son domaine respecte : $E^r_t \subseteq \sigma^r_t$, l'influence est une modification de l'état courant de l'environnement.

L'ensemble des états retournés par les influences émises est traité par l'environnement afin d'en déduire des modifications de son état global tout en respectant les lois et les règles régissant l'univers. Ce processus est supporté par le module d'analyse et de résolution des conflicts entre les influences (figure 5.2). Il ne prend en compte que les influences valides à l'instant t considéré. Le résultat fourni par ce module est un ensemble d'actions, décrites ci-dessous.

Action : Une action est une meterio représentant un changement d'état de l'environnement à un instant t :

$$\begin{array}{rccc} Action: & \Sigma & \longrightarrow & \Sigma \\ & E_t^r & \longmapsto & E_{t+1}^r \end{array} \tag{5.2}$$

L'hypothèse forte utilisée dans notre modèle est qu'une action ne peut pas provoquer d'incohérence dans l'état de l'environnement. En d'autres termes, une action doit respecter les lois et les règles de l'univers simulé. Afin de garantir cette hypothèse, notre modèle intègre un module appelé le *solveur d'influences*. Il fournit des algorithmes capables de détecter des conflits entre influences et de générer les actions résultant de la résolution de ces conflits.

5.3.2.4/ PERCEPTION

Le mécanisme de perception est utilisé par les agents pour obtenir des informations à partir de l'environnement dans lequel ils progressent. Il s'agit d'extraire les caractéristiques environnementales des éléments situés dans le champ de perception d'un agent. Le calcul des perceptions d'un agent i est exprimé par l'équation 5.3.

$$\begin{array}{rccc} Perception_i: & \Sigma & \longrightarrow & \mathcal{P}\Sigma \\ & \sigma_t^r & \longmapsto & Assimilation_i \circ Filter_i \circ Alter_i \circ Extract_i(\sigma_t^r) \end{array} \tag{5.3}$$

L'algorithme est divisé en quatre phases :

1. $Extract_i$ est la fonction permettant de parcourir les structures de données du `World Model` afin d'en extraire les objets de l'environnement ayant une intersection avec le champ de perception. Dans la formulation de l'équation 5.3, le champ de perception n'est pas considéré comme un paramètre. En effet, nous assumons que la fonction $Extract_i$ contient la description mathématisée ou algorithmique de ce champ. La fonction $Extract_i$ est en général fournie par le corps de l'agent : le champ de perception dépend uniquement des capacités sensorielles du corps.
2. $Alter_i$ permet d'altérer les perceptions extraites par $Extract_i$. L'altération ne prend en compte que les propriétés physiques de l'agent, c'est-à-dire les propriétés de son corps. Ainsi, il est possible de modéliser des agents ayant des défaillances sensorielles (astigmatisme, surdité partielle, ...). Tout comme pour la fonction précédente, $Alter_i$ est définie dans le corps de l'agent, et ce dernier ne devrait pas altérer sa définition.
3. $Filter_i$ est une fonction fournie par l'agent lui permettant de filtrer les perceptions fournies par son corps. Contrairement à $Alter_i$, cette fonction ne dépend pas des propriétés environnementales de l'agent.
4. $Assimilation_i$ permet à l'agent d'assimiler les informations perçues. Cette fonction est fortement dépendante de l'architecture de l'agent. Par exemple, elle peut modifier la représentation mentale des objets perçus dans une base de règles représentant les connaissances de l'agent.

Les fonctions $Extract_i$ et $Alter_i$ sont des composantes de la représentation physique de l'agent : le corps. Les fonctions $Filter_i$ et $Assimilation_i$ sont quant à elles parties prenantes de l'architecture interne de l'agent.

5.3.3/ VERS UN MODÈLE ORGANISATIONNEL ET HOLONIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

Nous avons appliqué avec succès notre modèle d'environnement pour les simulations de foules et de trafic (voir chapitre 6). Il est modulaire, complet et il permet la simulation d'un ensemble important d'entités avec une grande précision.

Toutefois, le nombre d'entités est de plus en plus important. Sous l'hypothèse de fournir des résultats microscopiques, le modèle de simulation doit être adapté pour permettre cette mise à l'échelle. L'agentification du modèle de l'environnement est une solution possible à cette problématique. Ainsi, les agents en charge d'exécuter le modèle de l'environnement pourront s'adapter aux besoins de la population d'agents représentant les individus dans le problème modélisé. Ces agents « environnementaux » peuvent prendre en compte des critères comme la répartition dans l'espace des agents supportant la population, leurs impacts sur la simulation, ... Cette section présente un modèle organisationnel et holonique de l'environnement, également détaillé dans [Demange et al., 2010b, Behe et al., 2014a, Demange et al., 2010a, Galland et al., 2011a]

La figure 5.5 indique les organisations qui composent l'environnement. Du point de vue global, l'organisation `Multilevel Simulation` définit le modèle de simulation du système. Deux rôles y sont définis. Le rôle `Pedestrian` est joué par les agents qui participent à la simulation, à savoir les piétons (ce rôle peut être remplacé par tout autre rôle devant être joué par les agents : conducteur, cycliste...). Le rôle `Environnement` est joué par un holon chargé de la conduite globale de l'environnement. Les interactions entre ces deux rôles sont basées sur le modèle influence-réaction [Michel, 2007], et sur le calcul de la perception des individus [Galland et al., 2009]. Chaque joueur du rôle de l'environnement doit avoir la capacité de calculer les perceptions de chaque piéton. Les joueurs d'`Environnement` doivent également avoir la capacité de rassembler les influences émises par les agents représentant les individus.

L'organisation `Topological decomposition` se concentre sur la structure de l'environnement lui-même. Cette organisation offre les capacités requises par le rôle `Environment` dans l'organisation précédente. L'organisation `Topological decomposition` peut contribuer au comportement de ce rôle de niveau supérieur. L'organisation `Topological decomposition` est composée de zones interconnectées. Elles correspondent généralement à la décomposition structurelle de l'environnement [Farenc et al., 1999a, Farenc, 2001, Vanbergue and Drogoul, 2002, Vanbergue, 2003]. Chacune d'elles est chargée des missions de l'environnement dans l'espace qu'elle couvre. Elles gèrent également les objets à l'intérieur de leurs espaces respectifs. Pour réaliser son comportement, un rôle `Place` doit interagir avec le rôle `Urban Database` afin d'obtenir et de modifier les informations relatives aux objets à l'intérieur de l'environnement.

Le rôle `Enclosing zone` soutient la modélisation multiniveau de l'environnement. L'organisation `Topological decomposition` représente un niveau dans la hiérarchie de composition de l'environnement. Il est nécessaire que chaque niveau dans cette hiérarchie ait accès à l'information dédiée à la dynamique multiniveau. Le rôle `Enclosing zone` est chargé de fournir l'état de la zone englobante, ainsi que les indicateurs et les contraintes donnés par l'agent gérant le niveau supérieur. Toutes ces informations seront décrits plus en détail dans la suite de ce document.

L'environnement `Environment Mission`, inspiré par [Weyns et al., 2006], définit les rôles requis pour satisfaire toutes les missions de l'environnement pour un domaine spécifique.

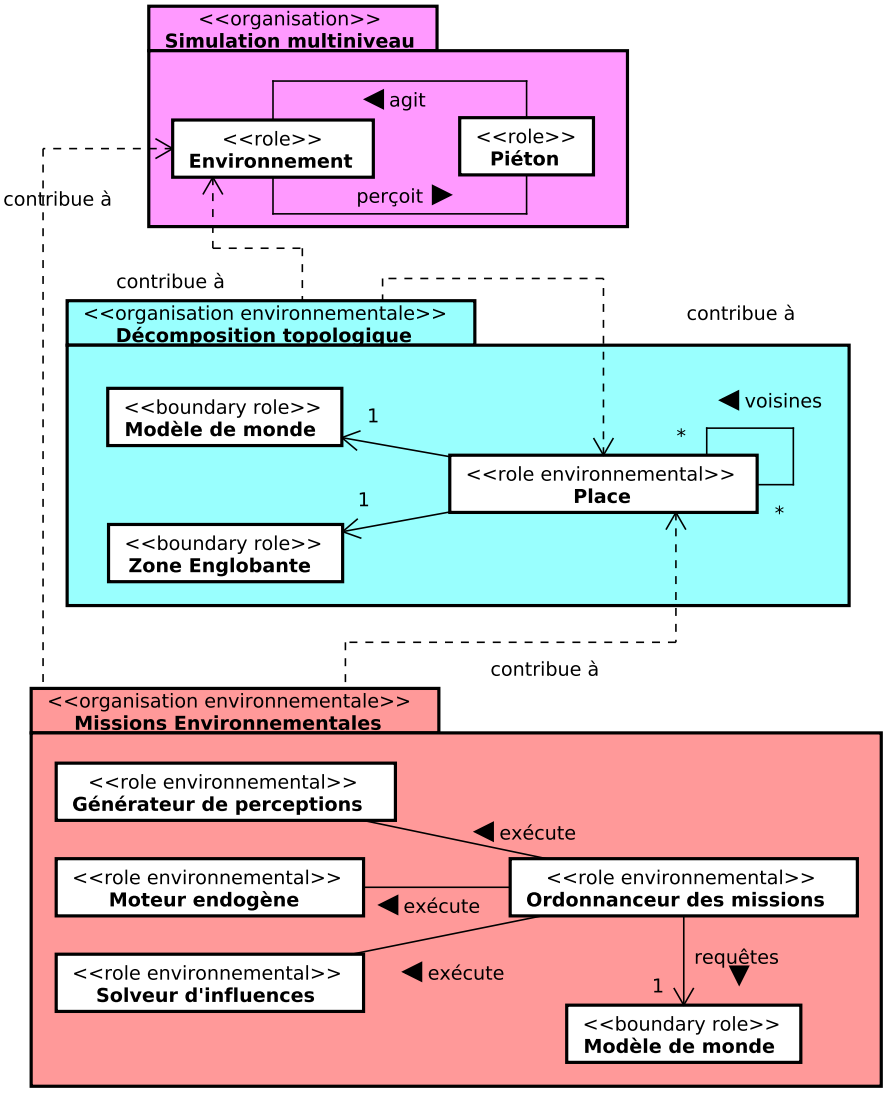


FIGURE 5.5 – Organisations et rôles de l'environnement

Une instance de cette organisation est considérée comme un groupe pouvant contribuer au comportement du rôle `Place`, qui est décrit dans le paragraphe précédent. Ce lien entre les deux organisations est représentée par la relation `contribute to` dans la figure 5.5.

L'étape suivante consiste à identifier les agents et leurs comportements afin d'obtenir une société supportant les organisations environnementales. La figure 5.6 illustre un exemple d'une telle société. Le point clé est de déterminer, pour chaque rôle, si un agent atomique ou un groupe d'agents doivent le jouer. Quand un agent gère une zone dans sa totalité, il joue le rôle `Place` dans l'organisation `Décomposition topologique`. Quand une zone doit être scindée et gérée par un groupe d'agents, l'un d'eux doit jouer les rôles `Place` dans l'organisation `Topological decomposition` et `Mission scheduler` dans l'organisation `Environment Mission`. Cette contrainte est similaire à l'introduction des rôles `Head` et `Super` dans une holarchie telle que définie par [Gaud et al., 2009]. La décision de décomposer ou non une place est de la responsabilité de l'agent jouant le rôle `Place` lui-

même. Cela dépend de plusieurs indicateurs provenant de deux sources : (i) les indicateurs individuels, qui sont spécifiques à un agent jouant le rôle `Place`, et (ii) les indicateurs partagés dans le cadre d'un groupe d'agents, instance de l'organisation `Topological decomposition`. Chaque agent jouant le rôle `Place` peut accéder à ces indicateurs en interagissant avec le rôle `Enclosing zone`.

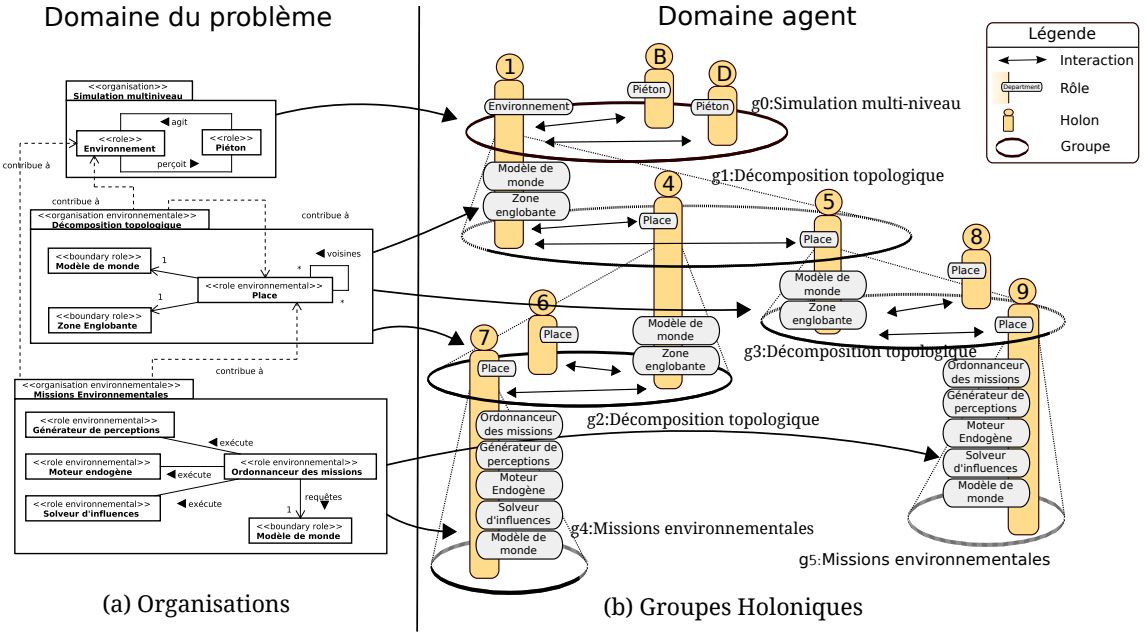


FIGURE 5.6 – Exemple d'une société d'agents qui gère l'environnement

Nous proposons trois grands types d'indicateurs :

- **Masse d'une zone :** Elle indique l'importance d'une zone de l'environnement pour la simulation. Cette valeur dépend du scénario de simulation. Par exemple, elle peut être proportionnelle à la densité de piétons dans la zone, ou dépend de la présence ou de l'absence d'un avatar.
- **Profondeur structurelle :** Elle décrit la profondeur minimale ou maximale de décomposition d'une zone. Ainsi, il est possible pour un rôle `Place` de limiter la profondeur de sa décomposition topologique.
- **Contrainte de ressource :** Elle décrit les limites d'une ressource disponible pour réaliser la simulation d'une zone. Cette contrainte permet de prendre en compte des informations proches de l'implantation ou de la machine, comme les ressources de calcul. Il est possible d'imposer une contrainte de temps pour supporter une exécution en temps réel. La contrainte de ressources peut décrire les limites pour tout type de ressource (mémoire, bande passante du réseau, ...).

À chaque instant de la simulation, les holons de l'environnement évaluent les indicateurs décrits ci-dessus. Cette évaluation détermine s'ils doivent changer d'état : être responsable d'une zone décomposée ou d'une zone atomique. La section 5.5 décrit une approche énergétique pour assurer la cohérence de la simulation multiniveau.

5.3.4/ VERS UN MODÈLE INFORMÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Les agents peuvent exhiber des comportements différents en fonction de leurs connaissances sur eux-mêmes (état émotionnel, personnalité, ...) et sur l'environnement (lieux particuliers, lois de l'univers, ...). Les environnements informés [Farenc et al., 1999a, Paiva et al., 2005] sont des modèles de l'environnement intégrant tout ou parties de la connaissance sur le domaine de l'application simulée. THALMANN considère que les environnements informés basés sur les ontologies permettent de créer des comportements plus complexes et plus réalistes dans les systèmes multiagents [Thalmann and Musse, 2007]. Il est nécessaire de préserver l'individualité et l'autonomie de chaque agent, afin d'augmenter le réalisme des simulations. Toutefois, dans le même temps, des scénarios complexes et composés d'un grand nombre d'agents doivent être pris en compte. L'utilisation d'ontologies et d'outils de raisonnement automatiques permet de réconcilier ces deux points de vue en permettant la génération et le contrôle de comportements complexes à la fois individuels et collectifs.

L'intégration de la connaissance, et plus particulièrement des ontologies, dans les modèles de simulation de foules fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature dédiée aux environnements virtuels. Dans [Musse and Thalmann, 2001, Braun et al., 2003, Barros et al., 2004], les auteurs se focalisent sur la simulation de foules durant des situations de crise. D'autres ont étudié les comportements « normaux » des individus *avant* que ces situations de crise se produisent. Dans [Paiva et al., 2005], les auteurs qualifient ces types d'environnements informés de « modèles d'environnement urbain » (UEM, ``*Urban Environment Model*´´).

Les UEM sont utiles pour répondre à trois problématiques [Thalmann and Musse, 2007, Behe et al., 2014b] :

1. l'enrichissement des connaissances sur l'environnement afin de permettre la création de comportements d'individus plus complexes et plus réalistes ;
2. permettre de sélectionner les entités qui doivent être des agents dans la simulation, puis de les créer à partir de leurs profils dans l'instance de l'ontologie ; et
3. autoriser la création semi-automatique d'objects géométriques constituant l'univers simulé.

Ces trois points ont guidé nos travaux sur l'intégration d'ontologies dans notre modèle [Behe et al., 2011c, Behe et al., 2011a, Behe et al., 2011b, Behe et al., 2012a, Behe et al., 2012b, Behe et al., 2014b, Durif et al., 2013]. L'enrichissement des connaissances sur l'environnement a été introduit en ajoutant une ontologie dans notre modèle de l'environnement. La figure 5.3, page 64, illustre les relations entre les concepts d'une ontologie, les zones et les objets de l'environnement. Les deux autres points sont détaillés ci-dessous.

5.3.4.1/ GÉNÉRER UNE POPULATION D'AGENTS ET LES OBJETS DE L'ENVIRONNEMENT

Nous proposons de décrire une simulation en utilisant deux points de vue ontologiques [Behe et al., 2014a] :

– **Ontologie de l'application :** L'ontologie du domaine d'application décrit toutes les entités liées ou produites par la simulation. Elle correspond à l'ontologie du domaine du problème décrit dans le chapitre 2. Elle décrit également chaque type de données

utilisées et produites au cours d'une simulation. Un exemple de cette ontologie est disponible dans la figure 5.8. Cette ontologie est conçue pour être utilisée étroitement avec les définitions de base, ci-dessous.

- **Ontologie des définitions de base :** Elle définit toutes les entités pouvant être rencontrées dans l'ontologie d'exécution, indépendamment de l'application considérée.
  - Les définitions du domaine de l'environnement décrivent les types d'objects constituant l'environnement situé.
  - Les définitions du domaine des agents décrivent les concepts liées aux modèles d'agents.

Ces deux dernières ontologies contiennent uniquement des classes et aucune instance. Elles décrivent les caractéristiques nécessaires pour qu'une instance soit classée en tant que concept : agent ou objet de l'environnement.

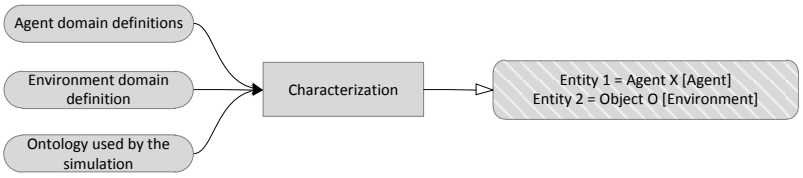


FIGURE 5.7 – Exemple de classification d'objets grâce à l'ontologie

L'ontologie du domaine des agents décrit l'ensemble des propriétés, des attributs qu'un concept doit posséder pour être considéré comme un agent durant la simulation. Par exemple, une porte peut être considérée à la fois comme un objet ou comme un agent. La distinction entre ces deux cas réside dans la réponse fournie par l'ontologie à la question : est-ce que la porte possède un processus autonome et pro-actif pour s'ouvrir et se fermer ? L'ontologie du domaine agent décrit les propriétés et les attributs permettant de caractériser l'existence d'un tel processus.

5.3.4.2/ GÉNÉRATION SEMI-AUTOMATIQUE DE L'UNIVERS 3D

L'une des problématiques liées aux UEM est de créer le modèle 3D de l'environnement. Le nombre de sources de données est important et celles-ci sont hétéroclites (systèmes d'information géographique, plans d'architecte, ...). Les problématiques scientifique et technique concernent la mise en commun et la fusion de ces différentes sources.

Au cours des quinze dernières années, l'organisation ``*buildingSMART*´´ a proposé des standards pour améliorer l'interopérabilité des logiciels utilisés dans l'industrie de la construction. ``*BuildingSMART*´´ produit des spécifications destinées à faciliter l'échange et le partage d'informations entre les logiciels. Le principal résultat de ces travaux est la norme ``*Industry Foundation Classes*´´ [2] (IFC) qui décrit au sein d'une ontologie l'ensemble des éléments constitutifs d'un bâtiment. Cette norme est actuellement utilisée dans les outils modernes destinés aux architectes, ingénieurs, gestionnaires de parc immobilier ou techniciens devant intervenir dans les bâtiments : les IFC forment une norme utilisée durant la totalité du cycle de vie d'un bâtiment, de sa construction à sa démolition. Les IFC fournissent un ensemble d'informations plus détaillé et plus complet que des formats spécifiques d'ontologies (DWG, ...) D'une part, chaque composant du bâtiment est

2. Norme ISO/PAS 16739 :2005

décrit en détail (géométrie, sémantique, matériaux, actions mécaniques, . . .) D'autre part, les IFC intègrent une vue pour chaque corps de métier : maçonnerie, électricité, . . . La figure 5.8 illustre une instance d'IFC décrivant un bâtiment composé de murs, de portes et de fenêtres.

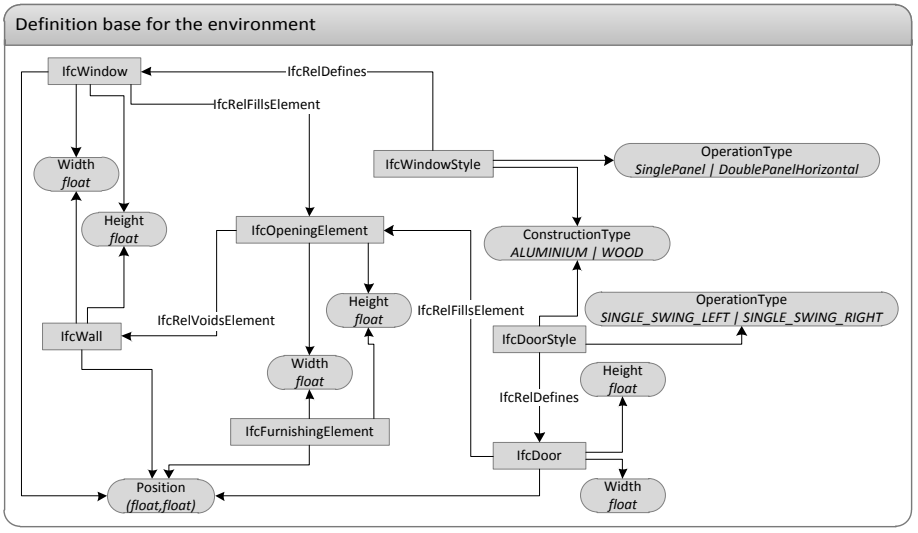


FIGURE 5.8 – Exemple d'une instance d'IFC

Depuis un modèle IFC, il est possible de créer un modèle numérique (y compris en 3D) représentant le bâtiment qui est ou sera construit. Nous utilisons cette propriété pour construire l'environnement de simulation et générer les règles de simulation selon la sémantique décrite dans les classes IFC.

5.4/ MODÈLE DES INDIVIDUS

La principale hypothèse dans la théorie normative du comportement des piétons [Hoogendoorn and Body, 2002] est que toutes les actions d'un piéton, exerçant une activité ou suivant un trajet à pied, auront une utilité (ou désutilité) pour lui. Les individus pourront prévoir et optimiser l'utilité totale, compte tenu de l'incertitude sur les conditions de circulation attendues (semblable à la théorie du consommateur microéconomique [Franck, 2002]). En choisissant parmi les options disponibles, ils tentent de réaliser une utilité nette maximale, qui est la somme des utilités des activités d'interprétation et des désutilités de l'effort liées aux déplacements vers les lieux d'activités. Cette notion est appelée maximisation de l'utilité subjective : chaque individu a sa propre vision subjective de la situation. Notre hypothèse est que tous les agents se déplaçant dans l'univers virtuel possèdent des comportements tendant à cette maximisation.

L'architecture utilisée pour modéliser les agents est composée de trois couches, illustrées sur la figure 5.9 :

– **Couche stratégique :** Au niveau stratégique, les individus décident des activités à réaliser dans l'univers. Si certaines de ces activités peuvent être discrétionnaires (par exemple l'achat d'un journal), d'autres peuvent être obligatoires (validation d'un billet avant d'accéder à un train). L'ensemble des choix peut être lié aux caractéristiques

environnementales (type et emplacement des magasins, ...). Dans cette couche, les agents utilisent en général une architecture de sélection des actions comme l'architecture ¨*Belief-Desire-Intention*¨ (BDI), ou les modèles ¨*Goal Oriented Action Planning*¨ [Orkin, 2003]

– **Couche tactique :** Le niveau tactique concerne les décisions à court ou moyen termes devant être prises par les agents en utilisant comme référence les décisions du niveau stratégique. À partir des objectifs donnés par ce dernier, le modèle de la couche tactique doit construire un plan d'action détaillé. Les localisations des différentes activités et les chemins pour atteindre ces localisations sont déterminés à ce niveau. L'architecture BDI peut être utilisée pour construire la séquence d'actions. Les algorithmes de recherche de plus court chemin peuvent former la base de calcul des trajets à emprunter sous la forme d'une séquence de zones de l'environnement : A* [Dechter and Pearl, 1985], D* [Stentz, 1994].
– **Couche opérationnelle :** Au niveau opérationnel, les individus prennent des décisions à très court terme. Ces décisions sont orientées par celles fournies par la couche précédente. Les modèles appartenant à cette couche décident de la trajectoire d'un individu, de sa vitesse ou de son accélération. Contrairement à [Hoogendoorn and Bovy, 2001] qui ne considère que le choix de la meilleure vitesse pour un individu, nous pensons que le modèle opérationnel d'un individu à pour principal objectif d'éviter les collisions avec les objets de l'environnement ou les autres individus l'entourant. En d'autres termes, nous considérons que les modèles de la couche opérationnelle ont pour objectif de déterminer les mouvements et les actions que devra réaliser le corps d'un individu.

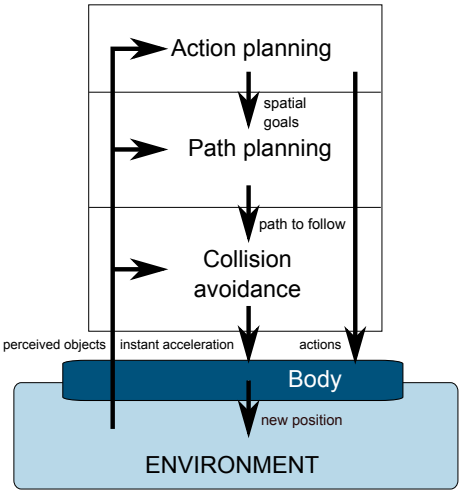


FIGURE 5.9 – Architecture en couches d'un agent

Il existe des interactions entre les modèles de chaque niveau de décision. La figure 5.9 donne un exemple d'interactions entre les couches constituant un modèle de simulation de piéton. Cette architecture est utilisée pour la simulation de piétons et de cyclistes dans des villes virtuelles [Thalmann and Musse, 2007, Paris et al., 2007, Buisson et al., 2013], dans des gares et des aéroports [Daamen, 2004, Demange, 2012], pour la simulation de l'évacuation d'un bâtiment en cas d'incendie [Geramifard et al., 2005]. Nous ne fournissons pas plus de détails dans cette section. En effet, le chapitre 6 présente et illustre différents modèles d'agents pour simuler des piétons, des cyclistes et des véhicules en

accord avec l'architecture présentée dans cette section.

5.5/ VERS L'ÉVALUATION DE LA COHÉRENCE D'UNE SIMULATION MULTINIVEAU

Dès lors que l'on considère différents niveaux d'abstraction au sein d'une même simulation, la question de la transition entre ces niveaux devient cruciale. Effectuer une transition entre deux niveaux d'abstraction implique que les modèles utilisés pour chacun d'eux soient compatibles. Cette section introduit quelques outils destinés à faciliter le travail du concepteur d'une simulation et l'élaboration de modèles compatibles. Ces outils permettent également d'évaluer le moment opportun pour effectuer un changement de niveau en fonction des contraintes imposées par le contexte de la simulation.

Le niveau le plus précis auquel il est possible de simuler un système donné est le niveau microscopique. Dès lors que l'on considère des niveaux d'abstraction plus élevés que le niveau microscopique, la précision de la simulation diminue. Les niveaux mésoscopiques ou macroscopiques ne constituent qu'une approximation du comportement du système selon un certain point de vue. L'objectif des outils fournis dans cette section vise à estimer le niveau de qualité de cette approximation.

Ce problème peut être apparenté à un problème plus large au sein des SMA qui consiste à évaluer la précision, l'exactitude ou l'efficacité d'un système relativement à la tâche qu'il doit effectuer et aux mécanismes locaux impliqués dans l'accomplissement de cette tâche. Diverses approches ont déjà été proposées dans la littérature, certaines s'inspirant de la biologie (fonction de ``*fitness*´´), d'autres de la sociologie (fonction d'utilité, satisfaction, ...), ou encore de la physique (entropie). Les solutions inspirées de la physique sont probablement les plus répandues. Parmi elles, l'entropie a été couramment employée, en particulier dans le domaine des SMA réactifs, pour représenter ou tenter de mesurer le désordre (respectivement l'ordre ou l'organisation) au sein d'un système. Diverses méthodes ont été proposées pour calculer l'entropie d'un SMA depuis la notion d'entropie sociale hiérarchique de [Balch, 2000], à l'entropie dynamique et statique de [Parunak and Brueckner, 2001, Parunak et al., 2002]. [Van Aeken, 1999] utilise également l'entropie pour tenter de déterminer le meilleur compromis entre la taille et l'équilibre de sa structure hiérarchique dans les *systèmes multiagents minimaux*.

Même si cette mesure s'avère utile dans de nombreux cas, l'entropie possède deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, elle dépend des transformations passées du système : l'entropie ne peut pas être considérée comme une fonction d'état. En cela, deux systèmes identiques peuvent être dans le même état, mais avoir des entropies différentes. En second lieu, l'entropie est principalement une mesure globale qui ne tient pas compte des phénomènes locaux du système.

Une solution relativement généraliste réside dans le calcul de l'énergie comme fonction d'état au niveau de l'agent et du système [Contet et al., 2007]. Cette solution est bien adaptée aux systèmes holoniques grâce aux propriétés compositionnelles de l'énergie. Cependant, l'énergie n'est pas toujours facilement calculable. Elle est principalement utilisée dans les modèles de comportements basés sur la notion de force ou ceux permettant une analogie entre la sémantique des énergies et celles des variables comportementales.

D'autres méthodes intéressantes basées sur la physique statistique ou la thermodynamique sont de plus en plus utilisées [Martinas, 2004, Baras and Tan, 2004]. Ces méthodes sont basées sur la fonction de partition Z [3] de laquelle découlent toutes les fonctions d'état dans les systèmes thermodynamiques, telles que la fonction de Gibbs, l'Énergie libre, l'Enthalpie, l'Enthalpie libre, ... Ces méthodes basées sur la fonction Z sont capables de tenir compte statistiquement de tous les éléments comportementaux des composants d'un système afin de calculer une valeur globale représentative. La principale difficulté de ces méthodes concerne les conditions restrictives de son application. En effet, la physique statistique a pour but d'expliquer le comportement et l'évolution de systèmes physiques comportant un grand nombre de particules (systèmes macroscopiques), à partir des caractéristiques de leurs constituants microscopiques (les particules). Pour être en mesure de calculer une valeur significative, le nombre des individus (ici des agents) au sein du système doit être suffisamment important pour être statistiquement significatif.

La formulation de ces indicateurs est bien souvent dépendante de l'application étudiée et, par conséquent, du modèle du système. Chacun doit déterminer la meilleure analogie relativement au problème en cours d'étude. Dans le cadre de l'approche proposée pour la simulation de piétons, une version basée sur le calcul des énergies a été choisie. En effet, dès lors qu'il y a mouvement (déplacement des piétons), la vitesse et l'accélération peuvent être calculées.

Le principe de base de l'approche proposée réside dans le calcul de l'énergie des holons composant la holarchie. Le niveau de qualité de l'approximation réalisée à un niveau donné de la holarchie est obtenu par comparaison récursive des énergies des holons des niveaux inférieurs. Trois types d'énergie sont pris en compte :

- L'énergie cinétique E_{c_i}, mesure liée à la dynamique, ou plus exactement à la vitesse du holon i considéré.
- L'énergie potentielle de l'objectif E_{pg_i}, dépendante de l'objectif du holon i
- L'énergie potentielle de contrainte E_{pc_i}, liée aux éléments qui entravent la progression du holon i vers son objectif : conflits avec les autres holons, obstacles éventuels dans l'environnement, ...

Ces trois mesures peuvent être considérées comme des fonctions d'état, car elles ne dépendent que des paramètres et caractéristiques courants d'un holon tels que la vitesse, la position relative à l'objectif à atteindre, les positions des obstacles et des autres holons (dans un périmètre donné d'influence). De plus, ces indicateurs peuvent être calculés quel que soit le niveau d'abstraction (le niveau dans la holarchie) pris en compte. Que ce soit pour un holon représentant un composant atomique du modèle ou un groupe de composants, la formulation de ces indicateurs énergétiques ne change pas.

Sur la base de ces trois énergies, il est possible de calculer l'énergie globale E_k d'un holon k selon la définition fournie dans l'équation 5.4. Cette énergie globale caractérise l'état courant du holon k.

$$E_k = E_{c_k} + E_{pg_k} + E_{pc_k} \tag{5.4}$$

L'évaluation de la qualité de l'approximation fournie à un niveau n donné dans la holarchie est alors basée sur la comparaison des énergies entre niveaux adjacents. La notion de similarité s entre niveaux de simulation est définie par :

$$s_{n+1} = (\Delta E)_{n+1} = E_j^{n+1} - E_i^n \tag{5.5}$$

3. Pour plus de précision voir : http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_partition

avec E_i^n l'énergie d'un holon i de niveau n et E_j^{n+1} l'énergie de son super-holon j (niveau $n+1$).

Si un super-holon décide de ne pas exécuter ses membres, l'énergie de ceux-ci sera tout de même calculée. La similarité entre l'énergie d'un membre et celle de son super-holon permet de déterminer si le comportement agrégé associé au super-holon constitue une approximation acceptable du comportement de ce membre. La moyenne de ces similarités permet de déterminer si l'approximation est acceptable pour tous les membres. Si cette moyenne dépasse un seuil donné, le super-holon doit dans la mesure du possible tenter d'exécuter ses membres et d'affiner la simulation. Cette approche permet de détecter une approximation trop importante du comportement d'un membre en particulier. Ces indicateurs permettent à l'utilisateur de la simulation de disposer d'un outil lui permettant d'estimer le décalage entre le niveau de précision de sa simulation et le niveau le plus précis susceptible d'être atteint (le niveau situé au plus bas de la holarchie d'exécution). Par extrapolation, l'utilisateur peut estimer le décalage entre la simulation et le fonctionnement réel de son système.

Si la simulation dispose de toutes les ressources de calcul dont elle a besoin, la simulation sera réalisée au niveau le plus précis. En somme, les holons du niveau 0 de la holarchie seront toujours exécutés. En revanche, si ces ressources viennent à manquer, le simulateur est capable de déterminer les éléments qui nécessitent une allocation prioritaire des ressources disponibles. En effet, les indicateurs permettent d'identifier quels sont les holons qui ne sont pas exécutés et dont le comportement est approximé de manière insatisfaisante par leur super-holon. Ces indicateurs permettent ainsi d'identifier quels sont les holons qui doivent en priorité bénéficier des ressources disponibles et où la simulation doit être affinée.

Nous proposons dans [Gaud, 2007, Gaud et al., 2008a, Gaud et al., 2007b, Galland et al., 2008] un ensemble d'équations permettant de calculer les énergies cinétiques et potentielles de holons chargés de simuler des piétons et des groupes de piétons. Dans [Demange, 2012, Galland et al., 2014a, Demange et al., 2010b], nous proposons des équations énergétiques dédiées à l'évaluation des holons de l'environnement, présentés dans la section 5.3.3.

5.6/ PLATE-FORMES JASIM ET SIMULATE®

Le modèle présenté dans le présent chapitre a fait l'objet de deux implantations : l'une académique, JASIM, et l'autre commerciale, Simulate®. JASIM a été développée au sein de notre laboratoire sur la base des outils et des technologies existantes : Java, plate-forme JANUS, plate-forme de réalité virtuelle de l'UTBM. En 2009, nos modèles et nos outils ont fait l'objet d'une collaboration active et d'un contrat de transfert technologique au profit de la société Voxelia [4]. Le résultat de cette collaboration est la plate-forme Simulate®. Cette plate-forme commerciale propose une implantation des mêmes modèles que JASIM en utilisant des technologies logicielles différentes (C#, Unity3D).

L'architecture globale de la plate-forme JASIM est illustrée par la figure 5.10. JASIM est écrite en Java 1.6 et est composée de quatre modules principaux représentant un total de 88.805 lignes de code. Les différentes fonctionnalités offertes par chaque module sont

4. Voxelia (http://www.voxelia.com) est une société créée par d'anciens membres de notre équipe de recherche.

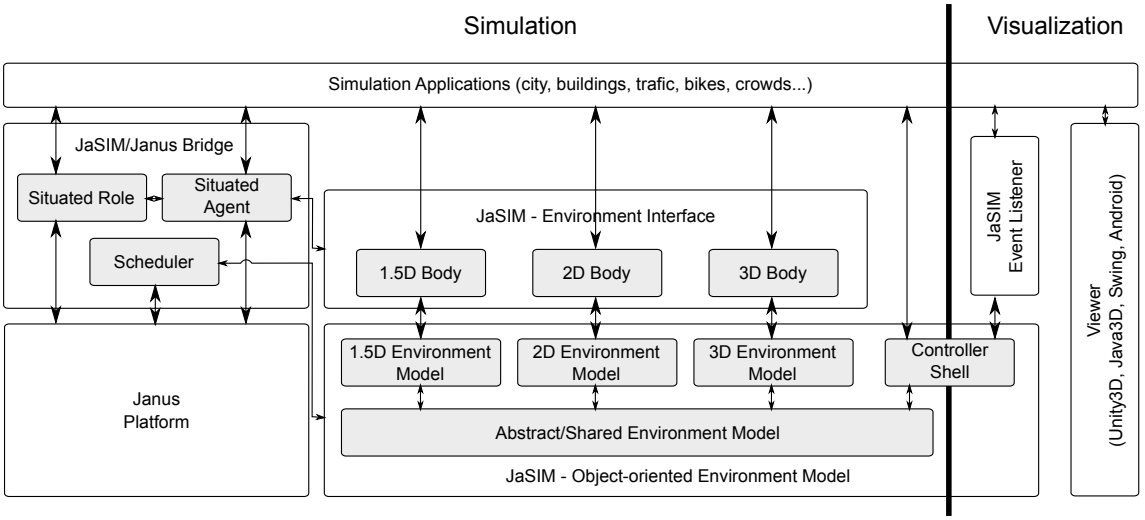


FIGURE 5.10 – Architecture de la plate-forme JASIM, basée sur JANUS

brièvement décrites ci-dessous :

- **Pont JASIM-JANUS :** Ce module est une extension de la plate-forme JANUS, et constitue la partie orientée-agent de la plate-forme JASIM. Il fournit un ensemble d'organisations et d'architectures d'agents dédiées à la simulation. Il étend également les concepts d'agent et de rôle de JANUS pour accélérer le développement de simulations multiagents. Une collection d'outils pour gérer l'exécution et l'introspection des agents est également fournie par ce module.
- **Modèle orienté-objet de l'environnement :** Ce module est la partie principale de la plate-forme JASIM et fournit tous les outils nécessaires pour modéliser et gérer la création et la modification des structures environnementales. Il contient, en particulier, toutes les structures hiérarchiques et graphiques utilisées pour calculer les perceptions de l'agent.
- **Interface de l'environnement :** Ce module permet la connexion entre les agents dédiés à une application et la plate-forme JASIM. Il fournit un ensemble complet d'architectures (agents, corps) pour divers types d'environnements virtuels. Chaque type de corps fournit aux agents applicatifs une collection d'outils pour percevoir son environnement et émettre une collection d'influences.
- **Observateur des événements de JASIM :** Ce module est destiné à fournir une interface commune pour la gestion des communications événementielles avec des outils externes et des interfaces utilisateurs graphiques. Une des fonctionnalités de ce module permet de connnecter JASIM avec des applications distantes sur un réseau informatique.

La plate-forme Simulate® adopte une approche légèrement différente en fusionnant les modèles utilisés pour le rendu graphique (partie ``*Viewer*´´) et le modèle de l'environnement, illustrés sur la figure 5.1, page 62. Ainsi, le simulateur profite des structures de données et des algorithmes déjà implantés dans le logiciel de rendu 3D.

Des exemples concrets de déploiements des plates-formes JASIM et Simulate® sont présentés dans le chapitre 6.

5.7/ CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous présentons un ensemble d'outils destinés à la simulation multiagent et multiniveau dans des univers virtuels. Notre proposition est basée sur trois types de modèles : le modèle du système cible, le modèle d'environnement, et le modèle d'exécution. Les modèles du système et de l'environnement sont ensuite projetés sur deux holarchies distinctes chargées de leur exécution. Ces holarchies offrent le support nécessaire à la mise en place des mécanismes de changement de niveau et à la modulation dynamique de la complexité des comportements d'une simulation, tant du côté des agents du système cible que des agents de l'environnement. Elles peuvent être indépendantes l'une de l'autre.

Les outils de gestion d'une simulation, décrits dans ce chapitre, reposent sur un modèle d'organisation chargé de la gestion de l'ordonnancement et de la synchronisation des holons au sein de la simulation. Cette organisation constitue la base de la conception d'un modèle d'exécution. Elle permet de modéliser la structure organisationnelle d'un simulateur sous forme de groupes et de rôles en accord avec la structure du modèle à exécuter et les différents niveaux d'abstraction qui le composent.

Ce chapitre introduit également un ensemble d'indicateurs, dépendants de l'application cible, et qui permet d'évaluer l'écart entre deux niveaux de simulation adjacents en prenant comme référence le niveau le plus précis disponible. Ces indicateurs tentent d'apporter une réponse au problème complexe de l'évaluation de la cohérence d'une simulation multiniveau. Ils permettent également d'identifier les éléments de la simulation qui nécessitent en priorité l'attribution des ressources de calcul disponibles. Ces outils participent à garantir le meilleur compromis entre les contraintes d'exécution de la simulation et son niveau de précision. Ils permettent également d'évaluer le moment opportun pour effectuer un changement de niveau d'abstraction.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été appliqués dans différents cas présentés dans le chapitre 6 : simulation d'un réseau de bus, de piétons, de cyclistes et de conducteurs de véhicules. De plus, nous avons instancié nos modèles pour créer la première version du simulateur cyber-physique dédié au Véhicule Intelligent de notre laboratoire [Gechter et al., 2012, Lamotte et al., 2010].

6

APPLICATIONS AUX DOMAINES DU TRANSPORT ET DE LA MOBILITÉ

6.1/ INTRODUCTION

Les modèles présentés dans les chapitres précédents ont été conçus pour permettre leurs instanciations sur différentes applications concrètes. Dans ce chapitre, nous présentons trois applications dans les domaines du transport et de la mobilité d'individus.

Considérons les définitions de la « simulation » données par [Shannon, 1977] et [Fishwick, 1997]. Trois tâches fondamentales sont toujours présentes dans les projets de simulation :

1. la conception d'un modèle de simulation ;
2. l'exécution du modèle de simulation sur un simulateur ; et
3. l'analyse des résultats pour en déduire le comportement du système.

La conception et l'exécution d'un modèle de simulation sont souvent basées sur un ensemble de variables permettant de contrôler les comportements des entités composant le système étudié : les paramètres du modèle. L'une des problématiques classiques est la calibration de ces variables afin que le modèle simulé soit une simplification acceptable du système réel [Zeigler et al., 2000]. De plus, la simulation doit fournir un ensemble de résultats pouvant être étudié, analysé et synthétisé par des experts pour en déduire le comportement du système étudié dans le cadre de scénarios de simulation. Notre première application, dédiée à la modélisation et la simulation d'un réseau de bus, permet d'illustrer et de détailler ces deux points. Nous proposons d'utiliser des données directement collectées depuis les bus réels, puis de les agréger afin de fournir des lois stochastiques pour chaque variable du modèle. De plus, nous proposons un ensemble d'indicateurs, conçus en collaboration avec les experts, permettant de quantifier et qualifier les propriétés du réseau de bus.

Comme, nous l'avons indiqué dans l'introduction générale, l'une des problématiques que nous étudions est la minimisation de l'approximation d'un système réel par un modèle de simulation [Zeigler et al., 2000]. Dans cette perspective, nous proposons un modèle d'évitement de collision au niveau microscopique permettant de produire des trajectoires lissées et minimisant/éliminant les oscillations des individus (utilité d'un individu dans la cadre de la théorie normative du comportement des

piétons [Hoogendoorn and Body, 2002]). Ce modèle permet de reproduire efficacement les comportements de déplacement de piétons et de cyclistes.

La dernière application présentée dans ce chapitre illustre la capacité de l'approche organisationnelle et holonique pour modéliser une population de prêt de 6 millions d'habitants, dans laquelle une fraction d'individus veut réaliser du covoiturage.

Ce chapitre est structuré comme suit : la section 6.2 décrit un modèle de réseau de bus et les indicateurs fournis aux experts pour déduire le comportement de celui-ci. La section 6.3 décrit un modèle de comportement qui peut être utilisé pour représenter des piétons ou des cyclistes se déplaçant dans une ville. La dernière application, présentée dans la section 6.4, illustre un modèle permettant de constituer des groupes d'usagers et de négocier un covoiturage au sein de ceux-ci. Ce dernier exemple illustre également nos travaux en cours concernant la modélisation de systèmes complexes et à large échelle. La section 6.5 conclut ce chapitre.

6.2/ MODÉLISATION ET ÉVALUATION D'UN RÉSEAU DE BUS

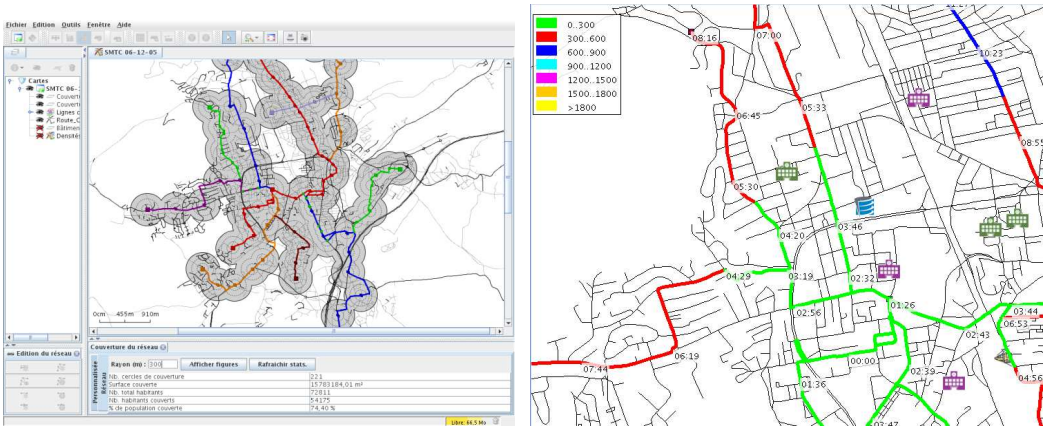
Dans cette section, nous présentons un modèle pour l'évaluation d'un réseau de transport public (RTP) pour des villes de taille moyenne (moins de 100.000 habitants). Ces villes sont trop petites pour utiliser les mêmes méthodes et les mêmes outils que les villes de plus grande taille : trop coûteux en temps, argent et compétences. En outre, elles sont plus sensibles aux coûts de fonctionnement, aux coûts sociaux associés à la restructuration du système et aux coûts d'investissement concernant la flotte de bus et les infrastructures routières [Fernandez et al., 2008]. Malheureusement, les outils traditionnels d'évaluation et de simulation des RTP présentent plusieurs inconvénients dans le contexte des villes de taille moyenne [Galland et al., 2004] :

- **Accessibilité :** Des compétences et des aptitudes spécifiques et élevées sont nécessaires pour utiliser ces outils ;
- **Clarté :** Il est difficile de comprendre les sorties fournies par les outils existants sans l'aide d'experts des RTP. Cela pose également le problème de la confiance envers ces experts ;
- **Efficacité :** Il est encore long et difficile de créer des instances de modèles de RTP.
- **Évolutivité :** Les modèles existants ne permettent pas d'intégrer facilement et rapidement de nouvelles évolutions du RTP : comment modifier en quelques minutes la définition du réseau de bus ? Comment prendre en compte différents modes de transport dans un modèle unique ?. . .

Nous proposons des modèles et outils pour résoudre ces problèmes. Ils permettent de (i) collecter des données à partir de systèmes d'information (système d'information géographique, système d'aide à l'exploitation, . . .) et également à partir des capteurs embarqués dans les bus ; (ii) modéliser le réseau de bus « facilement » en utilisant les informations collectées comme guide ; (iii) évaluer le réseau de bus en fournissant une collection d'indicateurs définis en collaboration avec l'autorité régulatrice.

Nous proposons le modèle Metro-B et son évolution SARTRE [Galland et al., 2011b, Galland et al., 2004, Galland et al., 2010b] pour permettre aux autorités régulatrices l'étude et l'évaluation de leur réseau de bus et de ses évolutions, tout en minimisant les coûts cités précédemment. Ces modèles ont été appliqués avec succès et utilisés par le

Syndicat Mixte des Transports du Territoire de Belfort [1] (SMTC) pour refondre totalement l'offre de transport urbain et sub-urbain (projets Metro-B et SARTRE, page 112).



(a) Évaluation de la couverture de la population par le réseau

(b) Évaluation des temps de trajet

FIGURE 6.1 – Captures d'écrans de l'application Metro-B/SARTRE

6.2.1/ MODÉLISATION D'UN RÉSEAU TRANSPORT PUBLIC

Dans cette section, nous présentons les concepts utilisés pour construire le modèle de l'environnement urbain et celui du réseau de bus. La figure 6.2 présente le diagramme de classe décrivant ces concepts et leurs relations.

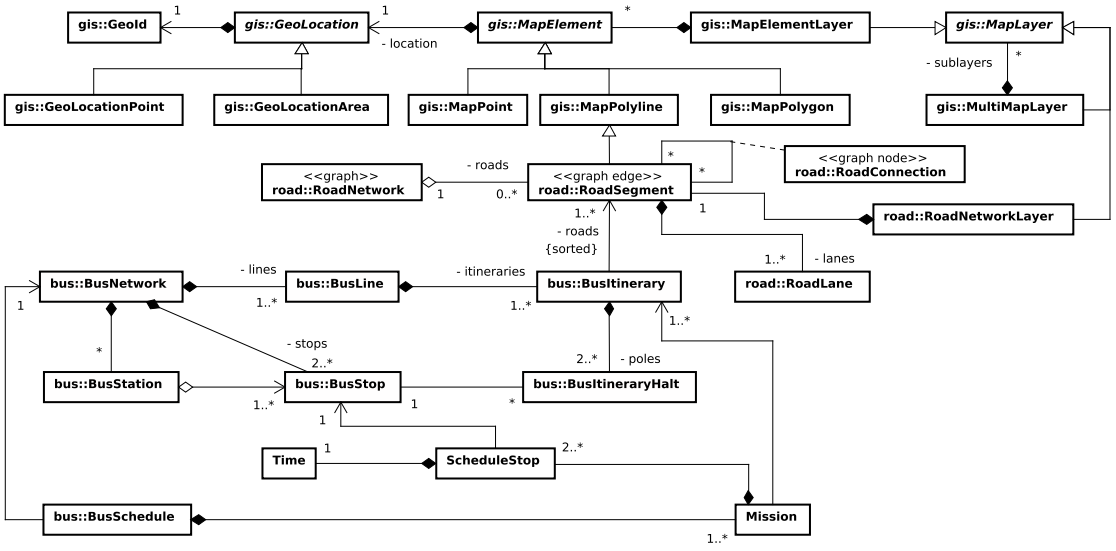


FIGURE 6.2 – Diagramme de classes du modèle Metro-B

1. SMTC : autorité régulatrice des transports du Territoire de Belfort

Modélisation de l'environnement urbain : Le modèle de l'environnement urbain est inspiré des systèmes d'information géographique (SIG). Fondamentalement, il organise les données cartographiques dans une collection de couches. Chaque couche contient un type de données : les routes, les bâtiments publics, les écoles, les zones à forte densité de population, ... Les données associées à une couche sont des formes géométriques géolocalisées appellées éléments cartographiques. Dans la figure 6.2, les éléments de l'environnement urbain sont définis dans le paquet `gis`. Les routes constituent un sous-ensemble spécifique des objets SIG. L'ensemble des routes forme un graphe constitué des segments de routes (`RoadSegment`) et des connexions entre elles (`RoadConnection`). Parce que le réseau routier est une structure de données centrale dans notre modèle, nous proposons d'utiliser des structures de données spatiales (``*quad-tree*´´) et les algorithmes associés pour obtenir une complexité d'accès acceptable [2] aux éléments du réseau de routes. Cette structure est rendue nécessaire lorsque des évaluations doivent être faites à partir de critères spatiaux afin de pallier à la complexité associée à la structure de graphe du réseau routier [Galland et al., 2011b].

Modélisation d'un réseau de transport public : Un réseau de bus est modélisé à l'aide de concepts décrivant la structure du réseau, et d'autres décrivant ses propriétés liées au temps. La structure d'un réseau de bus décrit l'ensemble des lignes de bus (`BusLine`). Une ligne est composée par un ensemble de trajets (`BusItinerary`), reliant généralement les deux terminus. Chaque trajet est décrit par un chemin sur le réseau routier et par une séquence d'arrêts de bus (`BusItineraryHalt`). Nous distinguons les arrêts physiques (`BusStop`), correspondant à un arrêt dans le monde réel (un poteau de bus), et les arrêts théoriques associés à un trajet. Cette distinction permet de représenter le passage de plusieurs lignes de bus à un même arrêt « physique » (ce dernier étant le seul à avoir une position géographique). Un pôle d'échange est décrit par un ensemble d'arrêts physiques. Une mission est l'association d'un trajet et d'horaires de passage aux arrêts. L'ensemble des missions permet de construire les tableaux d'horaires distribués aux usagers (tableaux d'horaires) et aux chauffeurs (tableaux de marche).

6.2.2/ ÉVALUATION DU RÉSEAU DE TRANSPORT

Différents indicateurs ont été proposés pour évaluer le réseau de transport public. Ci-dessous, nous présentons l'évaluation de la couverture de la population par le réseau de transport. D'autres indicateurs ont été développés. Citons pour exemples :

- l'estimation de la taille de la flotte de bus nécessaire pour respecter les tableaux de marche du réseau ;
- l'évaluation des temps d'attente, et des temps et des distances de transit aux pôles d'échanges ;
- l'estimation des temps de trajet entre deux arrêts du réseau (incluant les changements de lignes de bus) ;
- la validation des tableaux de marche fournis par des outils de planification tiers grâce à la simulation des déplacements des bus et du trafic routier ;
- l'évaluation du taux de remplissage des bus à travers la simulation des bus, du trafic routier et des passagers.

2. $O(\log_4 n)$ où n est le nombre de cellules résultantes de la discrétisation de l'environnement sous la forme d'une grille irrégulière.

Le lecteur intéressé pourra se reporter à [Galland et al., 2011b, Galland et al., 2010b] pour obtenir une liste plus complète d'indicateurs et sur leurs formulations.

Évaluation de la couverture de la population : L'un des indicateurs couramment utilisés par les autorités régulatrices est l'estimation de la couverture de la population par le réseau de transport. La couverture de la population est la proportion de la population qui est « proche » d'un arrêt de bus ou d'un pôle d'échange. Cette notion de proximité est un paramètre qui est en général une norme nationale. En France et en Europe, la distance utilisée pour considérer qu'un usager est couvert par le réseau urbain de bus est de 400 mètres. L'évaluation de la couverture est basée sur une carte de densité de population. Cette carte se compose de zones dans lesquelles une densité de population a été relevée par les institutions de statistiques (INSEE pour la France). Nous proposons une évaluation de cette couverture en utilisant une union de cercles centrés sur chaque arrêt de bus. La figure 6.1(a) donne un exemple de cette forme géométrique. Le nombre d'habitants à proximité d'un arrêt de bus est donné par :

$$\rho_c = \frac{A(a \cap c).N(a)}{A(a)} : \forall c \in Circle, \forall a \in DensityMap, a \cap c \neq \emptyset \tag{6.1}$$

où $N(a)$ est le nombre de personnes dans la zone a et $A(b)$ est la zone couverte par b. Pour chaque paire de cercles possédant une intersection géométrique, la zone couverte par cette intersection doit être prise en compte qu'une seule fois :

$$p_c = \rho_c - \frac{A(a \cap b).\rho_b}{A(b)} : \forall a, b \in Circle^2, a \cap b \neq \emptyset \tag{6.2}$$

Nous obtenons l'estimation de la couverture de la population G :

$$G = \frac{\sum_{c \in Circle} p_c}{\sum_{a \in DensityMap} N(a)} \tag{6.3}$$

6.2.3/ COLLECTE D'INFORMATIONS DANS LES BUS

Les modèles et les outils de simulation de trafic et de RTP sont souvent confrontés à un manque de données précises sur les activités humaines individuelles et notamment les activités liées à la mobilité. Nous proposons la définition et l'utilisation d'un ``*Digital Data Storage*´´ (DDS) pour collecter les données à partir de capteurs embarqués dans les bus. L'objectif d'un DDS est de faciliter la collecte et la distribution de données dans un système distribué. Un DDS propose un ensemble de services permettant à des participants d'écrire (pour les capteurs) et de lire (pour les clients) des données tout en garantissant une qualité de service importante. Les deux spécifications les plus proches du principe de DSS sont le service de notification [OMG-NOT, 2004] et l'architecture de simulation distribuée [IEEE-HLA-Evolved, 2010].

L'architecture proposée, illustrée par la figure 6.3, est une adaptation à un réseau de bus réel des architectures classiques de DDS. Un logiciel est embarqué dans le bus pour recueillir les données du bus (accélération, vitesse, ...) et des capteurs embarqués (caméra, billeterie, ...). Un protocole de communication est défini et est utilisé par des processus permettant le déplacement des données des bases de données embarquées dans la base de données centrale. Une application est proposée à l'utilisateur final pour lui permettre d'interroger la base centrale afin de construire les représentations graphiques des indicateurs décrits précédemment.

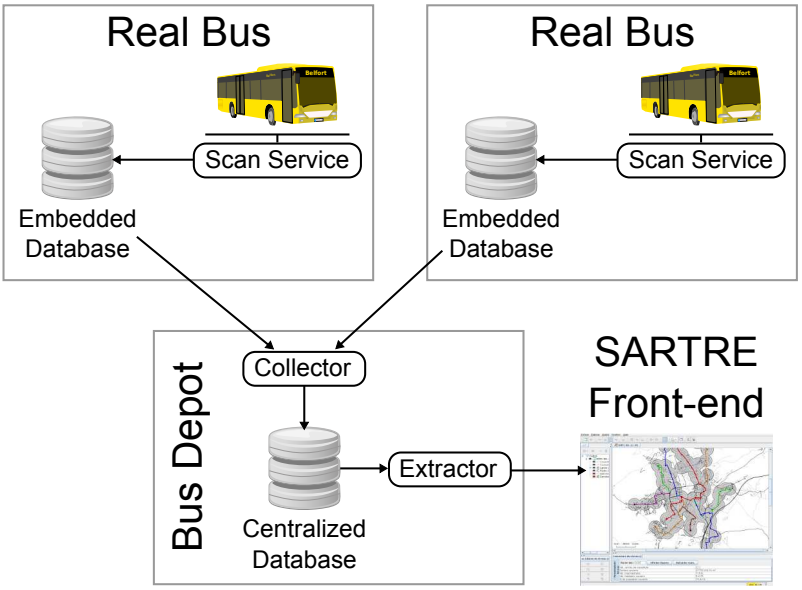


FIGURE 6.3 – Architecture du logiciel SARTRE permettant la collecte d'informations directement dans les bus

6.3/ SIMULATION DES DÉPLACEMENTS D'INDIVIDUS DANS UNE VILLE

La modélisation de la dynamique des piétons et des cyclistes est d'un grand intérêt théorique et pratique. Au cours des deux dernières décennies, les recherches dans un large éventail de domaines tels que l'infographie, la physique, la robotique, les sciences sociales, la sécurité et les systèmes de formation ont créé des simulations impliquant des individus de types hétérogènes [Thalmann and Musse, 2007]. Notons que dans la litérature, un modèle de comportement de cycliste est souvent une instance restreinte du modèle d'un piéton ou une spécialisation du modèle d'un véhicule [Dallmeyer and Timm, 2012, Balmer et al., 2004, VISSIM, , Taylor and Davis, 1999, Wiedemann, 1974].

L'importance de la modélisation détaillée des interactions entre des individus est démontrée par les études de cas qui ont été faites notamment par [Helbing and Molnar, 1997, Helbing et al., 2005]. Le modèle analytique a été développé par [Helbing, 1992] et [Henderson, 1974], mais la solution numérique est très difficile à obtenir, et la simulation est considérée comme plus pratique et plus performante. REYNOLDS [Reynolds, 1999] propose de construire des modèles de piétons à l'aide d'une collection de « comportements dynamiques de déplacement ». La combinaison de ces différents comportements dynamiques (poursuite d'une cible, évitement d'obstacles, ...) permet de reproduire la complexité du comportement d'un piéton ou d'un cycliste.

Un des points clés dans le mouvement des individus est d'éviter une collision avec les autres individus et les obstacles. Généralement, les modèles sont des adaptations du modèle de [Reynolds, 1999], basé sur des forces. Malheureusement, dans nombre d'entre eux, les trajectoires des individus diffèrent de celles des véritables humains [Teknomo, 2002]. Cela est dû à l'absence de prédiction de collisions et d'an-

ticipation des mouvements des autres individus. Les modèles prédictifs sont proposés pour résoudre cette problématique [Van den Berg et al., 2008, Paris et al., 2007, Shao and Terzopoulos, 2007, Olfati-Saber and Murray, 2003, Karamouzas et al., 2009].

Toutefois, ces modèles restent confrontés aux trois problèmatiques principales des modèles basés sur les forces : (i) les oscillations dans les mouvements des agents, (ii) les blocages des agents dans des culs-de-sac ou des configurations topologiques concaves, (iii) les écarts mesurés entre les trajectoires issues de la simulation et celles réellement empruntées par les individus.

Afin de répondre aux points i et iii, nous proposons un modèle d'évitement de collision. Il est situé dans la couche opérationnelle de l'architecture de l'agent (figure 5.9, page 74).

6.3.1/ MODÈLE D'ÉVITEMENT DE COLLISION

Le modèle d'évitement de collision présenté dans ce document est basé sur l'hypothèse que tout individu va essayer d'éviter un obstacle, tout en minimisant l'énergie nécessaire pour résoudre le conflit (principe du moindre effort, ou utilité pour un piéton). La minimisation de l'énergie nécessite d'éviter des changements de direction inopinés et oscillants, et de réaliser ces changements le plus tôt possible tout en continuant à faire progresser l'individu vers son but. Cela est assez simple à réaliser pour les obstacles statiques. La problématique principale réside dans la prise en compte les obstacles mobiles. Nous proposons une approche prédictive pour détecter si un obstacle mobile peut constituer un danger et estimer le temps avant collision.

Tout agent a doit naviguer vers une position cible $\vec{p_t}$ sans entrer en collision avec l'ensemble M des obstacles autour de lui. $\vec{F_a}$ est la force qui doit être appliquée par l'agent a pour y parvenir. F_a est la somme F de toutes les forces d'évitement des collisions, calculées pour chaque élément de M. Nous introduisons la force $\hat{S}_i$ comme une adaptation de la force de répulsion proposée par [Helbing and Molnar, 1997, Reynolds, 1999], et détaillée dans la suite de ce document. t_c^i et $U(t)$ sont, respectivement, le temps estimé à la collision, et la fonction de mise à l'échelle de ce temps. Ils sont expliqués dans la section 6.3.1.3.

$$\vec{F_a} = \vec{F} + w_a.\delta_{\|\vec{F}\|}\frac{\vec{p_t} - \vec{p_a}}{\|\vec{p_t} - \vec{p_a}\|} \qquad (6.4)$$

$$\vec{F} = \sum_{i \in M} U(t_c^i) \cdot \hat{S}_i \qquad (6.5)$$

6.3.1.1/ DÉTERMINATION DES OBSTACLES

Dans notre modèle de simulation, le corps de chaque individu est modélisé comme une forme géométrique convexe dans l'environnement : une capsule verticale en 3D, un cercle en 2D. r_a est l'extension maximale du corps (en d'autres termes son rayon). Pendant la simulation, la distance entre l'agent et un objet est toujours supérieure à cette valeur (équation 6.6) : r_a représente la distance minimale de sécurité ; p_α est le vecteur de position de α.

$$\Box\,(|p_a - p_o| \geq r_a) : \forall o \in M \qquad (6.6)$$

Un obstacle est un objet ou le corps d'un autre agent dans le champ de perception de l'agent a. L'hypothèse est que toutes les entités autour de l'individu, à un instant donné,

peuvent être considérées comme des obstacles potentiels, et doivent être évitées.

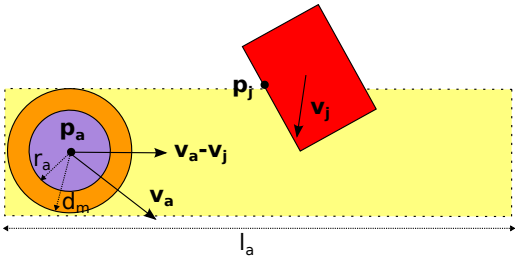


FIGURE 6.4 – Détermination d'un obstacle

La détermination de l'obstacle est inspirée de [Shiller, 2001] : le volume délimitant le mouvement de l'individu est calculé. Si ce volume possède une intersection avec un objet dans l'environnement, cet objet n'est plus considéré comme un obstacle potentiel, mais comme un obstacle réel. La figure 6.4 illustre la détermination de l'obstacle en montrant l'individu a sous la forme d'un cercle, et l'obstacle potentiel sous la forme d'une boîte. Le volume délimitant le mouvement est représenté par la zone en pointillés. Son calcul est basé sur la vitesse relative Δv entre l'individu et l'obstacle : $\Delta v = \vec{v_a} - \vec{v_j}$, où $\vec{v_a}$ et $\vec{v_j}$ sont les vecteurs de vitesse de l'individu a et de l'obstacle j, respectivement. Le volume est un rectangle 2D défini par son centre c et de ses deux vecteurs de direction d_1 et d_2 :

$$\begin{cases} c = p_a + \left(\frac{l_a}{2} - r_a\right).\widehat{\Delta v} \\ d_1 = r_a \, \widehat{\Delta v} \times \hat{y} \\ d_2 = \frac{l_a \, \widehat{\Delta v}}{2} \end{cases} \tag{6.7}$$

6.3.1.2/ DÉTERMINATION DE LA DIRECTION DE LA FORCE S_j

La direction de la force S_j est colinéaire à un vecteur $\vec{s_j}$. Nous proposons d'utiliser une direction perpendiculaire au vecteur entre l'obstacle et l'agent [Buisson et al., 2013] ; où $\vec{p_j}$ est la position du point de collision sur l'obstacle j, et $\hat{y}$ est le vecteur vertical unitaire.

$$\vec{s_j} = (\vec{p_j} - \vec{p_a}) \times \hat{y} \tag{6.8}$$

L'équation 6.8 peut être adaptée pour prendre en compte les propriétés cinétiques de l'agent : vitesse, direction, ... Comme il existe deux directions possibles, $\hat{s_j}$ et $-\hat{s_j}$, l'agent sélectionne celle qui tend à minimiser son mouvement vers $\vec{p_t}$.

$$\hat{S_j} = \text{sgn}(\vec{s_j} \cdot (\vec{p_t} - \vec{p_a})) \frac{\vec{s_j}}{\|\vec{s_j}\|} \tag{6.9}$$

6.3.1.3/ NORMALISATION TEMPORELLE DE LA FORCE S_j

La plupart des modèles basés sur des forces utilisent une fonction monotone décroissante en fonction de la distance à l'obstacle pour calculer la norme des forces. Bien que simple à mettre en œuvre et efficace par les résultats obtenus, cette approche

ne prend pas en compte les paramètres dynamiques des individus (leurs vitesses). En outre, elle sous-estime l'immédiateté du danger si l'obstacle se dirige à grande vitesse vers l'individu. Dans [Buisson et al., 2013], nous proposons d'intégrer la dynamique des objets au calcul de la norme de S_j : le temps de collision t_c est estimé et est un paramètre d'une fonction décroissante monotone U. Cette fonction représente la modélisation de la réaction d'un agent à un danger de collision, et est définie par :

$$U(t_c) = \frac{\sigma}{{t_c}^{\phi}} - \frac{\sigma}{{t_{max}}^{\phi}} \tag{6.10}$$

avec t_c le temps estimé pour la collision, t_{max} le temps maximal d'anticipation.

Lorsque le volume englobant du mouvement et celui de l'obstacle c possèdent une intersection, deux éléments pour le calcul de la force doivent être estimés : le point d'impact $\vec{p_j}$, et le temps à la collision t_c. Dans l'équation 6.11, le numérateur représente la distance entre le corps de l'individu et l'obstacle. Cette distance peut être inférieure à la distance de sécurité d_m dans des environnements très contraints, mais elle ne peut pas être inférieure à la taille du corps r_a.

$$t_c = \frac{||\vec{p_j} - \vec{p_a}|| - r_a}{||\Delta v||} \tag{6.11}$$

6.3.2/ APPLICATION À L'AMÉNAGEMENT DU CENTRE-VILLE DE BELFORT

Nous avons expérimenté en laboratoire nos modèles de comportement d'individus sur des topologies classiques de l'environnement [Helbing et al., 2005]. Les résultats obtenus et illustrés par la figure 6.5 démontrent que l'introduction d'une force de contournement permet d'obtenir des trajectoires plus douces [3].

Nous avons également mis en œuvre nos modèles lors d'un projet de simulation de la Place d'Armes de Belfort (illustré par la figure 6.6). Comme cela était attendu, les trajectoires des individus sont plus lisses et correspondent aux trajectoires de piétons et de cyclistes. Seuls leurs attributs physiques (intégré au modèles de leur corps, voir chapitre 5) sont utilisés pour distinguer ces deux types d'entité : un piéton tourne plus vite qu'un cycliste, mais ce dernier est plus rapide que le premier.

Toutefois, nos différentes expérimentations nous ont permis de dégager quelques problèmes associés à notre modèle : (i) les oscillations existent toujours lorsque les individus sont à l'intérieur d'obstacles concaves ; (ii) lorsque deux individus sont face-à-face, ils peuvent se bloquer mutuellement, ou l'un d'eux peut reculer/se retourner pendant un certain temps ; et (iii) lorsque deux individus se déplacent dans la même direction générale et possèdent des trajectoires en intersection, et qu'ils ne sont pas en mesure d'adapter leurs vitesses, ils peuvent marcher côte à côte jusqu'à ce qu'un élément extérieur vienne perturber cet équilibre. La perspective principale de ce travail est d'étudier et de comparer notre modèle avec des modèles existants, non basés sur des forces [Van den Berg et al., 2008], et proposant des solutions à ces différentes problématiques.

3. Les vidéos sont également disponibles sur : http://www.multiagent.fr/Publication:ABMTRANS13.

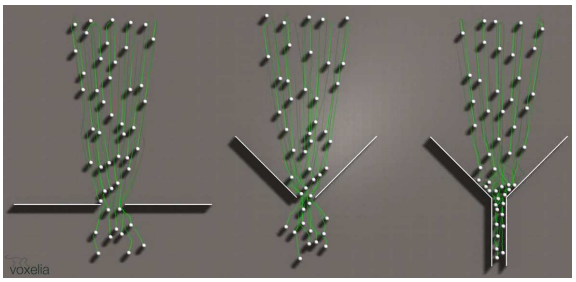


FIGURE 6.5 – Exemples de simulation des comportements des individus pour des topologies classiques de l'environnement

FIGURE 6.6 – Capture d'écran de l'outil de simulation utilisé pour simuler la Place d'Armes de Belfort

6.4/ MODÉLISATION ET SIMULATION DU PROCESSUS DE COVOITURAGE

Le covoiturage est un mode de transport écologique et durable de plus en plus considéré comme une alternative viable pour les déplacements des individus. Le covoiturage permet aux navetteurs de limiter les frais de déplacement (coûts du carburant, des péages, des parkings), mais aussi de réduire les émissions de gaz et les embouteillages. Le covoiturage consiste dans le partage d'une voiture entre personnes (considérés ici comme des agents) sur un trajet partiellement commun. Afin de mieux comprendre le phénomène de covoiturage, les interactions entre deux ou plusieurs agents durant le processus de covoiturage doivent être étudiées. Le processus de covoiturage se compose des étapes suivantes : (i) créer un motif et une motivation poussant un agent à faire du covoiturage, (ii) partager ce souhait avec d'autres agents, (iii) négocier un plan avec les agents intéressés, (iv) exécuter le plan négocié, et (v) définir et calculer des valeurs de rétroaction pour tous les agents concernés. La création d'une motivation signifie qu'un voyageur (agent) peut choisir de faire du covoiturage en raison de la disponibilité des ressources de voyage, de ses contraintes temporelles et monétaires, ou des coûts associés aux trajets.

Les systèmes multiagents sont de plus en plus utilisés dans les domaines scientifiques liés au transport, sous le terme ``*Agent-Based Models*´´ (ABM) [Niazi and Hussain, 2011]. Les modèles orientés-agent permettent en effet de modéliser et simuler des systèmes complexes [Macal and North, 2005] et plus particulièrement des systèmes de transport. Ainsi, ils permettent d'analyser et de modéliser les interactions entre les différentes entités constituant le système de transport.

En collaboration avec l'Institut IMOB (Hasselt, Belgique), nous proposons un modèle de covoiturage en adoptant une approche organisationnelle et holonique (voir chapitre 2) et nos outils de simulation (voir chapitres 4 et 5) [Galland et al., 2013, Galland et al., 2014b]. Ce modèle de covoiturage utilise et étend les modèles d'activités proposés par IMOB [Cho et al., 2012, Bellemans et al., 2012].

Un modèle de simulation est défini pour modéliser les comportements individuels des participants au processus de covoiturage. Un agent représente une personne qui vit dans la zone d'étude et exécute son propre emploi du temps quotidien afin de sa-

tisfaire ses besoins personnels. L'emploi du temps est une combinaison d'un certain nombre de trajets liés aux activités quotidiennes de cette personne. Il y a deux catégories non disjointes d'agents. La première catégorie est constituée des membres d'un foyer (parents, enfants). La seconde est composée des membres d'autres groupes sociaux (amis, collègues, voisins, ...) Dans notre modèle, nous considérons les attributs socio-économiques, notamment l'âge, le sexe, le revenu, l'éducation, la relation (au sein d'une famille), le travail, la possession d'un véhicule et d'un permis de conduire, comme un ensemble de données d'entrée. Ces emplois du temps et ces attributs sont fournis par FEATHERS [Bellemans et al., 2010], un modèle orienté-activité de la demande de trafic développé par l'Institut IMOB.

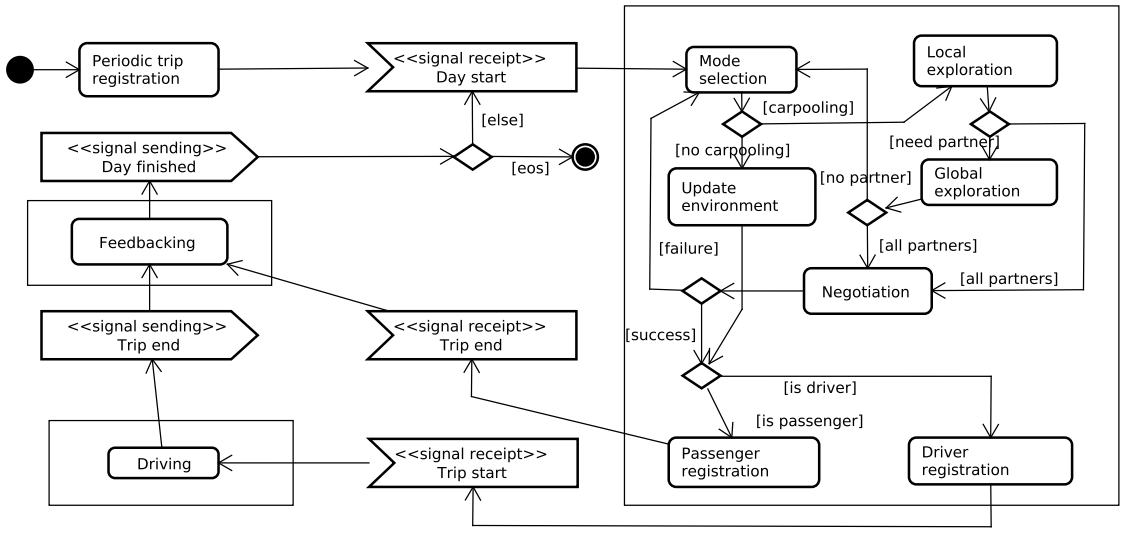


FIGURE 6.7 – Activités d'un agent dans le modèle de simulation de covoiturage

Le comportement de chaque agent est décrit par un diagramme d'activité, illustré par la figure 6.7. Tout d'abord, chaque agent publie chacun de ses trajets périodiques $trip_w$ dans un répertoire partagé et accessible aux autres agents :

$$trip_w = \langle s, a, t_s^{min}, t_s^{max}, t_a^{min}, t_a^{max}, \upsilon \rangle \tag{6.12}$$

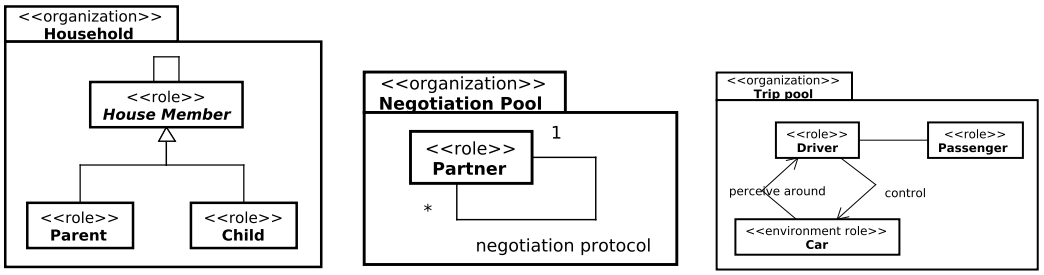
où s et a représentent les points de départ et d'arrivée du trajet ; l'intervalle $[t_\alpha^{min}; t_\alpha^{max}]$ est la fenêtre de temps associée à α ; et υ indique si l'agent possède une voiture et un permis de conduire.

Chaque jour simulé, un agent réalise les activités suivantes :

1. sélection du mode de transport,
2. recherche et sélection des partenaires potentiels pour le covoiturage,
3. négociation des détails du covoiturage entre les partenaires sélectionnés,
4. réalisation des trajets en covoiturage ou en véhicule individuel,
5. évaluation des activités du jour,
6. mise à jour des connaissances de l'agent.

6.4.1/ RECHERCHE ET SÉLECTION DE PARTENAIRES

La recherche et la sélection de partenaires, ou ``*matching*´´, est divisée en deux phases d'exploration : une exploration locale et une exploration globale. L'exploration locale est réalisée au sein du réseau social de chaque individu ($PrivNet$). Chaque réseau social est modélisé par une organisation. La figure 6.8(a) illustre l'organisation décrivant un foyer. Si des candidats au covoiturage peuvent être trouvés dans $PrivNet$, ils seront contactés en premier (candidats préférés). L'exploration globale est appliquée seulement dans un second temps en l'absence de candidat pour le covoiturage provenant du réseau local. Dans cette phase de recherche globale, l'agent explore le répertoire partagé des trajets quotidiens des autres agents.



(a) Foyer (b) Négociation (c) Éxécution des trajets

FIGURE 6.8 – Organisations associées au système de covoiturage

Durant ces deux explorations, l'agent utilise trois indicateurs de similarité pour déterminer si un autre agent est un potentiel partenaire pour le covoiturage :

i - Similarité des profils: Chaque agent A est décrit par un profil social, composé d'un ensemble d'attributs socio-économiques a_A avec $|a_A| = N_A$. La similarité est basée sur un calcul de distance entre deux attributs a_0 et a_1 :

$$d(a_0, a_1) = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i \in a_0 \cap a_1} (a_0[i] - a_1[i])^2}{|a_0 \cap a_1|}} \tag{6.13}$$

Les variables du profil sont alors combinées pour calculer la similarité entre les profils :

$$S = \prod_{(x,y) \in a_A \times a_B} 1 - d(x, y) \tag{6.14}$$

ii - Similarité des chemins: Deux agents peuvent collaborer et participer au même trajet en covoiturage s'ils possèdent des chemins similaires. Un trajet est défini par une séquence de segments de route partant de O_a jusqu'à D_a. Ce chemin est généralement construit en utilisant un algorithme de la famille A* [Dechter and Pearl, 1985, Delling et al., 2009, Koenig and Likhachev, 2005]. La similarité entre deux trajets est définie par l'équation suivante, et illustrée par la figure 6.9 :

$$pathSim(p_a, p_b) = \frac{c(O_a, D_a)}{c(O_a, O_b) + c(O_b, D_b) + c(D_b, D_a)} \tag{6.15}$$

où $c(i, j)$ est le coût du chemin de i à j (basé sur la distance et/ou le temps de trajet).

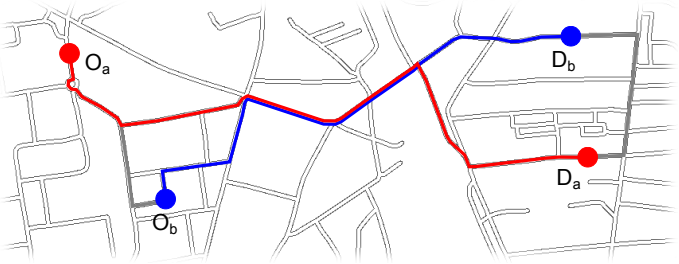


FIGURE 6.9 – Exemple de deux chemins utilisés pour le calcul de leur similarité

iii - Similarité temporelle: un trajet étant défini par un chemin et une fenêtre de temps $i_A = [\perp_{i_A}, \top_{i_A}]$, il est nécessaire de mesurer la similarité temporelle entre deux trajets :

$$tis(i_A, i_B) = \min(\top_{i_A}, \top_{i_B}) - \max(\perp_{i_A}, \perp_{i_B}) \tag{6.16}$$

Chaque agent ayant une similarité suffisante joue un rôle dans une instance de l'organisation `Negotiation Pool`, illustrée par la figure 6.8(b). Les membres de ce groupe mettent en œuvre le processus de négociation décrit dans la section suivante.

6.4.2/ NÉGOCIATION DU COVOITURAGE

La négociation est le processus au cours duquel les membres d'un groupe `Negotiation Pool` négocient les détails de leurs trajets en covoiturage. Notre première proposition permet aux agents de modifier la fenêtre de temps des points de départ. Les membres du groupe peuvent également négocier l'identité du conducteur (par défaut, l'initiateur du covoiturage est le conducteur). Si la négociation échoue, l'agent revient à l'étape 1 en éliminant le covoiturage des modes de transport possibles. Sinon il passe à l'étape 4.

La négociation est basée sur un protocole spécifique. Selon notre approche organisationnelle, un agent qui est en cours de négociation est un membre de l'organisation `Negotiation Pool` (figure 6.8(b)). Le protocole de négociation est décrit comme une séquence de messages échangés par les participants, comme le montre la figure 6.10. Ce protocole de négociation est utilisé pour chaque fenêtre de temps proposée par l'un des agents, et cela, jusqu'à ce qu'un nombre suffisant de participants aient été sélectionnés.

Pour supporter le processus de négociation, chaque agent fournit sa fenêtre de temps préférée sous la forme d'une fonction définie par l'équation suivante :

$$f_A : \mathbb{R} \Rightarrow \mathbb{R} : t \mapsto f_A(t) \in [0, 1] \tag{6.17}$$

Un agent est alors capable de mesurer la pertinence d'une fenêtre de temps fournie par un autre agent vis-à-vis de ses propres préférences temporelles. La figure 6.11 illustre les quatre transformations mathématiques nécessaires pour mesurer cette pertinence, et décrites par l'équation :

$$tis = \begin{cases} \int_t^{t+C} f_A(x) \cdot f_B(x)dx & \text{if } t \in [\max(\perp_{i_A}, \perp_{i_B}), \min(\top_{i_A}, \top_{i_B}) - C] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6.18}$$

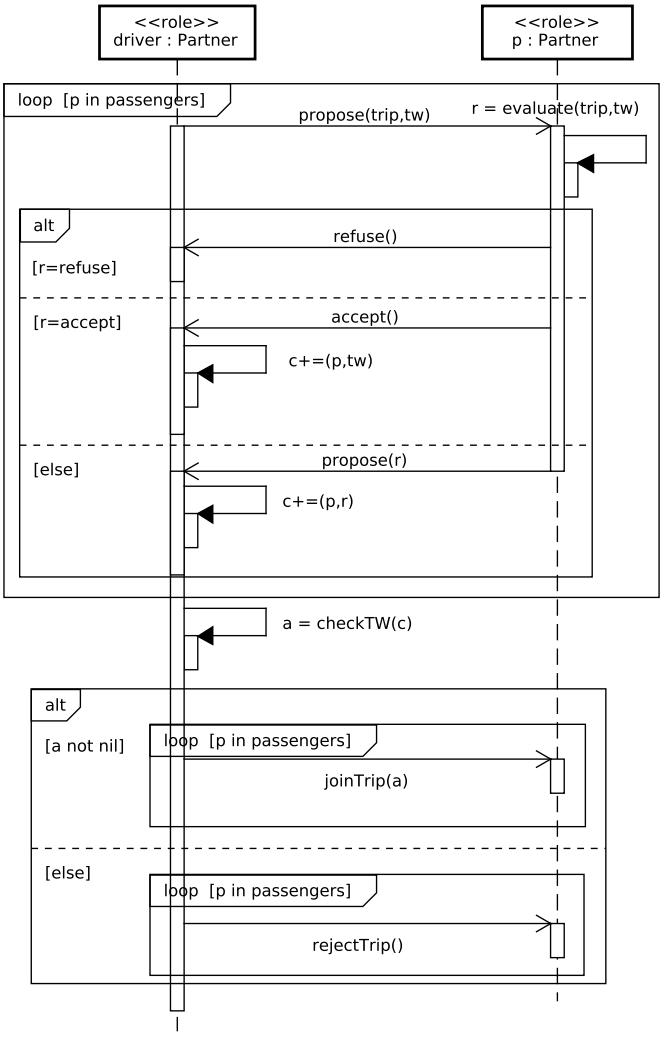


FIGURE 6.10 – Diagramme de séquence du protocole de négociation

6.4.3/ RÉALISATION DES TRAJETS DE COVOITURAGE OU EN VÉHICULE PERSONNEL

L'organisation `Trip pool` (figure 6.8(c)) représente un groupe de personnes réalisant un trajet (en covoiturage ou non). Les agents jouent le rôle `Driver` ou `Passenger` dans une instance de cette organisation. Le réseau routier est représenté par un graphe, comme cela est décrit dans la section 6.2.1. Le conducteur peut contrôler sa voiture en utilisant l'architecture de simulation proposée dans le chapitre 5. Ainsi, son comportement est composé de deux couches : (i) la planification du chemin à suivre, et (ii) le parcours de ce chemin en évitant les collisions avec les autres véhicules et en respectant la signalisation routière. La planification du chemin est dynamique : le conducteur adapte son chemin selon ses perceptions de l'environnement. Ainsi, il peut s'adapter aux aléas qu'il pourrait rencontrer sur la route (travaux, embouteillages, ...) Pour cela, il utilise une variante de l'algorithme D* [Koenig and Likhachev, 2005, Stentz, 1994]. Le modèle ``*Intelligent Driver*´´ [Treiber et al., 2000] est utilisé par l'agent pour adapter sa vitesse en fonction des véhicules qui le précèdent et de la signalisation routière.

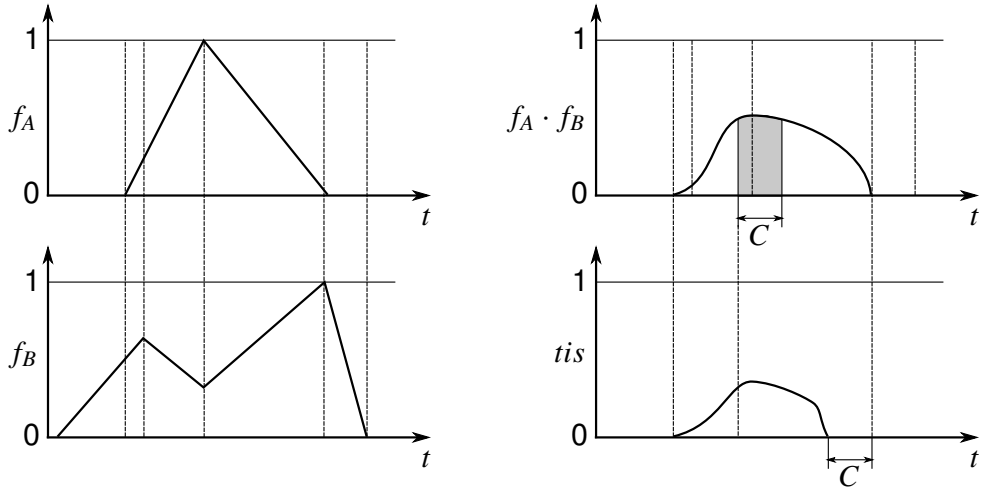


FIGURE 6.11 – Exemple d'un calcul de la pertinence entre deux fenêtres de temps

6.5/ CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous présentons trois applications dans les domaines du transport et de la mobilité d'individus.

Les modèles Metro-B et SARTRE sont dédiés à la conception initiale de systèmes de transport public. Ils permettent de modéliser un réseau de transport dans son environnement, et de calculer des indicateurs quantitatifs et qualitatifs à destination d'experts et de non-experts. Ils ont été utilisés avec succès par le Syndicat Mixte des Transports en Commun de Belfort pour concevoir son nouveau réseau de bus (depuis 2004). Les travaux futurs porteront principalement sur la gestion de la multimodalité (vélos, trains, voitures partagées, ...) et sur l'étude et la conception de nouveaux indicateurs.

Dans ce chapitre, nous avons également présenté un modèle d'évitement de collisions pour piétons et cyclistes. L'idée de base repose sur la minimisation de l'énergie requise pour éviter un obstacle. Contrairement aux forces répulsives classiques, la force utilisée n'est pas seulement destinée à maintenir l'individu en dehors d'un obstacle, mais permet également de le guider vers son but. Ce modèle d'évitement de collision a été appliqué avec succès à la simulation des individus se déplaçant sur la Place d'Armes de Belfort. La perspective de ce travail est d'étudier la montée en charge du modèle et de le comparer à d'autres modèles produisant des trajectoires similaires, tels que le modèle ORCA [Van den Berg et al., 2008].

La troisième application présentée dans ce chapitre concerne la simulation du processus de covoiturage dans une région de grande taille : les Flandres. Les deux nœuds scientifiques principaux sont la modélisation fine des comportements des individus, et la mise à l'échelle du modèle et du simulateur. En comparaison avec les travaux de l'état de l'art, notre étude possède un certain nombre d'avantages : (i) la capacité d'analyse des différents effets de l'interaction de l'agent avec une vue détaillée sur les aspects concernant la communication et la négociation, (ii) la capacité de simuler l'apprentissage, l'adaptation et la reproduction de comportements d'agents à travers la modélisation de leurs interactions. Notre modèle de simulation sur la plate-forme JANUS fournit une solution pour la simulation de ce système complexe, mais a besoin de beaucoup de res-

sources informatiques en raison du nombre élevé d'agents à simuler ($\approx 6.000.000$ pour le processus de négociation, ≈ 60.000 pour la simulation de trafic). L'adaptation du modèle et de son implantation sur JANUS est une perspective de ce travail.

IV

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

7

CONCLUSION

7.1/ BILAN

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le domaine de la modélisation et de la simulation de systèmes complexes. Nous nous sommes intéressés particulièrement à la simulation de foules d'individus dans des univers virtuels. Les applications cibles sont liées à la mobilité, l'aide à la décision et la formation interactive (``*serious game*´´).

L'ensemble des contributions peut se structurer en deux axes. Le premier porte sur les **méthodologies et les outils de modélisation et de simulation de systèmes complexes**. Dans ce cadre, nous avons proposé le métamodèle organisationnel CRIO, la méthodologie associée ASPECS, et une plate-forme de développement et de simulation de systèmes multiagent holoniques (JANUS).

Le second axe est consacré aux **modèles pour la simulation d'individus dans des univers virtuels 3D**. L'idée est de fournir une collection de modèles pouvant décrire l'environnement virtuel et les comportements des individus et des groupes d'individus se déplaçant dans un lieu virtuel (bâtiment, rue. . .) Les modèles proposés doivent permettre de représenter fidèlement les comportements hétérogènes des individus tout en supportant le passage à l'échelle du scénario de simulation en termes de couverture spatiale, de nombre d'entités simulées, et de latence de la simulation.

Nous avons validé nos modèles en considérant des **applications dans les domaines du transport et de la mobilité**. Notre objectif est d'expérimenter la méthodologie ASPECS sur des problèmes concrets, en liaison avec nos partenaires institutionnels et industriels. Trois applications ont été présentées dans ce mémoire : (i) la collecte et l'analyse d'informations liées à des systèmes de transport public ; (ii) la simulation des flux de piétons et de cyclistes dans des univers virtuels ; et (iii) la simulation du processus de covoiturage.

7.2/ PERSPECTIVES

Parmi les développements auxquels ces travaux peuvent donner lieu, je compte poursuivre mes recherches autour des axes suivants :

AXE 1 : MÉTAMODÈLES ET MÉTHODOLOGIES POUR L'ANALYSE, LA CONCEPTION ET LA PROGRAMMATION ORIENTÉE-AGENT

Un effort de standardisation du processus de conception de système multiagents a déjà fait l'objet de travaux au sein du groupe de travail ``*FIPA Design Process Documentation and Fragmentation*´´. Toutefois, cet effort n'a pas abordé la **standardisation des métamodèles organisationnels orientés-agent**. Ce travail nous parait nécessaire pour proposer à la communauté scientifique et industrielle un standard de modélisation et de programmation, à l'instar des travaux déjà réalisés en modélisation et programmation orientées-objet. Ce travail pourra bénéficier de nouvelles collaborations avec d'autres équipes de recherche nationales et internationales travaillant sur la problématique de la modélisation de systèmes multiagents avec une approche organisationnelle.

La seconde action que nous voulons mener est l'**adaptation de la méthodologie ASPECS pour la simulation dans des univers virtuel**. En effet, la description et la définition de l'environnement, des scénarios et des différentes propriétés temporelles associées à la simulation ne sont pas entièrement et clairement identifiées dans le processus ASPECS. Ce travail doit s'appuyer sur notre expérience dans le domaine de la modélisation 3D pour la simulation en réalité virtuelle.

AXE 2 : MODÈLES MULTINIVEAUX POUR LA SIMULATION D'INDIVIDUS EN ENVIRONNEMENT INFORMÉ 3D

Le premier verrou scientifique concerne les modèles de comportements et les modèles d'environnements situés. En effet, nous avons proposé des modèles multiniveaux de comportements d'individus et d'environnement dans les travaux de NICOLAS GAUD et de JONATHAN DEMANGE. Ces travaux peuvent être étendus pour proposer un modèle supportant ces deux aspects au sein d'un **modèle unifié pour la simulation multiniveau**, afin de mieux comprendre les inter-dépendances entre ces deux holarchies. De nouveaux indicateurs pour évaluer la cohérence de la simulation multiniveau seront également étudiés : fonction Z...

Le second verrou concerne l'élaboration de **modèles de comportements pour la mobilité** des individus et des groupes d'individus. Ces travaux ont été initiés par Nicolas Gaud et Jocelyn Buisson. L'objectif est d'étudier des modèles de déplacement basés soit sur les forces physiques, soit sur les principes de calcul de trajectoire optimale (par exemple, l'algorithme ORCA proposé par l'Université de Caroline du Nord). Ces algorithmes devront être analysés, adaptés et raffinés pour permettre la simulation en temps réel d'entités hétérogènes.

Le troisième verrou concerne l'**intégration et l'usage d'ontologies dans les modèles de l'environnement**. L'objectif est de permettre aux agents de prendre des décisions plus réalistes en utilisant, en plus des informations géométriques et spatiales, des informations sémantiques concernant les objets constituant le monde virtuel. Les travaux

de FLORIAN BÉHÉ ont initié cette vision. Cette approche est partagée par HARKOUKEN, du laboratoire LIP6 et Thalès Services S.A.S, qui proposent d'utiliser les ontologies pour calculer les déplacements d'individus dans une ville virtuelle. Nous poursuivons cet effort d'intégration des ontologies en collaboration avec le laboratoire LE2I de l'Université de Bourgogne.

AXE 3 : MODÈLES DE SIMULATION POUR LES DOMAINES DU TRANSPORT ET DE L'URBANISME

La première perspective de cet axe se situe dans le cadre de la collaboration que j'ai initié avec l'Institut IMOB (Universtié de Hasselt, Belgique). La thématique initiale est l'élaboration d'un simulateur orienté-agent pour le covoiturage. L'objectif est de compléter le modèle existant (voir section 6.4, page 88) et de l'étendre à d'autres choix de modes transports. De plus, les performances de calcul du simulateur participent à un nœud technologique central. En effet, l'obtention des résultats de simulation en un temps acceptable est une préoccupation importante pour nos partenaires.

Les modèles intégrés transport-urbanisme, plus connus sous le terme anglo-saxon de modèles « Land-Use Transport Integrated » (LUTI) s'intéressent à la reconnaissance des effets élargis des transports, au-delà des gains de temps et environnementaux, sur l'urbanisme d'une ville [Wilson, 1997, Wegener, 2004]. Les modèles de simulation LUTI sont nombreux : Cube Land [Martínez, 1996], DELTA [Simmonds, 1999], MARS [Pfaffenbichler, 2003, Pfaffenbichler et al., 2007], UrbanSim [Waddell, 2002], PECAS [Hunt and Abraham, 2003], Tranus [Barra, 2005] par exemple. Malheureusement, il n'existe pas à ce jour d'outil réellement intégré, conçu dès le départ dans une approche globale de l'interaction entre le système de transport et le système urbain [Nguyen-Luong et al., 2011]. Une perspective de nos travaux est dans la continuité de notre projet ANR CITIES (voir section A.4.3.2, page 113) dans lequel nous voulons proposer une **méthodologie permettant de calibrer efficacement les outils de simulation LUTI**. De plus, nous pensons que nos plates-formes JANUS et JASIM peuvent constituer le cœur d'une solution logicielle pour la simulation LUTI.

V

ANNEXES

A

Curriculum Vitæ

Diplômes

- **Baccalauréat** série H, Lycée Condorcet, Belfort, 1993, avec la mention ”Assez Bien”.
- **Diplôme Universitaire de Technologie** spécialité informatique, IUT de Belfort, 1995.
- **Licence** d'Informatique, Université de Franche-Comté, 1996, avec la mention ”Assez Bien”.
- **Maîtrise** d'Informatique, Université de Franche-Comté, 1997, avec la mention ”Assez Bien”.
- **DEA** spécialité Informatique, Automatique et Productique, Université de Franche-Comté, 1998, avec la mention ”Assez Bien”.
- **Doctorat** spécialité Informatique, École Nationale Supérieure des Mines et Université Jean-Monnet, Saint-Étienne, 2001, avec la mention ”très honorable”.

Expériences professionnelles

- **Enseignant vacataire**, Université de Franche-Comté, Besançon, 1997 : enseignement de matières de la 27ème section.
- **Enseignant vacataire**, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, 1998–2001 : enseignement de matières de la 27ème section.
- **Enseignant vacataire**, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 1998–2001 : enseignement de matières de la 27ème section.
- **Doctorant MERT**, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, 1998–2001 : travail de thèse.
- **ATER**, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 2001–2002 : enseignement de matières de la 27ème section.
- **Maître de Conférences**, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, depuis 2002 : enseignement et recherche en 27ème section.

Activités de recherche

- 4 chapitres de livres dans des ouvrages collectifs.
- 10 articles dans des revues internationales avec comités de lecture et actes.
- 4 conférences internationales avec comités de lecture et actes publiés dans Lecture Notes.
- 32 conférences internationales avec comités de lecture et actes.
- 2 conférences nationales avec comités de lecture et actes.
- Co-Encadrement de 4 thèses dont 2 déjà soutenues.
- Encadrement de 11 Master recherche, DEA, ou ingénieurs, 1 ingénieur CNAM, et 2

techniciens DUT.
– Titulaire d'un *Congé pour Recherche et Conversion Thématique* au titre de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard de septembre 2012 à février 2013.
– Membre des comités de programme scientifique pour 6 revues et 1 ouvrage collectif.
– Membre des comités d'organisation de 7 conférences.
– Membre des comités de programme scientifique de 12 conférences.
– 1 projet européen, 2 projets ANR, 2 projets FUI, 8 projets locaux ou industriels.
– 5 dépôts logiciels.
– 1 contrat de transfert pour la création de la société Voxelia SAS.

A.1/ THÉMATIQUE DE LA THÈSE

J'ai réalisé mes travaux de thèse dans le cadre d'une collaboration entre les laboratoires "Méthodes Scientifiques pour la Gestion Industrielle", et "Systèmes Multiagents" de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. Ils relevaient du domaine de la simulation de systèmes industriels complexes et notamment des systèmes intégrant les nouvelles organisations d'entreprises (groupement d'entreprises, entreprises virtuelles...). Dans ce contexte, la modélisation et la simulation de tels systèmes montraient de réelles faiblesses. Par exemple, les méthodes et les outils de simulation ne supportaient pas les concepts de groupement d'entreprises. Certes, il était possible de réaliser des modèles de simulation, mais sans tenir compte des contraintes spécifiques à ce type d'organisation (confidentialité, dynamique de composition...). Dans ces travaux, je me suis démarqué des approches méthodologiques existantes en proposant un environnement de modélisation et de simulation supportant les nouvelles organisations et incluant une approche efficace de modélisation basée sur les systèmes multiagents. J'ai proposé l'utilisation d'une approche de modélisation systémique afin d'améliorer le processus de modélisation. Ainsi, il est possible de distinguer les structures physiques, les centres pilotant ces dernières et l'ensemble des informations transitant dans le système.

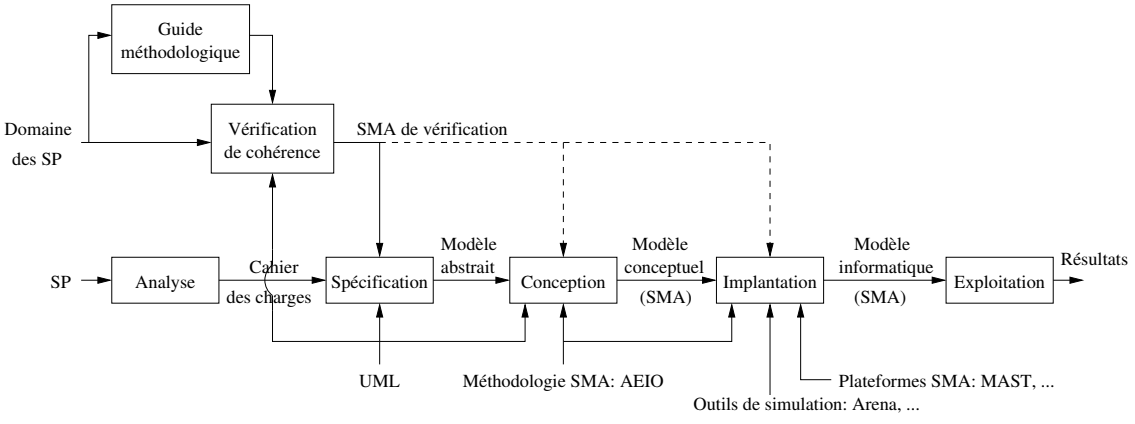


FIGURE A.1 – Cycle de vie d'un modèle de simulation dans l'approche méthodologique $\mathcal{M}_{\mathcal{A}}\mathcal{MA}$-$\mathcal{S}$ [Galland, 2001]

J'ai proposé une approche méthodologique basée sur un cycle de vie illustré par la figure A.1. La spécification consiste à construire un modèle de simulation de haut niveau décrit à l'aide d'un métamodèle spécifique et indépendant des outils de réalisation. La

phase de conception a pour objectif de transformer le modèle issu de la spécification en un modèle de système multiagent. J'ai proposé un ensemble de règles qui permettent de partiellement automatiser cette transformation. La phase de réalisation permet de transformer le modèle de système multiagent en un modèle exécutable.

Ces recherches ont fait l'objet des publications suivantes :
– revue : [Galland et al., 2003] ;
– chapitre de livre : [Galland et al., 2005] ;
– conférences internationales : [Galland et al., 1999, Galland and Grimaud, 2000, Galland et al., 2000a, Galland et al., 2000b, Galland et al., 2001a, Galland et al., 2001b, Galland et al., 2006] ;
– conférences nationales : [51, 52].

A.2/ ACTIVITÉS DE RECHERCHE APRÈS LA THÈSE

Les travaux s'inscrivent dans le domaine de la simulation multiagent. Ils portent particulièrement sur la simulation d'individus et de groupes d'individus dans des systèmes spatiaux à large échelle. Les applications concernent l'aide à la décision et la formation interactive (``*serious game*´´).

Les défis scientifiques et technologiques sont de trois ordres :
– développer des modèles permettant de décrire et simuler des systèmes composés d'un grand nombre d'entités aux comportements hétérogènes ;
– développer des méthodes et des méthodologies facilitant la description de systèmes complexes et spatiaux en vue de réaliser leur simulation ;
– développer des outils logiciels supportant les modèles proposés précédemment et proposant des algorithmes efficaces permettant de respecter les contraintes habituellement imposées aux logiciels de simulation interactive 3D (temps-réel, ressources limitées de calcul).

Trois axes de recherche et de développement ont été abordés durant cette période post thèse :
– L'axe dédié aux **métamodèles, à la méthode et aux outils pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes** a pour objectif de fournir les outils méthodologiques afin de construire des modèles de systèmes complexes et de réaliser des simulations microscopiques impliquant des entités individuelles. Nous proposons dans cet axe une méthode organisationnelle et orientée-agent de description de systèmes complexes, d'une part, et des plates-formes de simulation, d'autre part.

– Le second axe est consacré aux **modèles pour la simulation d'individus dans des environnements virtuels 3D**. L'idée est de fournir une collection de modèles pouvant décrire l'environnement virtuel et les comportements des individus et des groupes d'individus se déplaçant dans un lieu virtuel (bâtiment, rue...). Les modèles proposés doivent permettre de représenter fidèlement les comportements hétérogènes des individus tout en supportant la montée en charge du scénario de simulation en termes de couverture spatiale, de nombre d'entités simulées, et de latence de la simulation.

– Le dernier axe de recherche est consacré aux **applications dans les domaines du transport et de la mobilité**. L'objectif est de spécialiser nos modèles et d'appliquer

nos méthodes sur des applications en lien avec nos partenaires institutionnels et industriels. Deux branches applicatives ont été abordées : la collecte et l'analyse d'informations liées à des systèmes de transport en commun ou à des problématiques de mobilité, et la simulation des flux de piétons, de cyclistes et de véhicules dans des environnements virtuels.

La figure A.2 illustre les différents travaux produits durant ma période post thèse. L'ensemble de ces travaux est présenté dans les sections suivantes.

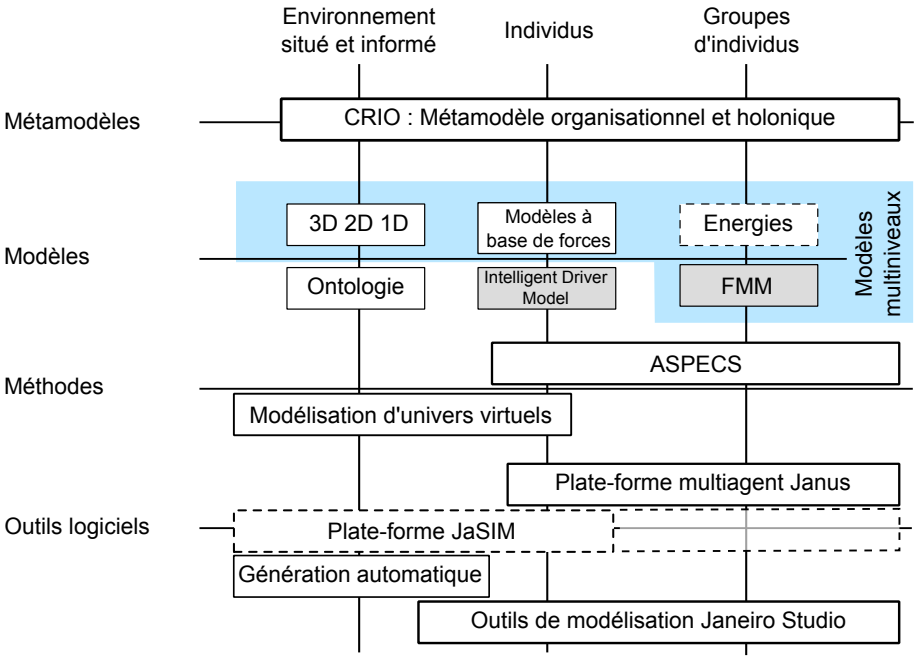


FIGURE A.2 – Travaux post thèse par niveaux d'abstractions et types de modèles

A.2.1/ AXE 1 : MÉTAMODÈLES, MÉTHODES ET OUTILS POUR LA MODÉLISATION ET LA SIMULATION MULTIAGENT DE SYSTÈMES COMPLEXES

Cette thématique relève de la modélisation de systèmes complexes. L'objectif est de fournir les outils méthodologiques et les concepts permettant de créer des modèles de systèmes complexes. Les systèmes complexes étudiés sont caractérisés par un grand nombre d'entités en interaction, et exhibant des propriétés d'auto-organisation et des comportements émergents. Les systèmes multiagents holoniques (HMAS) offrent une approche prometteuse d'ingénierie logicielle pour développer ces systèmes. Toutefois, le processus de construction de Systèmes multiAgents (SMA) et HMAS est le plus souvent différent du processus de construction de systèmes logiciels plus traditionnels et introduit de nouveaux défis de conception et de développement. Nous proposons une approche dirigée par les modèles dans laquelle nous définissons trois niveaux.

Le premier niveau est dédié à la description du problème. Les besoins fonctionnels du problème étudié sont décrits à l'aide du métamodèle organisationnel Capacité-Rôle-Interaction-Organisation (CRIO, cf. figure 2.2 page 17). Une organisation est composée de rôles qui interagissent au sein de scénarios lors de l'exécution de leurs plans de rôle.

Une organisation a un contexte qui est décrit à l'aide d'une ontologie. Chaque rôle participe à la réalisation des objectifs de l'organisation par le biais de ses interactions et de ses capacités.

Le second niveau comprend les éléments qui sont utilisés pour définir une solution orientée agent, et plus particulièrement HMAS, pour le problème décrit au niveau précédent. Les concepts du métamodèle sont illustrés par la figure 2.6 page 24. Le système est alors décrit en termes d'agents « atomiques », d'agents composés d'agents (ou holons) et de groupes d'agents en interaction. Chaque groupe est une instanciation d'une organisation du niveau supérieur et chaque agent doit jouer un rôle dans ce groupe pour participer à la réalisation des objectifs de l'organisation et du système.

Le troisième et dernier niveau concerne la réalisation d'un modèle exécutable du système étudié. Après la sélection de la plate-forme d'exécution, l'objectif est de fournir une définition des règles de transformations nécessaires pour créer l'implantation des concepts issus des deux niveaux précédents. Nous proposons la plate-forme JANUS [1] qui implante directement ces concepts.

L'utilisation de ces trois niveaux de modèles est décrite par le processus de modélisation ASPECS [2]. Ce processus décrit les étapes et les livrables permettant d'aboutir à la création d'un modèle exécutable d'un HMAS. Cette méthode commence à s'imposer parmi celles les plus citées du génie logiciel orienté agent.

Les travaux de cet axe ont fait l'objet de la thèse de NICOLAS GAUD, de la collaboration avec le CNR ICAR de Parlerme (Italie) et le GITIA de Tucumán (Argentine). Ils ont donné lieu aux publications suivantes :

- revues : [Galland et al., 2003, Cossentino et al., 2010c, Gaud et al., 2008a, Seidita et al., 2010, Cossentino et al., 2010b, Gechter et al., 2012] ;
- chapitres de livre : [Galland et al., 2005, Rodriguez et al., 2011, Cossentino et al., 2013] ;
- conférences internationales : [Galland et al., 2008, Lamotte et al., 2010, Hilaire et al., 2010, Cossentino et al., 2008b, Cossentino et al., 2008a, Gaud et al., 2008b, Gaud et al., 2009, Cossentino et al., 2007a, Rodriguez et al., 2007, Galland et al., 2010a, Gaud et al., 2007a, Cossentino et al., 2007b, Galland et al., 2006, Cossentino et al., 2010a, Lauri et al., 2013] ;
- conférences nationales : [Feld et al., 2012].

A.2.2/ AXE 2 : MODÈLES POUR LA SIMULATION D'INDIVIDUS DANS DES D'ENVIRONNEMENTS VIRTUELS 3D

Cette problématique relève de la simulation interactive en environnement 3D. La simulation est ainsi soumise à de nombreuses contraintes en terme de réalisme des comportements et de latence dans la réponse du simulateur aux actions d'un utilisateur réel. Les verrous scientifiques sont de deux ordres.

Le premier concerne les modèles de l'environnement virtuel. Dans la simulation orientée-agent, l'environnement est une composante de premier ordre ayant plusieurs missions fondamentales : (i) supporter et partager une description de l'environnement, et des

1. http://www.janus-project.org
2. http://www.aspecs.org

objets le composant ; (ii) gérer les actions des agents et leurs interactions ; (iii) générer les perceptions et les observations des agents ; et (iv) maintenir les dynamiques endogènes de l'environnement. Plusieurs modèles d'environnements ont été proposés dans la littérature. Toutefois, aucun ne permettait de répondre à l'ensemble des objectifs et des contraintes imposées (entités intelligentes hétérogènes, large échelle, latence faible, compatibilité avec les principes de composition des HMAS). Dans un premier temps, nous avons proposé le modèle d'environnement JASIM [3] permettant de modéliser un bâtiment ou une portion de ville à différentes échelles. Ce modèle a été enrichi par des informations ontologiques afin de permettre aux agents de comprendre la sémantique des objets qu'ils perçoivent dans le monde virtuel et de mieux planifier leurs actions.

Le second verrou concerne les modèles de comportements des entités peuplant le monde virtuel simulé. Chaque individu peut exhiber un comportement spécifique en fonction de son type (piéton, cycliste, véhicule...). Ces modèles sont très documentés dans la littérature. Toutefois, aucun de ces modèles ne peut être appliqué efficacement à l'ensemble des entités constituant la population simulée. Par exemple, l'utilisation d'un modèle de déplacement de véhicule pour un piéton introduit un biais dans le comportement de l'individu en restreignant ses degrés de liberté. Durant cette période post thèse, des modèles de simulation précis et rapides ont été proposés par notre équipe de recherche. L'utilisation de modèles à base des forces physiques a été le point central de nos contributions. Nous avons adapté et proposé des modèles permettant de modéliser des comportements réalistes de piétons et de cyclistes. Concernant les modèles de véhicules, nous avons proposé des modèles traitants d'une part du comportement du conducteur (adaptation du modèle ``*Intelligent Driver Model*´´), et d'autre part, du comportement physique du véhicule et de ses composants. Enfin, nous avons étudié les comportements de groupes d'individus. Le verrou scientifique principal est la modélisation des comportements de groupes ne pouvant être directement décrits par la juxtaposition des comportements des individus. Le verrou technologique principal est de fournir un outil pour simuler un plus grand nombre d'individus. Deux approches ont été proposées. La première approche utilise un modèle énergétique permettant de caractériser la distance entre le comportement d'un groupe de piétons et la collection des comportements individuels des membres de ce groupe. La seconde approche est une adaptation de la ``*Fast Multipole Method*´´ afin de regrouper les individus en les interconnectant avec un maillage rigide, et de simuler les mouvements de chaque groupe.

Les travaux de cet axe ont fait l'objet de la thèse de NICOLAS GAUD, JONATHAN DEMANGE, JOCELYN BUISSON, FLORIAN BÉHÉ et de nombreux DEA, masters, et projets de fin d'études. Ils ont fait l'objet d'une collaboration active et d'un contrat de transfert technologique avec la société Voxelia [4] (Belfort, France). Les travaux de cet axe ont également donné lieu aux publications suivantes :

– revues : [Cossentino et al., 2010c, Gaud et al., 2008a, Demange et al., 2010b, Cossentino et al., 2010b, Behe et al., 2014a] ;
– chapitre de livre : [Rodriguez et al., 2011, Behe et al., 2014b] ;
– conférences internationales : [Galland et al., 2008, Demange et al., 2010a, Galland et al., 2009, Cossentino et al., 2008a, Gaud et al., 2008b, Gaud et al., 2009, Cossentino et al., 2007a, Gaud et al., 2007b, Rodriguez et al., 2007, Gaud et al., 2007a, Galland et al., 2011a, Rodriguez et al., 2006, Galland et al., 2004, Gaud et al., 2004, Behe et al., 2011c, Behe et al., 2011a, Behe et al., 2012a,

3. http://www.multiagent.fr/Jasim_Platform
4. Voxelia est une société créée par des membres de notre équipe de recherche. http://www.voxelia.com

Buisson et al., 2013, Durif et al., 2013] ;
– conférences nationales : [Behe et al., 2011b, Buisson et al., 2011, Behe et al., 2012b, Buisson et al., 2012] ;
– revues en cours de soumission : [Galland et al., 2014a].

A.2.3/ AXE 3 : APPLICATIONS AUX DOMAINES DU TRANSPORT ET DE LA MOBILITÉ

Cet axe a pour objectif l'application des modèles et des méthodes développées dans les axes précédents dans les domaines du transport et de la mobilité. La réalisation d'un projet de simulation nécessite des modèles dédiés et l'élaboration de scénarios avec les données de calibration associées. Nous considérons ces deux verrous scientifiques et technologiques.

La première problématique applicative concerne la récolte d'informations et de données sur le système étudié (un réseau de transport, un bâtiment. . .). Ces informations doivent être analysées pour produire des indicateurs « statiques » sur le système, et fournir les valeurs de calibration des modèles de simulation. Dans ce contexte, nous proposons des modèles de systèmes d'information géographiques et des modèles de systèmes de transport en commun (application MetroB). De plus, nous proposons des modèles et des outils pour récolter des informations à partir de capteurs embarqués sur des bus (application SARTRE). Ces modèles ont permis au Syndicat Mixte des Transport en Commun (SMTC) de Belfort de concevoir le nouveau réseau de bus urbain et extra-urbain de Belfort (Optymo 1).

La seconde problématique applicative concerne la production de modèles d'entités hétérogènes devant interagir au sein de la même simulation. Nous traitons principalement dans nos applications des comportements des piétons, des cyclistes, des trains/-tramways et des véhicules. Chacune de ces entités fait l'objet de verrous scientifiques et technologiques adressés par nos modèles de comportements. Nos modèles de piétons et de cyclistes ont été utilisés pour l'étude d'aménagement de la ville de Belfort (projets en association avec la société Voxelia, cf. figure 6.7 page 89). Nous avons également proposé des modèles de véhicules permettant de prendre en compte les comportements du conducteur et les composants physiques du véhicule (projet CRISTAL, et les projets en association avec la société Voxelia). Enfin, nous avons proposé un modèle de simulation de covoiturage en collaboration avec l'institut IMOB (Hasselt, Belgique). L'objectif de ce projet est de simuler les choix modaux (voiture individuel, transport en commun, covoiturage, cf. figure 6.6 page 87) de chaque individu et leurs conséquences en termes de mobilité à l'échelle de la population des Flandres.

Les travaux de cet axe ont fait l'objet de la thèse de JONATHAN DEMANGE, JOCELYN BUISSON et des projets de fin d'études. Ils ont également fait l'objet de collaboration avec Voxelia (Belfort, France), Alstom Transport (Belfort, France), SMTC (Belfort, France) et IMOB (Hasselt, Belgique). Ils ont donné lieu aux publications suivantes :
– revues : [Gaud et al., 2008a, Demange et al., 2010b, Gechter et al., 2012, Galland et al., 2014b] ;
– conférences internationales : [Lamotte et al., 2010, Gaud et al., 2007b, Galland et al., 2011b, Galland et al., 2011a, Galland et al., 2004, Gaud et al., 2004, Buisson et al., 2013, Galland et al., 2013] ;
– conférences nationales : [Buisson et al., 2011, Buisson et al., 2012,

Galland et al., 2010b] ;

A.3/ PERSPECTIVES

Les principales perspectives peuvent être classées en fonction de l'axe de recherche associé :
– Axe 1 : extension et raffinement des métamodèles, des langages et du processus méthodologique ASPECS afin de proposer des outils adaptés pour la modélisation et la simulation de HMAS.
– Axe 2 : conception de modèles de comportements et d'environnement pour de la simulation de larges populations d'individus, et extension de l'utilisation d'ontologies pour la construction des plans d'action des agents.
– Axe 3 : proposer des modèles de calibration et de simulation pour le LUTI (``*Land-Use Transport Integrated*´´), et compléter les modèles de simulation de covoiturage.

A.3.1/ AXE 1 : MÉTAMODÈLES ET MÉTHODES POUR L'ANALYSE, LA CONCEPTION ET LA PROGRAMMATION ORIENTÉE-AGENT

Le travail déjà démarré va se renforcer en bénéficiant de nouvelles collaborations avec d'autres équipes de recherche nationales étudiant les problématiques de modélisation de systèmes multiagents avec une approche organisationnelle. En effet, nous proposons le métamodèle CRIO, l'École des Mines de Saint-Étienne propose le modèle MOISE, et le laboratoire LIRMM de Montpellier propose le modèle Agent-Groupe-Rôle. Ces trois métamodèles possèdent des concepts communs et complémentaires qui peuvent former un premier effort de standardisation des métamodèles organisationnels de SMA.

Un effort de standardisation du processus de conception de systèmes multiagents a déjà fait l'objet de travaux au sein du groupe de travail ``*FIPA Design Process Documentation and Fragmentation*´´. Toutefois, cet effort n'a pas abordé la standardisation des métamodèles orientés-agent. Ce travail nous parait nécessaire pour proposer à la communauté scientifique et industrielle un standard de modélisation et de programmation, à l'instar des travaux réalisés en modélisation et programmation orientées-objet, quinze années plus tôt.

Le second verrou scientifique que nous voulons aborder est l'intégration au processus méthodologique ASPECS, proposée en collaboration avec l'ICAR en Italie et le GITIA en Argentine, de phases dédiées à la simulation multiagent. En effet, la description et la définition de l'environnement, des scénarios et des différentes propriétés temporelles associées à la simulation ne sont pas entièrement et clairement identifiées dans le processus de ASPECS. Ce travail sera basé sur notre expérience de 10 années dans le domaine de la modélisation 3D pour la simulation en réalité virtuelle. Les travaux et les projets abordés par OLIVIER LAMOTTE, ingénieur de recherche dans notre équipe, nous permettront de définir les étapes dans le processus de modélisation d'un univers virtuel, d'une part, et de proposer une collection d'outils de génération semi-automatique de mondes virtuels.

A.3.2/ AXE 2 : MODÈLES MULTINIVEAUX POUR LA SIMULATION D'INDIVIDUS EN ENVIRONNEMENT INFORMÉ 3D

Le premier verrou scientifique concerne les modèles de comportements de mobilité et les modèles d'environnements situés. En effet, nous avons proposé des modèles multi-niveaux de comportements d'individus et d'environnement dans les travaux de NICOLAS GAUD et de JONATHAN DEMANGE, respectivement. Ces travaux doivent être étendus pour proposer un modèle supportant ces deux aspects au sein d'un unique modèle unifié.

Le second verrou concerne l'élaboration de modèles de comportements de mobilité précis et réalistes. Ces travaux ont été initiés par NICOLAS GAUD et JOCELYN BUISSON. L'objectif est d'étudier des modèles de déplacement basés soit sur les forces physiques, soit sur les principes de calcul de trajectoire optimale (par exemple, l'algorithme ORCA proposé par l'Université de Caroline du Nord). Ces algorithmes devront être adaptés et raffinés pour permettre la simulation en temps réel d'entités hétérogènes.

Le troisième verrou concerne l'intégration et l'usage d'ontologies dans les modèles de l'environnement et dans les comportements des agents. L'objectif est de permettre aux agents de prendre des décisions « plus réalistes » en utilisant, en plus des informations géométriques et spatiales, des informations sémantiques concernant les objets constituant le monde virtuel. Les travaux de Florian Béhé ont initié cette vision. Et cette approche est partagée par HARKOUKEN, du laboratoire LIP6 et Thalès Services S.A.S, qui propose d'utiliser les ontologies pour calculer les déplacements d'individus dans une ville virtuelle. Nous poursuivons cet effort d'intégration des ontologies avec THOMAS DUCIF, actuellement en thèse co-encadrée par CHRISTOPHE NICOLLE (LE2I, Dijon), ABDERRAFIAA KOUKAM (IRTES-SET) et NICOLAS GAUD (IRTES-SET). L'un des points forts de ces travaux est l'utilisation du standard IFC (``*Industry Foundation Classes*´´) et son extension à la simulation multiagent.

A.3.3/ AXE 3 : MODÈLES DE SIMULATION POUR LE LUTI ET LE COVOITURAGE

Les perspectives de cet axe concernent l'application de nos modèles de simulation et de nos processus méthodologiques au LUTI (``*Land-Use Transport Integrated*´´). En effet, les modèles de simulation pour le LUTI sont nombreux : Cube Land, DELTA, MARS, OPUS/Urbansim, PECAS et Tranus. Toutefois, aucun de ces modèles n'aborde le LUTI dans sa globalité : il est nécessaire d'utiliser conjointement plusieurs d'entre eux. De cette contrainte nait un verrou scientifique : comment calibrer efficacement les outils utilisés pour le même système étudier. Cette problématique est actuellement abordée dans notre projet ANR CITIES. L'objectif est de fournir une méthode et des outils de calibration de simulateurs LUTI, en adoptant une approche multiagent. Nous pensons également que notre processus ASPECS, notre métamodèle CRIO et notre plate-forme JANUS peuvent constituer le cœur d'une solution pour la simulation LUTI. Nous envisageons d'étudier cette nouvelle branche d'applications pour nos modèles.

La seconde perspective de cet axe est l'élaboration d'un simulateur à large échelle pour l'étude des choix modaux d'une population, et plus précisément du choix de réaliser du covoiturage par des individus. Ces travaux font déjà l'objet d'une collaboration avec l'institut IMOB de l'Université de Hasselt. Le principal verrou scientifique et technologique concerne la modélisation orientée-agent de la population et de ses activités, et la simulation à large échelle cette population.

A.4/ INSERTION DANS L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

A.4.1/ ANIMATION DE LA RECHERCHE

Depuis 2007, j'anime l'axe de recherche *Simulation MultiAgents* (2 PR, 3 MC, 1 IR) de l'équipe Systèmes Multiagents du laboratoire IRTES-SET. L'objectif de cet axe est de proposer les méthodologies, les modèles et les outils logiciels permettant de simuler des systèmes complexes intégrant un environnement situé (ville, bâtiment...). Dans ce cadre, j'ai rédigé le rapport d'activité de cet axe de recherche pour le contrat quadriennal 2008–2012. J'ai également animé les réunions de travail internes et avec nos partenaires (Laboratoire LE2I de l'Université de Bourgogne, Laboratoire GITIA de Tucumán/Argentine, Institut IMOB de l'Université de Hasselt/Belgique, Sociétés Voxelia, Alstom...).

A.4.2/ COOPÉRATION

J'ai contribué au développement de collaborations avec d'autres laboratoires nationaux et internationaux :

- MASSIMO COSSENTINO du laboratoire ICAR/CNR, Palerme, Italie (2007–2010) : définition du processus méthodologique ASPECS [Cossentino et al., 2013, Cossentino et al., 2010c, Seidita et al., 2010, Cossentino et al., 2010b, Cossentino et al., 2008b, Cossentino et al., 2008a, Gaud et al., 2008b, Cossentino et al., 2007a, Gaud et al., 2007a, Cossentino et al., 2007b].
- SEBASTIAN RODRIGUEZ du laboratoire GITIA, Tucumán, Argentine (depuis 2007) : Spécification et développement de la plateforme JANUS [Rodriguez et al., 2011, Rodriguez et al., 2007, Galland et al., 2010a, Rodriguez et al., 2006].
- CHRISTOPHE NICOLLE du LE2I de Dijon (depuis 2009) : simulation dans des environnements informés basés sur des descriptions IFC. Co-encadrement de la thèse de Florian Béhé [Behe et al., 2014b, Behe et al., 2011c, Behe et al., 2011a, Behe et al., 2012a, Behe et al., 2011b, Behe et al., 2012b].
- ANSAR YASAR, LUK KNAPPEN et DAVID JANSSENS de l'institut IMOB, Hasselt, Belgique (depuis 2011) : simulation à large échelle de modèles de covoiturage [Galland et al., 2013, Galland et al., 2014b]. *Je suis à l'initiative de cette collaboration.*

A.4.3/ CONTRATS DE RECHERCHE

A.4.3.1/ AU NIVEAU LOCAL

1. **METRO-B : Système d'Aide à la Décision pour le Transport en Commun**, 30000€ (2005–2006)
   - *Partenaire :* Syndicat Mixte des Transports en Commun de Belfort.
   - *Objectifs :* création d'un outil pour la modélisation et l'évaluation d'un réseau de transport en commun ; production d'indicateurs de performance des réseaux de transport en commun à base de bus.
   - *Mon rôle dans le projet :* **Responsable**.
2. **Gestion technique en réalité virtuelle du site du Malsaucy**, 25000€ (2007–2009)

- *Partenaire :* Conseil Général du Territoire de Belfort.
- *Objectifs :* réalisation d'un outil permettant de gérer les données techniques du site naturel du Malsaucy. Ce site protégé est le lieu de nombreuses manifestations culturelles et sportives. L'outil proposé permet d'une part de représenter toutes les données associées aux corps de métiers intervenants durant les manifestations. D'autre part, une simulation du festival des Eurockéennes a été réalisée pour qualifier l'aménagement du site du Malsaucy pour cette manifestation.
- *Mon rôle dans le projet :* **Responsable**.

3. **Modélisation 3D du technopôle Techn'Hom**, 53000€ (2009–2010)
   - *Partenaires :* Société d'Économie Mixte de gestion du PATrimoire du Territoire de Belfort, Voxelia.
   - *Objectifs :* création d'un modèle 3D de haute qualité afin de réaliser des visites virtuelles et de simuler les flux de véhicules et de piétons sur le site du Techn'Hom.
   - *Rôle dans le projet :* **Responsable**.
4. **SARTRE : Modèles et outils de collecte et d'analyse de données pour le réseau de bus Optymo**, 9000€ (2010–2012)
   - *Partenaire :* Syndicat Mixte des Transports en Commun de Belfort.
   - *Objectifs :* création d'outils permettant de collecter de nombreuses données au sein de bus grâce à des capteurs embarqués. L'ensemble de ces données est alors analysé afin de produire des indicateurs pertinents pour comprendre le fonctionnement du réseau de bus et lever des alertes à postériori concernant les comportements des conducteurs et la planification du réseau.
   - *Mon rôle dans le projet :* **Responsable**.
5. **Outils pour la génération de modèles urbains virtuels**, 6200€ (2006–2007)
   - *Partenaire :* Virtuel City.
   - *Objectifs :* création de scripts permettant la génération automatique d'univers 3D à partir de données géographiques.
   - *Mon rôle dans le projet :* Participant.
6. **Modélisation 3D des Glacis de Belfort**, 14000€ (2006–2007)
   - *Partenaire :* Communauté d'Agglomération de Belfort.
   - *Objectifs :* création d'un modèle 3D des glacis de Belfort généré à partir d'informations géographiques et de prises aériennes afin de permettre une étude de l'aménagement de ce quartier de la ville.
   - *Mon rôle dans le projet :* Participant.
7. **Système d'information géographique 3D**, 59000€ (2007–2008)
   - *Partenaire :* Syndicat Mixte de l'Aire Urbaine Belfort-Montbéliard.
   - *Objectifs :* création d'un modèle de système d'information géographique 3D.
   - *Mon rôle dans le projet :* Participant.
8. **Étude de la desserte de la gare TGV de Belfort-Montbéliard**, 137000€ (2006–2009)
   - *Partenaires :* EFFIA (France), Syndicat Mixte des Transports en Commun de Belfort, Communauté d'Agglomérations du Pays de Montbéliard, et les agences d'urbanisme de Belfort et de Montbéliard.
   - *Objectifs :* étude de la desserte de la gare TGV Belfort-Montbéliard.
   - *Rôle dans le projet :* Participant.

A.4.3.2/ AU NIVEAU NATIONAL

1. **CRISTAL**, (2008–2010)
   - *Financement :* FUI, Pôle "Véhicule du Future".
   - *Partenaires :* Lohr Industrie, Transitec, Vu Log, LORIA, LASMEA.
   - *Objectifs :* développement du véhicule CRISTAL et création d'un simulateur en réalité virtuelle permettant de reproduire le comportement physique du véhicule et des différents capteurs s'y rattachant..
   - *Mon rôle dans le projet :* conception de l'architecture du simulateur et de son implantation.

2. **FLO : Simulation immersive d'un poste de conduite de train**, (2010–2013)
   - *Financement :* FRI, Pôle "Véhicule du Future".
   - *Partenaires :* Alstom Transport.
   - *Objectifs :* création d'un simulateur de train en réalité virtuelle reproduisant le comportement des composants mécaniques, électriques et électroniques d'un train.
   - *Mon rôle dans le projet :* conception d'outils de génération automatique de l'univers virtuel et conception du simulateur.

3. **SafePlatoon**, (2011–2014)
   - *Financement :* ANR VTT.
   - *Partenaires :* LASMEA, CEMAGREF, DGA, Civitec.
   - *Objectifs :* proposer des modèles de ``*platooning*´´ pouvant s'adapter dynamiquement, et des outils permettant de valider ces modèles.
   - *Mon rôle dans le projet :* conception de l'architecture du simulateur en réalité virtuelle permettant de simuler un véhicule autonome avec ses capteurs virtuels.

4. **CITIES**, (2012–2015)
   - *Financement :* ANR MN.
   - *Partenaires :* INRIA, LET, LVMT, IFSTTAR-DEST, IDDRI, VINCI Concessions, Cofiroute, Pirandello Ingenierie, IAU-ÎdF.
   - *Objectifs :* favoriser l'utilisation de modèles LUTI (Land-Use Transport Interaction) pour la conception et l'évaluation de l'utilisation du territoire et des politiques de transport. Ce projet doit permettre l'élaboration d'une méthodologie de calibration de simulations LUTI et des modèles associés, d'une part, et une méthode de validation, d'autre part.
   - *Mon rôle dans le projet :* conception de modèles de calibration de simulateurs LUTI en utilisant une approche à base d'agents.

A.4.3.3/ AU NIVEAU INTERNATIONAL

1. **SURE : a time-oriented model for Sustainable Urban REgeneration**, (2002–2005)
   - *Financement :* FP5 ``*Energy, Environment and Sustainable Development*´´.
   - *Partenaires :* Milano Metropoli Development Agency (Italie), Milano Polytechnics (Italy), Agence Temps et Mobilité (Belfort, France), University for Economics and Policy (Hamburg, Germany), Senator of Building and Environment (Bremen, Germany), University Fundación (Mieres-Asturias Oviedo, Espagne), Red Eurexcter

(Espagne), Institute of Urban Development (Krakow, Pologne), International Management Services Sp.zo.o (Krakow, Pologne), European Association of Development Agencies.
- *Objectifs :* proposer une vision sur l'amélioration de la qualité de la vie urbaine en adoptant une approche d'expérimentation basée sur un modèle temporel de régénération urbaine. Le projet propose un outil de description, et d'évaluation d'une zone urbaine en adoptant une approche temporelle.
- *Mon rôle dans le projet :* J'ai participé à la création d'un modèle de données et à son exploitation dans le cadre de la simulation urbaine.

A.4.4/ BREVETS, DÉPÔTS LOGICIELS ET TRANSFERTS DE TECHNOLOGIE

A.4.4.1/ DÉPÔT LOGICIEL AUPRÈS DE L'INSTITUT NATIONALE DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE (INPI)

- *METRO-B : Système d'aide à la décision pour le transport en commun* (2006). Enveloppe SOLEAU n°265020 du 10-07-2006.

A.4.4.2/ DÉPÔTS LOGICIELS AUPRÈS DE L'AGENCE POUR LA PROTECTION DES PROGRAMMES (APP)

- Dépôt n°IDDN.FR.001.050026.000.R.P.2009.000.20600 (2009) : SeT Geographic Information System, SeT Foundation Classes, Plateforme multiagent JANUS.
- Dépôt n°IDDN.FR.001.050027.000.S.P.2009.000.20600 (2009) : Simulateur JASIM.
- Dépôt n°IDDN.FR.001.050028.000.S.P.2009.000.20600 (2009) : Moteur de rendu 3D LiveLibs.
- Dépôt n°IDDN.FR.001.060001.000.S.P.2012.000.41000 (2012) : Bibliothèques de génération d'environnements virtuels (SETVEG).

A.4.4.3/ CONTRAT DE TRANSFERT, CESSION DE DROITS PATRIMONIAUX

Les modèles et outils composant le simulateur JASIM (voir ci-dessus) ont fait l'objet d'un contrat de transfert au bénéfice de la société Voxelia S.A.S. Ce contrat de transfert a été signé en 2009.

A.4.5/ ORGANISATION DE MANIFESTATIONS

- Membre du comité d'organisation des 8ème journées francophones de l'intelligence artificielle distribuée et des systèmes multiagents, 2 au 4 octobre 2000, Saint-Étienne, France.
- Membre du comité d'organisation de la 3ème journée technique sur la "Réalité virtuelle dans l'industrie et le transport" du laboratoire SET, 5 juin 2003, Belfort, France.
- Organisateur du 1er atelier international "Agent supported Cooperative Work" (ACW'07), 2ème conférence internationale IEEE "Digital Information Management" (ICDIM'07), octobre 2007, Lyon, France.

– Organisateur de la session AOse Methodologies and Processes (AOMP) Track of the ACM Symposium on Applied Computing. Honolulu, Hawaï Mars 2009.
– Organisateur et Responsable de International Workshop on Multilevel Agent-based Simulation of Smart Cities (MASW13). In conjonction with ANT13. Juin 2013, Halifax, Canada (http://cs-conferences.acadiau.ca/ant-13/#workshop_approved).
– Organisateur du programme des ateliers (workshops chair) de International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN13), octobre 2013, Niagara Falls, Canada (http://cs-conferences.acadiau.ca/euspn-13/#workshops).
– Organisateur de la session (track chair) ``*Multiagent Systems and Intelligent Computing*´´ de International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN13), octobre 2013, Niagara Falls, Canada (http://cs-conferences.acadiau.ca/euspn-13/#workshops).

A.4.6/ Insertion dans des réseaux

Je suis membre des réseaux suivants :
– FIPA European Working Group : Design Process Documentation and Fragmentation (DPDF WG). http://www.pa.icar.cnr.it/cossentino/fipa-dpdf-wg/
– AgentLink. http://www.agentlink.org/

A.4.7/ Expertises, Invitations

A.4.7.1/ Invitations

– Professeur invité, Laboratoire GITIA, Université de Technologie Nationale de Tucumán, Argentine, programme d'échanges ARFITEC/UTBM, août et septembre 2012.
– Conférencier invité, Summer School on Mobility modeling and big data sources, Institute for Mobility, University of Hasselt, Belgique, juillet 2013, http://www.datasim-fp7.eu/.
– Conférencier invité, Atelier Carpooling IMOB/IRTES-SET, Institute for Mobility, University of Hasselt, Belgique, septembre 2012.

A.4.7.2/ Expertises dans des programmes nationaux

– Expert ANR CSOSG (2012), 2 projets expertisés.

A.4.7.3/ Comités de sélection

– Membre du comité de sélection 27ème section, de l'Université de Bourgogne (2013).

A.5/ ENCADREMENT

Au total, j'ai participé à l'encadrement de :
– thèses soutenues : 2 ;
– thèses en-cours : 2 ;
– stages et projets de niveau master : 12.

A.5.1/ THÈSES SOUTENUES

1. **Nicolas Gaud** (actuellement maître de conférences à l'UTBM), co-encadré à 50% avec PR. ABDERRAFIAA KOUKAM, "Systèmes MultiAgents Holoniques : de l'analyse à l'implantation. Métamodèle, méthodologie et simulation multiniveaux", thèse de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard sur financement propre, débutée en 2004 et soutenue en 2007 devant le jury composé de MARIE-PIERRE GLEIZES (professeur, rapporteur), JUAN PAVÓN MESTRAS (professeur, rapporteur), JEAN-PIERRE MÜLLER (professeur, rapporteur), RENÉ MANDIAU (professeur), YASSINE RUICHEK (professeur), ABDERRAFIAA KOUKAM (professeur, co-directeur), STÉPHANE GALLAND (maître de conférences, co-directeur).
2. **Jonathan Demange** (actuellement en incubation à Toulouse), co-encadré à 50% avec PR. ABDERRAFIAA KOUKAM, "Un modèle d'environnement pour la simulation multiniveau : application à la simulation de foules", thèse de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard sur financement ministère, débutée en 2008 et soutenue en 2012 devant le jury composé de VINCENT CHEVRIER (maître de conférences HDR, rapporteur), RENÉ MANDIAU (professeur, rapporteur), CHRISTOPHE NICOLLE (professeur), LHASSANE IDOUMGHAR (maître de conférences HDR), ABDERRAFIAA KOUKAM (professeur, co-directeur), STÉPHANE GALLAND (maître de conférences, co-directeur).

A.5.2/ THÈSES EN-COURS

1. **Florian Béhé**, co-encadré à 33% avec PR. ABDERRAFIAA KOUKAM et PR. CHRISTOPHE NICOLLE, "Modèles de comportement d'agent et d'environnement informé pour la simulation microscopique de bâtiments en 3D : Application à la gestion technique de patrimoine", thèse de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard sur financement régional, débutée en octobre 2010.
2. **Jocelyn Buisson**, co-encadré à 50% avec PR. ABDERRAFIAA KOUKAM, "Modèle pour la simulation microscopique d'un environnement situé et d'entités hétérogènes. Application à la simulation urbaine et à la simulation d'espaces semi-ouverts", thèse de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, financé par la société Voxelia, débutée en octobre 2010.

A.5.3/ STAGES DE RECHERCHE

Ils ont été encadrés à 100% :
– 11 étudiants en DEA/Master et Projets de fin d'étude d'ingénieur.
– 1 ingénieur CNAM.
– 2 étudiants en DUT.

A.6/ AUTRES ACTIVITÉS

A.6.1/ ACTIVITÉS D'INTÉRÊT COLLECTIF

– Membre élu pour le corps des enseignants au bureau du département informatique de l'UTBM (depuis 2010).

A.6.2/ ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

A.6.2.1/ ENSEIGNEMENT AVANT RECRUTEMENT

À l'UFR Science et techniques de l'Université de Franche-Comté (1997–1998), à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (1998–2001) et à l'Université Jean Monnet de Saint-Étienne (1999–2001) :
– Algorithmique et Programmation : Visual Basic, CAML, C/C++, Java.
– Analyse et conception de logiciels : UML.
– Architecture et Systèmes d'exploitation : circuits séquentiels, Windows, Unix.
– Introduction à l'informatique : Windows, Word, Excel.

A.6.2.2/ ENSEIGNEMENT APRÈS RECRUTEMENT

Au niveau international

1. À l'Université de Technologie Sino-Européenne de Shanghaï (Chine) en 2008 :
   – Algorithmie et programmation orientée-objet.
2. À l'école d'été "Mobility modeling and big data sources" de l'institut pour la mobilité (IMOB) de l'Université de Hasselt (Belgique) en 2013 :
   – Utilisation des systèmes multiagents dans le domaine des transports et initiation à la plate-forme JANUS.

Au niveau national

1. À l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard :
   – Simulation orientée-agent : modèles réactifs, plates-formes, ``*serious game*´´.
   – Réalité virtuelle et 3D : moteur d'affichage 3D, interactions virtuelles, génération d'univers.
   – Algorithmique et Programmation : C/C++, Java.
   – Architecture et Systèmes d'exploitation : architecture et programmation système pour Windows et Unix.

   Les répartitions de ces enseignements sont décrites dans la figure A.3.
2. À l'Université de Technologie de Troyes :
   – Master TICOR, unité de valeur CC03 "Middleware et technologies agent : application aux réseaux", en 2011.
3. À l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Micro-électronique (SPIM) :
   – Unité de valeur MA74 "Introduction à la simulation de vie en réalité virtuelle et au jeu sérieux", 2004–2013.

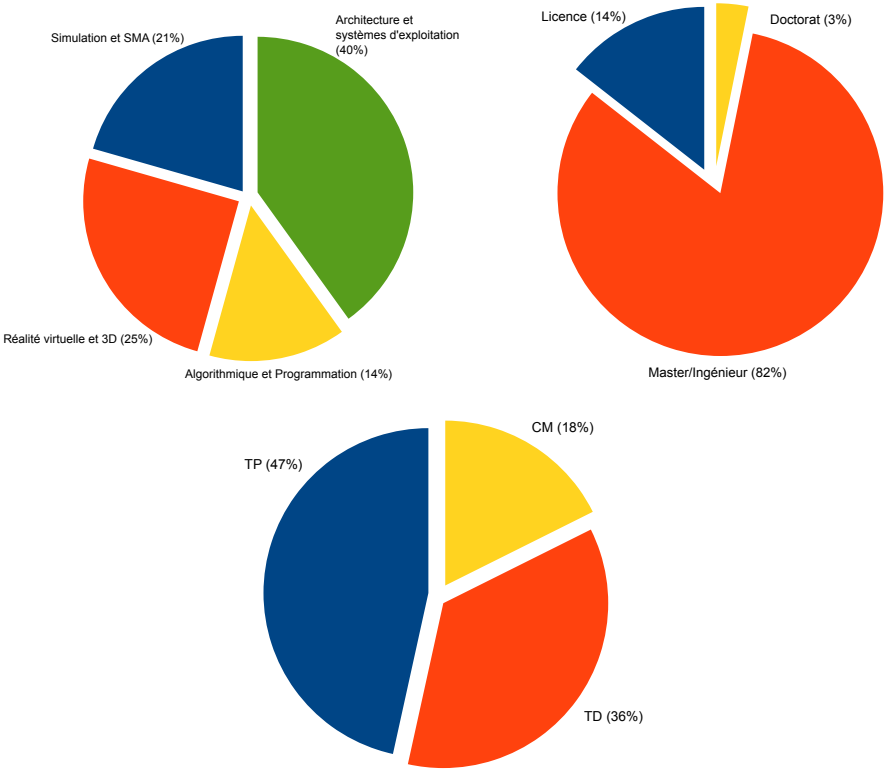


FIGURE A.3 – Répartition des enseignements par contenu, niveau et type respectivement.

A.6.2.3/ RESPONSABILITÉS PÉDAGOGIQUES

- **Responsable administratif et pédagogique de la filière "Imagerie, Interaction et Réalité Virtuelle"** du cursus ingénieur du département informatique de l'UTBM (2007–2009).
- **Responsable administratif des cours en Nord Franche-Comté de l'école doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Micro-électronique - SPIM** (2004–2005).
- **Responsable des unités de valeur du département informatique de l'UTBM** :
  - VI51 : Virtual life simulation, unité anglophone (depuis 2007) ;
  - LO46 : Language theory and compilation, unité anglophone (depuis 2011) ;
  - VI50 : Vision et réalité virtuelle (2003–2011) ;
  - LO51 : Administration de système d'exploitation et de bases de données (2003–2008).
- **Responsable d'une unité de valeur de l'école doctorale SPIM** :
  - MA76 : Introduction à la simulation de vie en réalité virtuelle et au jeu sérieux (2004–2013).
- **Responsable d'une unité de valeur du département tronc commun de l'UTBM** :
  - LO22 : Introduction à Unix (2002–2009).

B

LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

B.1/ JOURNAUX INTERNATIONAUX AVEC COMITÉS DE LECTURE

[1] GALLAND, S., GRIMAUD, F., BEAUNE, P., AND CAMPAGNE, J.-P. MaMA-S : an introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems. *International Journal of Production Economics (special issue) 85* (Mar. 2003), 11–31.

[2] GAUD, N., GALLAND, S., GECHTER, F., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory 16*, 10 (Nov. 2008), 1659–1676.

[3] COSSENTINO, M., GALLAND, S., GAUD, N., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. An organisational approach to engineer emergence within holarchies. *International Journal of Agent Oriented Software Engineering 4*, 3 (Oct. 2010), 304–329.

[4] COSSENTINO, M., GAUD, N., HILAIRE, V., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems - how to design agent societies under a holonic perspective. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 2*, 2 (Mar. 2010), 260–304.

[5] DEMANGE, J., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Analysis and design of multi-level virtual indoor environment. *Int. Journal Systemics and Informatics World Network 10* (July 2010), 145–152.

[6] SEIDITA, V., COSSENTINO, M., HILAIRE, V., GAUD, N., GALLAND, S., KOUKAM, A., AND GAGLIO, S. The metamodel : a starting point for design processes construction. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering (IJSEKE) 20*, 4 (June 2010), 575–608.

[7] GECHTER, F., CONTET, J.-M., LAMOTTE, O., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Virtual intelligent vehicle urban simulator : Application to vehicle platoon evaluation. *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT) 24* (May 2012), 103–114.

[8] BEHE, F., GALLAND, S., GAUD, N., NICOLLE, C., AND KOUKAM, A. An ontology-based metamodel for multiagent-based simulations. *International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory 40* (Jan. 2014), 64–85.

[9] GALLAND, S., GAUD, N., DEMANGE, J., BUISSON, J., GONÇALVES, M., AND KOUKAM, A. Agent-oriented and multilevel model of a situated environment for the simulation of crowd. *International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory* (2014). under the 1st review.

[10] GALLAND, S., YASAR, A.-U.-H., KNAPEN, L., GAUD, N., JANSSENS, D., LAMOTTE, O., WETS, G., AND KOUKAM, A. Multi-agent simulation of individual mobility behavior in carpooling using the JANUS and JASIM platforms. *International Journal on Transport Research Part C* (2014).

B.2/ CHAPITRES DE LIVRES

[11] GALLAND, S., GRIMAUD, F., BEAUNE, P., AND CAMPAGNE, J.-P. *Modelling and simulating distributed industrial systems - A Multi-Agent Methodological Approach*, vol. 94. Springer, Jan. 2005, ch. 5, pp. 277–288.

[12] RODRIGUEZ, S., HILAIRE, V., GAUD, N., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. *Holonic Multi-Agent Systems*, first ed. Self-Organising Software From Natural to Artificial Adaptation - Natural Computing. Springer, Mar. 2011, ch. 11, pp. 238–263.

[13] COSSENTINO, M., HILAIRE, V., GAUD, N., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. *The ASPECS Process*. Springer, July 2013, ch. 2.

[14] BEHE, F., NICOLLE, C., GALLAND, S., GAUD, N., AND KOUKAM, A. *Using Semantics in the Environment for Multiagent-based Simulation*. IGI Global, July 2014, pp. 1–7. to be published.

B.3/ CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉS DE LECTURE ET PUBLIÉES DANS LECTURE NOTES

[15] COSSENTINO, M., GAUD, N., GALLAND, S., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. A holonic metamodel for agent-oriented analysis and design. In *Lecture Notes in Artificial Intelligence 4659 "Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing" (HoloMAS'07 International Conference)* (Sept. 2007), V. Marik, V. Vyatkin, and A. W. Colombo, Eds., pp. 237–246.

[16] RODRIGUEZ, S., GAUD, N., HILAIRE, V., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. An analysis and design concept for self-organization in holonic multi-agent systems. In *International Conference on Engineering Self-Organising Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence 4435* (Jan. 2007), E. a. Brueckner s., Ed., Springer-Verlag, pp. 15–27.

[17] GAUD, N., GALLAND, S., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. An organizational platform for holonic and multiagent systems. In *6th International Conference ProMAS 2008, Lecture Notes in Computer Science 5442* (Estoril, Portugal, May 2009), K. v. Hindriks, A. Pokahr, and S. Sardina, Eds., Springer Berlin Heidelberg, pp. 104–119.

[18] DURIF, T., NICOLLE, C., GAUD, N., AND GALLAND, S. Semantic oriented data structuration for MABS application to BIM. In *the 2nd International Workshop on Methods, Evaluation, Tools and Applications for the Creation and Consumption of Structured Data for the e-Society (META4eS'13), Lecture Notes in Computer Science 42* (Graz, Austria, Sept. 2013).

B.4/ CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉS DE LECTURE

[19] GALLAND, S., GRIMAUD, F., BEAUNE, P., AND CAMPAGNE, J.-P. Multi-agent methodological approach for distributed simulation. In *the 11th European Simulation Symposium* (Erlangen, Germany, oct 1999), Society for Computer Simulation, pp. 104–108.

[20] GALLAND, S., AND GRIMAUD, F. Multi-agent methodological approach for distributed simulation : Life cycle of MaMA-S. In *ASIM-Workshop 20/21.3 - Multiagentsystems and Individual-based simulation* (Wuerzburg, Germany, mar 2000), Institut fur Informatik (Bayerishe Julius-Maximilians-Universitat), pp. 83–93.

[21] GALLAND, S., GRIMAUD, F., AND CAMPAGNE, J.-P. Methodological approach for distributed simulation : General concepts for MaMA-S. In *the European Simulation Multiconference – Simulation and Modelling : Enablers for a better quality of life* (Ghent, Belgium, mar 2000), Society for Computer Simulation, pp. 77–82.

[22] GALLAND, S., GRIMAUD, F., AND CAMPAGNE, J.-P. Multi-agent architecture for distributed simulation : Teaching application for industrial management. In *the European Simulation Multiconference – Simulation and Modelling : Enablers for a better quality of life* (Ghent, Belgium, mar 2000), Society for Computer Simulation, pp. 756–762.

[23] GALLAND, S., GRIMAUD, F., BEAUNE, P., AND CAMPAGNE, J.-P. A study case with a methodological approach for complex and distributed industrial system simulation. In *the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'01)* (Québec, Canada, jul 2001).

[24] GALLAND, S., GRIMAUD, F., AND CAMPAGNE, J.-P. How to specify an simulation model of an industrial system in MaMA-S. In *the 15th European Simulation Multiconferences – Modelling and Simulation* (Prague, Czech Republic, may 2001), Society for Computer Simulation, pp. 296–305. Best Paper Award Candidate.

[25] GALLAND, S., LAMOTTE, O., AND GAUD, N. Infrastructure design with multiagent systems and virtual reality - application to the PSA site. In *the 7th International Generative Art Conference (GA-04)* (Milano, Italy, May 2004).

[26] GAUD, N., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Visual perception for virtual agents - environment model and perception's architecture for multi-agent based simulation in virtual environments : Application to a pedestrian simulation. In *Virtual Reality for Industrial Applications Workshop (VIA-04)* (Compiègne, France, Nov. 2004).

[27] GALLAND, S., GAUD, N., AND KOUKAM, A. Towards a multi-agent model of the decisional subsystem of distributed industrial systems : an organizational and formal approach. In *International Conference on Service Systems and Service Management (IEEE-SSSM'06)* (Troyes, France, Oct. 2006), pp. 859–865.

[28] RODRIGUEZ, S., GAUD, N., HILAIRE, V., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. An analysis and design concept for self-organization in holonic multi-agent systems. In *the International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications (ESOA'06)* (May 2006), Springer-Verlag, pp. 62–75.

[29] COSSENTINO, M., GAUD, N., HILAIRE, V., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems. In *the Fifth Agent Oriented Software Engineering Technical Forum (AOSE-TF5)* (Hammameth (Tunisia), Dec. 2007).

[30] GAUD, N., GALLAND, S., HILAIRE, V., KOUKAM, A., AND COSSENTINO, M. A metamodel and implementation platform for holonic multi-agent systems. In *the Fifth European Conference on Multi-Agent Systems(EUMAS'07)* (Hammameth (Tunisia), Dec. 2007).

[31] GAUD, N., GECHTER, F., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Holonic multiagent multilevel simulation : Application to real-time pedestrians simulation in urban environment. In *the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)* (Hyderabad India, Jan. 2007), pp. 1275–1280.

[32] COSSENTINO, M., GAGLIO, S., GALLAND, S., GAUD, N., HILAIRE, V., KOUKAM, A., AND SEIDITA, V. A MAS metamodel-driven approach to process composition. In *the Ninth International Conference on Agent-Oriented Software Engineering (AOSE-2008) at The Seventh International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2008)* (Estoril, Portugal, May 2008), Springer-Verlag, pp. 86–100.

[33] COSSENTINO, M., GALLAND, S., GAUD, N., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. How to control emergence of behaviours in a holarchy. In *the Int. Conference on Self-Adaptation for Robustness and Cooperation in Holonic Multi-Agent Systems (SARC-2008) at the Second International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizaing Systems (SASO 2008)* (Venice, Italy, Oct. 2008), IEEE Computer Society.

[34] GALLAND, S., GAUD, N., AND KOUKAM, A. Towards a multilevel simulation approach based on holonic multiagent systems. In *the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation (EUROSIM-UKSIM 2008)* (Apr. 2008), IEEE Computer Society, pp. 180–185.

[35] GAUD, N., HILAIRE, V., GALLAND, S., KOUKAM, A., AND COSSENTINO, M. A verification by abstraction framework for organizational multiagent systems. In *the Sixth International Conference AT2AI-6 : "From Agent Theory to Agent Implementation", of the Seventh International Conference on Autonomous agents and Multiagent Systems (AAMAS)* (Estoril, Portugal, May 2008), B. Jung, F. Michel, A. Ricci, and P. Petta, Eds., pp. 67–73.

[36] GALLAND, S., GAUD, N., DEMANGE, J., AND KOUKAM, A. Environment model for multiagent-based simulation of 3D urban systems. In *the 7th European Conference on Multiagent Systems (EUMAS09)* (Ayia Napa, Cyprus, Dec. 2009). Paper 36.

[37] COSSENTINO, M., GALLAND, S., GAUD, N., HILAIRE, V., AND KOUKAM, A. A glimpse of the ASPECS process documented with the FIPA DPDF template. In *The Multi-Agent Logics, Languages, and Organisations Federated Workshops (MALLOW 2010)* (Lyon, France, Aug. 2010).

[38] DEMANGE, J., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Analysis and design of multi-level virtual environment. In *4th International Conference on Complex Distributed Systems (CODS10)* (Chongqing, China, July 2010), Foresight Academy of Technology.

[39] GALLAND, S., GAUD, N., RODRIGUEZ, S., AND HILAIRE, V. Janus : Another yet general-purpose multiagent platform. In *the 7th Agent-Oriented Software Engineering Technical Forum (TFGAOSE-10)* (Paris, France, Dec. 2010), Agent Technical Fora, Agent Technical Fora.

[40] HILAIRE, V., GAUD, N., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. An approach based upon OWL-S for method fragments documentation and selection. In *the special track on Agent-Oriented Software Engineering Methodologies Infrastructures and Processes (AOIMP). 25th ACM Symposium on Applied Computing* (Sierre, Switzerland, Mar. 2010), ACM.

[41] LAMOTTE, O., GALLAND, S., CONTET, J.-M., AND GECHTER, F. Submicroscopic and physics simulation of autonomous and intelligent vehicles in virtual reality. In *2nd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL10)* (Nice, France, Sept. 2010), IEEE CPS.

[42] BEHE, F., GALLAND, S., NICOLLE, C., AND KOUKAM, A. Semantic management of intelligent multi-agents systems in a 3d environment. In *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD11)* (Paris, France, Oct. 2011). Paper 89.

[43] BEHE, F., NICOLLE, C., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Qualifying building information models with multi-agent system. In *the 3rd International Workshop on Multi-Agent Systems Technology and Semantics (MASTS 2011)* (Delft, The Netherlands, Oct. 2011), J. j. Meyer, A. e. f. Seghrouchni, and A. m. Florea, Eds., AI-MAS Laboratory, Department of Computer Science, University Politehnica of Bucharest, ERRIC FP7 project, Springer, pp. 309–314.

[44] GALLAND, S., DEMANGE, J., AND KOUKAM, A. Towards the agentification of a virtual situated environment for urban crowd simulation. In *the Insitution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11)* (Shanghaï, China, July 2011), Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghaï University Press.

[45] GALLAND, S., LAMOTTE, O., AND GAUD, N. METROB : Evaluation and simulation of public transport system. In *the Insitution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11)* (Shanghaï, China, July 2011), Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghaï University Press.

[46] GECHTER, F., AND GALLAND, S. Interactive whiteboard for collaborative work - a multiagent-based solution. In *the 3rd International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2011)* (Noordwijkerhout, Netherlands, May 2011), SciTePress, pp. 270–278.

[47] BEHE, F., NICOLLE, C., DURIF, T., GALLAND, S., GAUD, N., AND KOUKAM, A. Ontology-based multiagent systems using inductive recommendations - a new approach to qualify buildings use during the design phase. In *International Conference of Design & Decision Support Systems (DDSS)* (Eindhoven, Netherlands, Aug. 2012).

[48] BUISSON, J., GALLAND, S., GAUD, N., GONÇALVES, M., AND KOUKAM, A. Real-time collision avoidance for pedestrian and bicyclist simulation : a smooth and predictive approach. In *2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS13)* (Halifax, Nova Scotia, Canada, June 2013), A.-u.-h. Yasar and L. Knapen, Eds., Elsevier, pp. 815–820. Best Paper Award.

[49] GALLAND, S., GAUD, N., YASAR, A.-U.-H., KNAPEN, L., JANSSENS, D., AND LAMOTTE, O. Simulation model of carpooling with the janus multiagent platform. In *2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS13)* (Halifax, Nova Scotia, Canada, May 2013), A.-u.-h. Yasar and L. Knapen, Eds., Elsevier, pp. 860–866.

[50] LAURI, F., GAUD, N., GALLAND, S., AND HILAIRE, V. Ipseity - a laboratory for synthesizing and validating artificial cognitive systems in multi-agent systems. In *European Conference on Machine Learning* (Sept. 2013).

B.5/ CONFÉRENCES NATIONALES AVEC COMITÉS DE LECTURE

[51] GALLAND, S., GRIMAUD, F., BEAUNE, P., AND CAMPAGNE, J.-P. Méthodologie pour la simulation de systèmes industriels complexes distribués au travers d'une étude de cas. In *the 4th Conference "Génie Industriel"* (Aix-en-Provence, Marseille, Ajaccio (France), jul 2001), pp. 673–684.

[52] GALLAND, S., GRIMAUD, F., AND CAMPAGNE, J.-P. MaMA-S : Phase de spécification d'un modèle de simulation pour un système industriel distribué. In *Conférence francophone de modélisation et simulation (MOSIM01)* (Troyes, France, apr 2001).

B.6/ CONFÉRENCES NATIONALES SANS COMITÉ DE LECTURE

[53] CHITESCU, C., GALLAND, S., GOMES, S., AND SAGOT, J.-C. Virtual reality within a human-centered design methodology. In *the 10th international workshop CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception* (Belfort-France, July 2003), pp. 55–64.

[54] GALLAND, S., LAMOTTE, O., MEIGNAN, D., SIMONIN, O., AND KOUKAM, A. METROB : Evaluation and simulation of public transportation system in small- and middle-size towns. In *the 8ème Colloque "Vers une ville post carbone"* (Belfort, France, Apr. 2010), Académie des Technologies, UTBM, ADEME.

B.7/ THÈSES ET MÉMOIRES

[55] GALLAND, S. Classifications de propriétés dynamiques et de leurs raffinements à partir de quelques études de cas. Master's thesis, Université de Franche-Comté, Besançon, France, June 1998.

[56] GALLAND, S. *Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines et Université Jean-Monnet, Saint-Etienne, France, Dec. 2001.

B.8/ AUTRES PUBLICATIONS

[57] BEHE, F., NICOLLE, C., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Modèle d'environnement pour des simulations microscopiques dans des bâtiments en 3d. In *1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2011)* (Dec. 2011), UTBM, UTBM Press.

[58] BUISSON, J., GALLAND, S., GONÇALVES, M., AND KOUKAM, A. Parallélisation sur GPU des modèles d'exécution d'un environnement situé 3D et d'agents virtuels. application à la simulation de foule. In *1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2011)* (Dec. 2011), UTBM, UTBM Press.

[59] BEHE, F., NICOLLE, C., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. Ontology-based simulation and qualification of buildings. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)* (Dec. 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press.

[60] BUISSON, J., GALLAND, S., GONÇALVES, M., AND KOUKAM, A. Agent-based simulation of pedestrian and vehicles in 3D virtual cities. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)* (Dec. 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press.

[61] DEPAUW, V., DESOCHE, C., AND GALLAND, S. Comparison of 3D rendering engines on android for agent-based simulation. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)* (Dec. 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press.

[62] FELD, B., GAUD, N., AND GALLAND, S. ZeroMQ peer to peer architecture for the agent-based platform janus. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)* (Dec. 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press.

BIBLIOGRAPHIE

[Adam et al., 2002] Adam, E., Mandiau, E., and Kolski, C. (2002). *Une Méthode de modelisation et de conception d'organizations multi-agents holoniques*. Hermès.

[Amiguet, 2003] Amiguet, M. (2003). *MOCA : un modèle componentiel dynamique pour les systèmes multi-agents organisationnels*. PhD thesis, Université de Neuchâtel.

[Amiguet et al., 2002] Amiguet, M., Müller, J.-P., Baez-Barranco, J.-A., and Nagy, A. (2002). The MOCA Platform, Simulating the Dynamics of Social Networks. In *Multi-Agent-Based Simulation II, Third International Workshop (MABS)*, volume 2581 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 145–167, Bologna, Italy. Springer Berlin, Heidelberg.

[Anderson and Reenskaug, 1992] Anderson, E. P. and Reenskaug, T. (1992). System Design by Composing Structures of Interacting Objects. In *European Conference on Object-Oriented Programming*, volume 615 of *Lecture Notes*, pages 133–153. Springer Verlag.

[Anderson et al., 2003] Anderson, M., McDaniel, E., and Chenney, S. (2003). Constrained animation of flocks. In *ACM SIGGRAPH/European Symposium on Computer Animation (SCA'03)*, pages 286–297.

[Argente et al., 2006] Argente, E., Julian, V., and Botti, V. (2006). Multi-agent system development based on organizations. In *First International Workshop on Coordination and Organisation (CoOrg)*, volume 150 of *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, pages 55–71. Elsevier.

[Ashida et al., 2001] Ashida, K., Lee, S., Allbeck, J., Sun, H., Balder, N., and Metaxas, D. (2001). Pedestrian : creating agent behaviors through statistical analysis of observation data. In *IEEE Compuiter Animation*, pages 84–92, Seoul, Korea.

[Aubel et al., 2000] Aubel, A., Boulic, R., and Thalmann, D. (2000). Real-time display of virtual humans : Levels of details and impostors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 10(2) :207–217.

[Balch, 2000] Balch, T. (2000). Hierarchic social entropy : An information theoretic measure of robot group diversity. In *Autonomous Robots*, volume 8.

[Balmer et al., 2004] Balmer, M., Cetin, N., Nagel, K., and Raney, B. (2004). Towards truly agent-based traffic and mobility simulations. In *AAMAS'04*, New-York, USA.

[Baras and Tan, 2004] Baras, J. S. and Tan, X. (2004). Control of autonomous swarms using gibbs sampling. In *43rd IEEE Conf. on Decision and Control*, Bahamas.

[Barra, 2005] Barra, de la, T. (2005). *Integrated Land Use and Transport Modelling*. Cambridge University Press.

[Barros et al., 2004] Barros, L., Da Silva, A., and Musse, S. (2004). Petrosim : An architecture to manage virtual crowds in panic situations. In *Computer Animation and Social Agents*, pages 111–120.

[Barthez et al., 2000] Barthez, B., Front-Conte, A., and Rieu, D. (2000). Intégration d'imitations de patrons pour la spécification de cadriciels. In *Inforsid'00*, pages 399–415, Lyon, France.

[Bayazit et al., 2002] Bayazit, O., Lien, J.-M., and Amato, N. (2002). Better group behaviors in complex environments using global roadmaps. In *Artificial Life '02*.

[Behe et al., 2014a] Behe, F., Galland, S., Gaud, N., Nicolle, C., and Koukam, A. (2014a). An ontology-based metamodel for multiagent-based simulations. *International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory*, 40 :64–85.

[Behe et al., 2011a] Behe, F., Galland, S., Nicolle, C., and Koukam, A. (2011a). Semantic management of intelligent multi-agents systems in a 3d environment. In *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD11)*, Paris, France. Paper 89.

[Behe et al., 2012a] Behe, F., Nicolle, C., Durif, T., Galland, S., Gaud, N., and Koukam, A. (2012a). Ontology-based multiagent systems using inductive recommendations - a new approach to qualify buildings use during the design phase. In *International Conference of Design & Decision Support Systems (DDSS)*, Eindhoven, Netherlands.

[Behe et al., 2014b] Behe, F., Nicolle, C., Galland, S., Gaud, N., and Koukam, A. (2014b). *Using Semantics in the Environment for Multiagent-based Simulation*, pages 1–7. IGI Global. to be published.

[Behe et al., 2011b] Behe, F., Nicolle, C., Galland, S., and Koukam, A. (2011b). Modèle d'environnement pour des simulations microscopiques dans des bâtiments en 3d. In *1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2011)*. UTBM, UTBM Press.

[Behe et al., 2011c] Behe, F., Nicolle, C., Galland, S., and Koukam, A. (2011c). Qualifying building information models with multi-agent system. In Meyer, J. j., Seghrouchni, A. e. f., and Florea, A. m., editors, *the 3rd International Workshop on Multi-Agent Systems Technology and Semantics (MASTS 2011)*, pages 309–314, Delft, The Netherlands. AI-MAS Laboratory, Department of Computer Science, University Politehnica of Bucharest, ERRIC FP7 project, Springer.

[Behe et al., 2012b] Behe, F., Nicolle, C., Galland, S., and Koukam, A. (2012b). Ontology-based simulation and qualification of buildings. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)*. Doceo, UTBM, UTBM Press.

[Bellemans et al., 2012] Bellemans, T., Bothe, S., Cho, S., Giannotti, F., Janssens, D., Knapen, L., koerner, C., May, M., Nanni, M., Pedreschi, D., Stange, H., Trasarti, R., Yasar, A., and Wets, G. (2012). An Agent-Based model to evaluate carpooling at large manufacturing plants. In *Procedia Computer Science*, Niagara Falls. Procedia Computer Science, Elsevier.

[Bellemans et al., 2010] Bellemans, T., Kochan, B., Janssens, D., Wets, G., Arentze, T., and Timmermans, H. (2010). Implementation framework and development trajectory of feathers activity-based simulation platform. pages 111–119. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board.

[Bellifemine et al., 2001] Bellifemine, F., Poggi, A., and Rimassa, G. (2001). JADE : a FIPA2000 compliant agent development environment. In *Agents*, pages 216–217.

[Bergenti et al., 2004] Bergenti, F., Gleizes, M.-P., and Zambonelli, F., editors (2004). *Methodologies and Software Engineering for Agent Sytems*. Kluwer Academic Press.

[Bergenti and Poggi, 2000] Bergenti, F. and Poggi, A. (2000). Exploiting uml in the design of multi-agent systems. *Engineering Societies in the Agents' World, Lecture Notes in Artificial Intelligence*.

[Bernon et al., 2005] Bernon, C., Camps, V., Gleizes, M., and Picard, G. (2005). Engineering adaptive multi-agent systems : The adelfe methodology.

[Bernon et al., 2002] Bernon, C., Gleizes, M.-P., Peyruqueou, S., and Picard, G. (2002). ADELFE, a methodology for adaptive multi-agent systems engineering. In *Third International Workshop Engineering Societies in the Agents World (ESAW)*, volume 2577 of *LNAI*, pages 156–169, Madrid, Spain. Springer-Verlag.

[Bouvier et al., 1997] Bouvier, E., Cohen, E., and Najman, L. (1997). From crowd simulation to airbag deployment : particle systems, a new paradigm of simulation. *Journal of Electrical Imaging*, 6(1) :94–107.

[Braun et al., 2003] Braun, A., B.E.J., B., Oliveira, L., and Musse, S. (2003). Modeling individual behaviors in crowd simulation. In *Computer Animation and Social Agents*, pages 143–148, New Brunswick, NJ, USA.

[Braun et al., 2005] Braun, A., Bodmann, B. E. J., and Musse, S. R. (2005). Simulating virtual crowds in emergency situations. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, VRST '05, pages 244–252, New York, NY, USA. ACM.

[Bretagnolle et al., 2003] Bretagnolle, A., Daudé, E., and Pumain, D. (2003). From theory to modelling : urban systems as complex systems. *Cybergeo, 13th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, 335.

[Brogan and Hodgins, 1997] Brogan, D. and Hodgins, J. (1997). Group behaviors for systems with significant dynamics. *Autonomous Robots*, 4 :137–153.

[Brussel et al., 1998] Brussel, H. V., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., and Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems : Prosa. *Computers in Industry*, 37 :255–274.

[Buisson et al., 2013] Buisson, J., Galland, S., Gaud, N., Gonçalves, M., and Koukam, A. (2013). Real-time collision avoidance for pedestrian and bicyclist simulation : a smooth and predictive approach. In Yasar, A.-u.-h. and Knapen, L., editors, *2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS13)*, pages 815–820, Halifax, Nova Scotia, Canada. Elsevier. Best Paper Award.

[Buisson et al., 2011] Buisson, J., Galland, S., Gonçalves, M., and Koukam, A. (2011). Parallélisation sur GPU des modèles d'exécution d'un environnement situé 3D et d'agents virtuels. application à la simulation de foule. In *1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2011)*. UTBM, UTBM Press.

[Buisson et al., 2012] Buisson, J., Galland, S., Gonçalves, M., and Koukam, A. (2012). Agent-based simulation of pedestrian and vehicles in 3D virtual cities. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)*. Doceo, UTBM, UTBM Press.

[Bürckert et al., 1998] Bürckert, H., Fischer, K., and G.Vierke (1998). Transportation scheduling with holonic MAS - the TeleTruck approach. In *Conf. on Practical Applications of Intelligent Agents and Multiagent*, pages 577–590.

[Bürckert et al., 2000] Bürckert, H., Fischer, K., and G.Vierke (2000). Holonic transport scheduling with TeleTruck. *Applied Artificial Intelligence*, 14(7) :697–725.

[Burghout et al., 2005] Burghout, W., Koutsopoulos, H. N., and Andréasson, I. (2005). Hybrid Mesoscopic-Microscopic Traffic Simulation. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1934 :218–255.

[Burtt, 1932] Burtt, E. (1932). *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*. Trench & Trubner.

[Caire et al., 2002] Caire, G., Coulier, W., Garijo, F. J., Gomez, J., Pavón, J., Leal, F., Chainho, P., Kearney, P. E., Stark, J., Evans, R., and Massonet, P. (2002). Agent Oriented Analysis Using Message/UML. In Wooldridge, M., Weiß, G., and Ciancarini, P., editors, *Agent-Oriented Software Engineering II, Second International Workshop, AOSE 2001, Montreal, Canada, May 29, 2001, Revised Papers and Invited Contributions*, volume 2222 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 119–135. Springer Verlag.

[Chauvet, 1998] Chauvet, G. (1998). *La vie dans la matière*. Flammarion.

[Chella et al., 2004] Chella, A., Cossentino, M., Sabatucci, L., and Seidita, V. (2004). From PASSI to Agile PASSI : Tailoring a design process to meet new needs. In *IEEE/-WIC/ACM International Joint Conference on Intelligent Agent Technology (IAT)*, Beijing, China.

[Cho et al., 2012] Cho, S., Yasar, A.-U.-H., Knapen, L., Bellemans, T., Janssens, D., and Wets, G. (2012). A Conceptual Design of an Agent-based Interaction Model for the Carpooling Application. In *1st International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications*, Niagara Falls, Canada.

[Contet et al., 2007] Contet, J., Gechter, F., Gruer, P., and Koukam, A. (2007). Physics inspired multiagent model for vehicle platooning. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*.

[Correa e Silva Fernandes, 2001] Correa e Silva Fernandes, K. C. (2001). *Systèmes Multi-Agents Hybrides : Une Approche pour la Conception de Systèmes Complexes*. PhD thesis, Université Joseph Fourier- Grenoble 1.

[Cossentino, 2005] Cossentino, M. (2005). From Requirements to Code with the PASSI Methodology. In Henderson-Sellers, B. and Giorgini, P., editors, *Agent-Oriented Methodologies*, chapter IV, pages 79–106. Idea Group Publishing, Hershey, PA, USA.

[Cossentino et al., 2008a] Cossentino, M., Gaglio, S., Galland, S., Gaud, N., Hilaire, V., Koukam, A., and Seidita, V. (2008a). A MAS metamodel-driven approach to process composition. In *the Ninth International Conference on Agent-Oriented Software Engineering (AOSE-2008) at The Seventh International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2008)*, pages 86–100, Estoril, Portugal. Springer-Verlag.

[Cossentino et al., 2008b] Cossentino, M., Galland, S., Gaud, N., Hilaire, V., and Koukam, A. (2008b). How to control emergence of behaviours in a holarchy. In *the Int. Conference on Self-Adaptation for Robustness and Cooperation in Holonic Multi-Agent Systems (SARC-2008) at the Second International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizaing Systems (SASO 2008)*, Venice, Italy. IEEE Computer Society.

[Cossentino et al., 2010a] Cossentino, M., Galland, S., Gaud, N., Hilaire, V., and Koukam, A. (2010a). A glimpse of the ASPECS process documented with the FIPA DPDF template. In *The Multi-Agent Logics, Languages, and Organisations Federated Workshops (MALLOW 2010)*, Lyon, France.

[Cossentino et al., 2010b] Cossentino, M., Galland, S., Gaud, N., Hilaire, V., and Koukam, A. (2010b). An organisational approach to engineer emergence within holarchies. *International Journal of Agent Oriented Software Engineering*, 4(3) :304–329.

[Cossentino et al., 2007a] Cossentino, M., Gaud, N., Galland, S., Hilaire, V., and Koukam, A. (2007a). A holonic metamodel for agent-oriented analysis and design. In Marik, V., Vyatkin, V., and Colombo, A. W., editors, *Lecture Notes in Artificial Intelligence 4659 "Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing" (HoloMAS'07 International Conference)*, pages 237–246.

[Cossentino et al., 2007b] Cossentino, M., Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., and Koukam, A. (2007b). ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems. In *the Fifth Agent Oriented Software Engineering Technical Forum (AOSE-TF5)*, Hammameth (Tunisia).

[Cossentino et al., 2010c] Cossentino, M., Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., and Koukam, A. (2010c). ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems - how to design agent societies under a holonic perspective. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2(2) :260–304.

[Cossentino et al., 2013] Cossentino, M., Hilaire, V., Gaud, N., Galland, S., and Koukam, A. (2013). *The ASPECS Process*, chapter 2. Springer.

[Cossentino and Potts, 2002] Cossentino, M. and Potts, C. (2002). A CASE tool supported methodology for the design of multi-agent systems. In *International Conference on Software Engineering Research and Practice (SERP'02)*, Las Vegas, USA.

[Courty and Musse, 2005] Courty, N. and Musse, S. (2005). Simulation of large crowds in emergency situations including gaseous phenomena. In *Computer Graphics*.

[Daamen, 2004] Daamen, W. (2004). *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*. PhD thesis, Technical University of Delft.

[Dallmeyer and Timm, 2012] Dallmeyer, J. and Timm, I. J. (2012). MAINSIM – MultimodAl INnercity SIMulation. In *the 35th German Conference on Artificial Intelligence (KI2012)*, pages 125–129.

[Dastani and Gomez-Sanz, 2005] Dastani, M. and Gomez-Sanz, J. J. (2005). Programming multi-agent systems (promas), a report of the technical forum meeting. url : http:// people.cs.uu.nl/mehdi/tfg/ljubljanafiles/report.pdf.

[Dechter and Pearl, 1985] Dechter, R. and Pearl, J. (1985). Generalized best-first search strategies and the optimality of A*. *J. ACM*, 32(3) :505–536.

[Delling et al., 2009] Delling, D., Sanders, P., Schultes, D., and Wagner, D. (2009). Engineering route planning algorithms. In Lerner, J., Wagner, D., and Zweig, K., editors, *Algorithmics of Large and Complex Networks*, volume 5515 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 117–139. Springer Berlin Heidelberg.

[Demange, 2012] Demange, J. (2012). *A model of environment for the multilevel simulation : application to the simulation of crowds*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort, France. In French.

[Demange et al., 2010a] Demange, J., Galland, S., and Koukam, A. (2010a). Analysis and design of multi-level virtual environment. In *4th International Conference on Complex Distributed Systems (CODS10)*, Chongqing, China. Foresight Academy of Technology.

[Demange et al., 2010b] Demange, J., Galland, S., and Koukam, A. (2010b). Analysis and design of multi-level virtual indoor environment. *Int. Journal Systemics and Informatics World Network*, 10 :145–152.

[Dey and Roberts, 2007] Dey, P. and Roberts, D. (2007). A Conceptual Framework for Modelling Crowd Behaviour. In *DS-RT '07 : Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, pages 193–200, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Durif et al., 2013] Durif, T., Nicolle, C., Gaud, N., and Galland, S. (2013). Semantic oriented data structuration for MABS application to BIM. In *the 2nd International Workshop on Methods, Evaluation, Tools and Applications for the Creation and Consumption of Structured Data for the e-Society (META4eS'13), Lecture Notes in Computer Science 42*, Graz, Austria.

[Farenc, 2001] Farenc, N. (2001). *An informed environment for inhabited city simulation*. PhD thesis, Lausanne.

[Farenc et al., 1999a] Farenc, N., Boulic, R., and Thalmann, D. (1999a). An informed environment dedicated to the simulation of virtual humans in urban context. In *Proceedings of EUROGRAPHICS 99*, pages 309–318.

[Farenc et al., 1999b] Farenc, N., Musse, S., Schweiss, E., Kallman, M., Aune, O., Boulic, R., and Thalmann, D. (1999b). A paradigm for controlling virtual humans in urban environment simulations. *Applied Artificial Intelligence Journal, Special issue on Intelligent Artificial Environments*, 14(1) :69–91.

[Feld et al., 2012] Feld, B., Gaud, N., and Galland, S. (2012). ZeroMQ peer to peer architecture for the agent-based platform janus. In *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012)*. Doceo, UTBM, UTBM Press.

[Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents : Vers une Intelligence Collective*. InterEditions.

[Ferber and Gutknecht, 1998] Ferber, J. and Gutknecht, O. (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In *ICMAS'98*.

[Ferber et al., 2004] Ferber, J., Gutknecht, O., and Michel, F. (2004). From agents to organizations : an organizational view of multi-agent systems. In *Agent-Oriented Software Engineering IV 4th International Workshop*, volume 2935 of *LNCS*, pages 214–230, Melbourne, Australia. Springer Verlag.

[Ferber and Müller, 1996] Ferber, J. and Müller, J. (1996). Influences and reactions : a model of situated multiagent systems. In *Second Internationnal Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, pages 72–79.

[Fernandez et al., 2008] Fernandez, E., De Ceach, J., and Malbran, R. (2008). Demand reponsive urban transport system design : Methdology and application. *Transportation Research Journal*, 42(7) :951–972.

[Fishwick, 1997] Fishwick, P. A. (1997). Computer simulation : growth through extension. *Trans. Soc. Comput. Simul. Int.*, 14(1) :13–23.

[Franck, 2002] Franck, R. (2002). *Microeconomics and Behavior*. McGraw-Hill, New-York, 5th edition edition.

[Fuchs and Moreau, 2006] Fuchs, P. and Moreau, G., editors (2006). *Le traité de la réalité virtuelle*. Presses de l'École des Mines, 3ème édition edition.

[Galland, 2001] Galland, S. (2001). *Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines et Université Jean-Monnet, Saint-Etienne, France.

[Galland et al., 2011a] Galland, S., Demange, J., and Koukam, A. (2011a). Towards the agentification of a virtual situated environment for urban crowd simulation. In *the Insitution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11)*, Shanghaï, China. Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghaï University Press.

[Galland et al., 2014a] Galland, S., Gaud, N., Demange, J., Buisson, J., Gonçalves, M., and Koukam, A. (2014a). Agent-oriented and multilevel model of a situated environment for the simulation of crowd. *International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory*. under the 1st review.

[Galland et al., 2009] Galland, S., Gaud, N., Demange, J., and Koukam, A. (2009). Environment model for multiagent-based simulation of 3D urban systems. In *the 7th European Conference on Multiagent Systems (EUMAS09)*, Ayia Napa, Cyprus. Paper 36.

[Galland et al., 2006] Galland, S., Gaud, N., and Koukam, A. (2006). Towards a multi-agent model of the decisional subsystem of distributed industrial systems : an organizational and formal approach. In *International Conference on Service Systems and Service Management (IEEE-SSSM'06)*, pages 859–865, Troyes, France.

[Galland et al., 2008] Galland, S., Gaud, N., and Koukam, A. (2008). Towards a multilevel simulation approach based on holonic multiagent systems. In *the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation (EUROSIM-UKSIM 2008)*, pages 180–185. IEEE Computer Society.

[Galland et al., 2010a] Galland, S., Gaud, N., Rodriguez, S., and Hilaire, V. (2010a). Janus : Another yet general-purpose multiagent platform. In *the 7th Agent-Oriented Software Engineering Technical Forum (TFGAOSE-10)*, Paris, France. Agent Technical Fora, Agent Technical Fora.

[Galland et al., 2013] Galland, S., Gaud, N., Yasar, A.-u.-h., Knapen, L., Janssens, D., and Lamotte, O. (2013). Simulation model of carpooling with the janus multiagent platform. In Yasar, A.-u.-h. and Knapen, L., editors, *2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS13)*, pages 860–866, Halifax, Nova Scotia, Canada. Elsevier.

[Galland and Grimaud, 2000] Galland, S. and Grimaud, F. (2000). Multi-agent methodological approach for distributed simulation : Life cycle of MaMA-S. In *ASIM-Workshop 20/21.3 - Multiagentsystems and Individual-based simulation*, pages 83–93, Wuerzburg, Germany. Institut fur Informatik (Bayerishe Julius-Maximilians-Universitat).

[Galland et al., 1999] Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., and Campagne, J.-p. (1999). Multi-agent methodological approach for distributed simulation. In *the 11th European Simulation Symposium*, pages 104–108, Erlangen, Germany. Society for Computer Simulation.

[Galland et al., 2001a] Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., and Campagne, J.-p. (2001a). A study case with a methodological approach for complex and distributed industrial system simulation. In *the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'01)*, Québec, Canada.

[Galland et al., 2003] Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., and Campagne, J.-p. (2003). MaMA-S : an introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems. *International Journal of Production Economics (special issue)*, 85 :11–31.

[Galland et al., 2005] Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., and Campagne, J.-p. (2005). *Modelling and simulating distributed industrial systems - A Multi-Agent Methodological Approach*, volume 94, chapter 5, pages 277–288. Springer.

[Galland et al., 2000a] Galland, S., Grimaud, F., and Campagne, J.-p. (2000a). Methodological approach for distributed simulation : General concepts for MaMA-S. In *the European Simulation Multiconference – Simulation and Modelling : Enablers for a better quality of life*, pages 77–82, Ghent, Belgium. Society for Computer Simulation.

[Galland et al., 2000b] Galland, S., Grimaud, F., and Campagne, J.-p. (2000b). Multi-agent architecture for distributed simulation : Teaching application for industrial management. In *the European Simulation Multiconference – Simulation and Modelling : Enablers for a better quality of life*, pages 756–762, Ghent, Belgium. Society for Computer Simulation.

[Galland et al., 2001b] Galland, S., Grimaud, F., and Campagne, J.-p. (2001b). How to specify an simulation model of an industrial system in MaMA-S. In *the 15th European Simulation Multiconferences – Modelling and Simulation*, pages 296–305, Prague, Czech Republic. Society for Computer Simulation. Best Paper Award Candidate.

[Galland et al., 2004] Galland, S., Lamotte, O., and Gaud, N. (2004). Infrastructure design with multiagent systems and virtual reality - application to the PSA site. In *the 7th International Generative Art Conference (GA-04)*, Milano, Italy.

[Galland et al., 2011b] Galland, S., Lamotte, O., and Gaud, N. (2011b). METROB : Evaluation and simulation of public transport system. In *the Insitution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11)*, Shanghaï, China. Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghaï University Press.

[Galland et al., 2010b] Galland, S., Lamotte, O., Meignan, D., Simonin, O., and Koukam, A. (2010b). METROB : Evaluation and simulation of public transportation system in small- and middle-size towns. In *the 8ème Colloque "Vers une ville post carbone"*, Belfort, France. Académie des Technologies, UTBM, ADEME.

[Galland et al., 2014b] Galland, S., Yasar, A.-U.-H., Knapen, L., Gaud, N., Janssens, D., Lamotte, O., Wets, G., and Koukam, A. (2014b). Multi-agent simulation of individual mobility behavior in carpooling using the JANUS and JASIM platforms. *International Journal on Transport Research Part C*.

[Gasser, 1992] Gasser, L. (1992). Boundaries, identity, and aggregation : plurality issues in multiagent systems. *SIGOIS Bull.*, 13(3) :13.

[Gaud, 2007] Gaud, N. (2007). *Holonic Multi-Agent Systems : From the analysis to the implementation. Metamodel, Methodology and Multilevel simulation*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort, France. In French.

[Gaud et al., 2008a] Gaud, N., Galland, S., Gechter, F., Hilaire, V., and Koukam, A. (2008a). Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(10) :1659–1676.

[Gaud et al., 2009] Gaud, N., Galland, S., Hilaire, V., and Koukam, A. (2009). An organizational platform for holonic and multiagent systems. In Hindriks, K. v., Pokahr, A., and Sardina, S., editors, *6th International Conference ProMAS 2008, Lecture Notes in Computer Science 5442*, pages 104–119, Estoril, Portugal. Springer Berlin Heidelberg.

[Gaud et al., 2007a] Gaud, N., Galland, S., Hilaire, V., Koukam, A., and Cossentino, M. (2007a). A metamodel and implementation platform for holonic multi-agent systems.

In *the Fifth European Conference on Multi-Agent Systems(EUMAS'07)*, Hammameth (Tunisia).

[Gaud et al., 2004] Gaud, N., Galland, S., and Koukam, A. (2004). Visual perception for virtual agents - environment model and perception's architecture for multi-agent based simulation in virtual environments : Application to a pedestrian simulation. In *Virtual Reality for Industrial Applications Workshop (VIA-04)*, Compiègne, France.

[Gaud et al., 2007b] Gaud, N., Gechter, F., Galland, S., and Koukam, A. (2007b). Holonic multiagent multilevel simulation : Application to real-time pedestrians simulation in urban environment. In *the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*, pages 1275–1280, Hyderabad India.

[Gaud et al., 2008b] Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., Koukam, A., and Cossentino, M. (2008b). A verification by abstraction framework for organizational multiagent systems. In Jung, B., Michel, F., Ricci, A., and Petta, P., editors, *the Sixth International Conference AT2AI-6 : "From Agent Theory to Agent Implementation", of the Seventh International Conference on Autonomous agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 67–73, Estoril, Portugal.

[Gechter et al., 2012] Gechter, F., Contet, J.-m., Lamotte, O., Galland, S., and Koukam, A. (2012). Virtual intelligent vehicle urban simulator : Application to vehicle platoon evaluation. *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)*, 24 :103–114.

[Geramifard et al., 2005] Geramifard, A., Nayeri, P., Zamani-Nasab, R., and Habibi, J. (2005). A hybrid three layer architecture for fire agent management in rescue simulation environment. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2(2) :111–116.

[Gerber et al., 1999] Gerber, C., Siekmann, J. H., and Vierke, G. (1999). Holonic multiagent systems. Technical Report DFKI-RR-99-03, Deutsches Forschungszentrum für Künztliche Inteligenz - GmbH, Postfach 20 80, 67608 Kaiserslautern, FRG.

[Giret, 2005] Giret, A. (2005). *ANEMONA : A Multi-Agent Method for Holonic Manufacturing Systems*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain.

[Giret and Botti, 2004] Giret, A. and Botti, V. (2004). Holons and agents. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15 :645–659.

[Giret and Botti, 2005] Giret, A. and Botti, V. (2005). Analysis and design of holonic manufacturing systems. In *The Networked Enterprise : a challenge for sustainable development, 18th International Conference on Production Research*.

[Giret et al., 2005] Giret, A., Botti, V., and Valero, S. (2005). MAS methodology for HMS. In Springer-Verlag, editor, *Proc. of the Second International Conference on Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS)*, volume 3593 of *LNAI*, pages 39–49.

[Giunchiglia et al., 2002] Giunchiglia, F., Mylopoulos, J., and Perini, A. (2002). The Tropos Software Development Methodology : Processes, Models and Diagrams. Technical Report 0111-20, ITC - IRST. Submitted AAMAS Conference 2002. A Knowledge Level Software Engineering 15.

[Goldenstein et al., 2001] Goldenstein, S., Karavelas, M., Metaxas, D., Guibas, L., Aaron, E., and Goswani, A. (2001). Scalable nonlinear dynamical systems for agent steering and crowd simulation. *Computers & Graphics*, 25(6) :983–998.

[Goto et al., 2001] Goto, T., Kshirsagar, S., and Magnetat-Thalmann, N. (2001). Automatic face cloning and animation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 18(3) :17–25.

[Graversen, 2006] Graversen, K. B. (2006). *The nature of roles, A taxonomic analysis of roles as a language construct*. PhD thesis, IT University of Copenhagen, Denmark.

[Gruber, 1995] Gruber, T. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal Human-Computer Studies*, 43(Issues 5-6) :907–928.

[Gulyás et al., 1999] Gulyás, L., Kozsik, T., and Corliss, J. B. (1999). The multi-agent modelling language and the model design interface. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(3).

[Gupta et al., 2009] Gupta, N., Demers, A., Gehrke, J., Unterbrunner, P., and White, W. (2009). Scalability for virtual worlds. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Data Engineering*, ICDE '09, pages 1311–1314, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Gutknecht, 2001] Gutknecht, O. (2001). *Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents et examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques*. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

[Gutknecht and Ferber, 2000] Gutknecht, O. and Ferber, J. (2000). Madkit : a generic multi-agent platform. autonomous agents. In *AGENTS 2000*, pages 78–79, Barcelona. ACM Press.

[Gutknecht et al., 2000] Gutknecht, O., Ferber, J., and Michel, F. (2000). Madkit : une expérience d'architecture de plate-forme multi-agent générique. In *8ème JFIADSMA*, pages 223–236. Hermès.

[Guy, 2000] Guy, J. (2000). *Dictionnaire d'informatique et d'Internet*. Maison du dictionnaire, Paris, France.

[Hannoun et al., 2000] Hannoun, M., Boissier, O., Sichman, J. S., and Sayettat, C. (2000). MOISE : An organizational model for multi-agent systems. In et Sichman J., M. M., editor, *Advances in Artificial Intelligence, IBERAMIA-SBIA*, pages 156–165, Brazil.

[Hareesh, 2000] Hareesh, P. (2000). Evacuation simulation : Visualisation using virtual humans in a distributed multi-user immersive vr system. In *VSMM'00*.

[Helbing, 1992] Helbing, D. (1992). A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 6 :391–415.

[Helbing et al., 2005] Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., and Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics : Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, 39(1) :1–24.

[Helbing and Molnar, 1997] Helbing, D. and Molnar, P. (1997). Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *Self-organization of complex structures : from individual to collective dynamics*, pages 569–577.

[Helbing and Treiber, 1998] Helbing, D. and Treiber, M. (1998). Gas-Kinetic-Based Traffic Model Explaining Observed Hysteretic Phase Transition. *Phys. Rev. Lett.*, 81(14) :3042–3045.

[Henderson, 1974] Henderson, L. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation Research*, 8(6) :509–515.

[Henderson-Sellers, 2003] Henderson-Sellers, B. (2003). Method engineering for OO systems development. *Commun*, 46(10) :73–78.

[Henderson-Sellers and Giorgini, 2005] Henderson-Sellers, B. and Giorgini, P., editors (2005). *Agent-Oriented Methodologies*. Idea Group publishing.

[Heras et al., 2005] Heras, de, P., Schertenleib, S., Maïm, J., and Thalmann, D. (2005). Real-time shader rendering for crowds in virtual heritage. In *6th Int. Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*.

[Hilaire, 2000] Hilaire, V. (2000). *Vers une approche de spécification, de prototypage et de vérification de Systèmes Multi-Agents*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Hilaire et al., 2010] Hilaire, V., Gaud, N., Galland, S., and Koukam, A. (2010). An approach based upon OWL-S for method fragments documentation and selection. In *the special track on Agent-Oriented Software Engineering Methodologies Infrastructures and Processes (AOIMP). 25th ACM Symposium on Applied Computing*, Sierre, Switzerland. ACM.

[Hodgins and Brogan, 1994] Hodgins, J. and Brogan, D. (1994). Robot herds : group behaviors for systems with significant dynamics. In *Artificial Live IV*, pages 319–324.

[Holland, 1995] Holland, J. H. (1995). *Hidden order : how adaptation builds complexity*. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.

[Hoogendoorn and Body, 2002] Hoogendoorn, S. and Body, P. (2002). Normative pedestrian behaviour theory and modelling. In *15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pages 219–245, Adelaide, Australia.

[Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. and Bovy, P. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, volume 215, pages 283–303.

[Hübner et al., 2002] Hübner, J., Sichman, J., and Boissier, O. (2002). A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems. In Bittencourt, G. and Ramalho, G., editors, *Advances in Artificial Intelligence : 16th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence (SBIA)*, volume 2507 of *LNAI*, pages 118–128. Springer.

[Hunt and Abraham, 2003] Hunt, J. and Abraham, J. (2003). Design and application of the PECAS land use modelling system. In *the 8th Computers in Urban Planning and Urban Management Conference*, Sendai, Japan.

[IEEE-HLA-Evolved, 2010] IEEE-HLA-Evolved (2010). *High-Level Architecture Evolved*. IEEE.

[Iglesias et al., 1999] Iglesias, C., Garrijo, M., and Gonzalez, J. (1999). A survey of agent-oriented methodologies. In *5th International Workshop on Intelligent Agents V, Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-98)*, volume 1555, pages 317–330, Berlin. Springer.

[Jennings, 2000] Jennings, N. (2000). On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, 177(2) :277–296.

[Jennings, 2001] Jennings, N. (2001). An agent-based approach for building complex software systems. *Communications of the ACM*, 44(4) :35–41.

[Jennings and Wooldridge, 1998] Jennings, N. R. and Wooldridge, M. J. (1998). Applications of intelligent agents. *Agent Technology : Foundations, Applications and Markets*.

[Jian et al., 2005] Jian, L., Lizhong, Y., and Daoliang, Z. (2005). Simulation of bi-direction pedestrian movement in corridor. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 354(0) :619 – 628.

[Kallmann et al., 2003] Kallmann, M., Bieri, H., and Thalmann, D. (2003). Fully dynamic constrained delaunay triangulations. *Geometric Modelling for Scientific Visualization*, pages 241–257.

[Karafyllidis and Thanailakis, 1997] Karafyllidis, I. and Thanailakis, A. (1997). A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1) :87 – 97.

[Karamouzas et al., 2009] Karamouzas, I., Heil, P., van Beek, P., and Overmars, M. (2009). A predictive collision avoidance model for pedestrian simulation. In Egges, A., Geraerts, R., and Overmars, M., editors, *Motion in Games*, volume 5884 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 41–52. Springer Berlin / Heidelberg.

[Klüpfel et al., 2000] Klüpfel, H., Meyer-König, M., Wahle, J., and Schreckenberg, M. (2000). Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships. *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*, pages 63–71.

[Koenig and Likhachev, 2005] Koenig, S. and Likhachev, M. (2005). Fast replanning for navigation in unknown terrain. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(3) :354–363.

[Koestler, 1967] Koestler, A. (1967). *The Ghost in the Machine*. Hutchinson.

[Kolp et al., 2006] Kolp, M., Giorgini, P., and Mylopoulos, J. (2006). Multi-agent architectures as organizational structures. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 13(1) :3–25.

[Kristensen and Osterbye, 1996] Kristensen, B. and Osterbye, K. (1996). Roles : Conceptual abstraction theory and practical language issues. *Theory and Practice of Object Systems (TAPOS), Special Issue on Subjectivity in Object-Oriented Systems*, 2(3) :143–160.

[Lamarche and Donikian, 2004] Lamarche, F. and Donikian, S. (2004). Crowds of Virtual Humans : a New Approach for Real Time Navigation in Complex and Structured Environments. *Computer Graphics Forum (Proc. of Eurographics 2004)*, 23(3).

[Lamotte et al., 2010] Lamotte, O., Galland, S., Contet, J.-m., and Gechter, F. (2010). Submicroscopic and physics simulation of autonomous and intelligent vehicles in virtual reality. In *2nd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL10)*, Nice, France. IEEE CPS.

[Lauri et al., 2013] Lauri, F., Gaud, N., Galland, S., and Hilaire, V. (2013). Ipseity - a laboratory for synthesizing and validating artificial cognitive systems in multi-agent systems. In *European Conference on Machine Learning*.

[Loscos et al., 2001] Loscos, C., Chrysanthou, Y., and Tecchia, F. (2001). Real-time shadows for animated crowds in virtual cities. In *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 85–92.

[Loscos et al., 2003] Loscos, C., Marchal, D., and Meyer, A. (2003). Intuitive crowd behavior in dense urban environments using local laws. In *Theory and Practive of Computer Graphics (TPCG'03)*.

[Macal and North, 2005] Macal, C. M. and North, M. J. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, WSC '05, pages 2–15. Winter Simulation Conference.

[Marcenac, 1997] Marcenac, P. (1997). Modélisation de systèmes complexes par agents. *Techniques et Sciences Informatiques*, 16(8).

[Martin et al., 2004] Martin, D., Burstein, M., McDermott, D., McIlraith, S., Paolucci, M., Sycara, K., McGuinness, D. L., Sirin, E., and Srinivasan, N. (2004). Bringing semantics to web services with OWL-S. In *First International Workshop on Semantic Web Services and Web Process Composition*.

[Martinas, 2004] Martinas, K. (2004). Neumannian economy in multi-agent approach. investigation of stability and instability in economic growth. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 2(1) :70–78.

[Martínez, 1996] Martínez, F. (1996). MUSSA : A land use model for santiago city. *Transportation Research Record : Transportation Planning and Land Use at State, Regional and Local Levels*, (1552) :126–134. Commercial tool : Cube Land.

[Maturana, 1997] Maturana, F. (1997). *MetaMorph : an adaptive multi-agent architecture for advanced manufacturing systems*. PhD thesis, The University of Calgary.

[Maturana et al., 1999] Maturana, F., Shen, W., and Norrie, D. (1999). Metamorph : An adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing.

[MDA, 2003] MDA (2003). *MDA Guide, v1.0.1, OMG/2003-06-01*. Object Management Group (OMG).

[Michel, 2004] Michel, F. (2004). *Formalism, tools and methodological elements for the modeling and simulation of multi-agents systems*. PhD thesis, LIRMM, Montpellier, France.

[Michel, 2006] Michel, F. (2006). Le modèle irm4s : le principe influence/réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. In *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*.

[Michel, 2007] Michel, F. (2007). The IRM4S model : the influence/reaction principle for multiagent based simulation. In *Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS07)*. ACM.

[Monticolo et al., 2007] Monticolo, D., Hilaire, V., Koukam, A., and Gomes, S. (2007). An e-groupware based on multi agents systems for knowledge management. In *6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies conference (DEST)*, Cairns, Australia.

[Musse and Thalmann, 2001] Musse, S. and Thalmann, D. (2001). A hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7(2) :152–164.

[Nguyen-Luong et al., 2011] Nguyen-Luong, D., Caneparo, L., Monturi, A., De Bok, M., Kroes, E., and Verrier, D. (2011). ULTISIM : vers un modèle intégré transport-urbanisme européen. Technical Report 5.09.022/09 MT CV 10, Institut d'aménagement et d'urbanisme de l'Île de France.

[Niazi and Hussain, 2011] Niazi, M. and Hussain, A. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models : a visual survey. *Scientometrics*, 89(2) :479–499.

[Niederberger and Gross, 2003] Niederberger, C. and Gross, M. (2003). Hierarchical and heterogenous reactive agents for real-time simulation. *Computer Graphics Forum*, 22(3).

[Noran, 1999] Noran, R. J. (1999). Working together to integrate case. *IEEE Software*, 12 :12–16.

[Odell, 2002] Odell, J. (2002). Agents and complex systems. *Journal of Object Technology*, 1(2) :35–45.

[Odell et al., 2005] Odell, J., Nodine, M., and Levy, R. (2005). A metamodel for agents, roles, and groups. In Odell, J., Giorgini, P., and Müller, J., editors, *Agent-Oriented Software Engineering (AOSE) IV*, Lecture Notes on Computer Science. Springer.

[Odell et al., 2002] Odell, J., Parunak, H., Fleisher, M., and Brueckner, S. (2002). Modeling Agents and their Environment. In Giunchiglia, F., Odell, J., and Weiss, G., editors, *Agent-Oriented Software Engineering III*, volume 2585 of *Lecture Notes In Computer Science*, N.Y. (USA). Springer-Verlag.

[Okazaki and Matshushita, 1993] Okazaki, S. and Matshushita, S. (1993). A study of simulation model for pedestrian movement with evcuation and queuing. In *International Conference on Engineering for Crowd Safety*.

[Olfati-Saber and Murray, 2003] Olfati-Saber, R. and Murray, R. M. (2003). Flocking with obstacle avoidance : Cooperation with limited communication in mobile networks. In *Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 2, page 2022–2028.

[OMG, 2006] OMG (2006). *Object Constraint Language (OCL) Specification, v2.0, OMG Available Specification, formal/06-05-01*. Object Management Group (OMG).

[OMG, 2007] OMG (2007). *Software Process Engineering Metamodel Specification, v2.0, Final Adopted Specification, ptc/07-03-03*. Object Management Group (OMG).

[OMG-NOT, 2004] OMG-NOT (2004). *Notification Service*. Object Management Group (OMG).

[Orkin, 2003] Orkin, J. (2003). Applying goal-oriented action planning to games. In Rabin, S., editor, *AI Game Programming Wisdom 2*, pages 217–228. Charles River Media.

[Owen et al., 1998] Owen, M., Galea, E., P., L., and Filippidis, L. (1998). The numerical simulation of aircraft evacuation and its application to aircraft design and certification. *Aeronautical Journal*, 102 :301–312.

[Padgham and Winikoff, 2002] Padgham, L. and Winikoff, M. (2002). Prometheus : A methodology for developing intelligent agents. In *Third International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*.

[Paiva et al., 2005] Paiva, D., Vieira, R., and S.R., M. (2005). Ontology-based crowd simulation for normal life situations. In *International Conference on Computer Graphics 2005*.

[Paris et al., 2007] Paris, S., Pettré, J., and Donikian, S. (2007). Pedestrian reactive navigation for crowd simulation : a predictive approach. *Computer Graphics Foru*, 26 :665–674.

[Parunak, 2003] Parunak, H. (2003). Making swarming happen. In *Conf. on Swarming and Network Enabled Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR)*, McLean, Virginia, USA.

[Parunak and Brueckner, 2001] Parunak, H. and Brueckner, S. (2001). Entropy and self-organization in multi-agent systems. In *Autonomous Agents*, pages 124–130.

[Parunak et al., 2002] Parunak, H. V. D., Brueckner, S., and Sauter, J. (2002). Digital pheromone mechanisms for coordination of unmanned vehicles. In *First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 449–450, New York, NY, USA. ACM Press.

[Pavón et al., 2005] Pavón, J., Gómez-Sanz, J., and Fuentes, R. (2005). The INGENIAS methodology and tools. In Henderson-Sellers, B. and Giorgini, P., editors, *Agent-Oriented Methodologies*, pages 236–276. Idea Group Publishing, NY, USA.

[Pawlaszczyk and Strassburger, 2009] Pawlaszczyk, D. and Strassburger, S. (2009). Scalability in distributed simulations of agent-based models. In Rossetti, M., Hill, R., Johansson, B., Dunkin, A., and Ingalls, R., editors, *the 2009 Winter Simulation Conference*, pages 1189–1200.

[Pettré et al., 2006] Pettré, J., Ciechomski, P. d. H., Maïm, J., Yersin, B., Laumond, J.-P., and Thalmann, D. (2006). Real-time navigating crowds : scalable simulation and rendering : Research articles. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 17(3-4) :445–455.

[Pfaffenbichler, 2003] Pfaffenbichler, P. (2003). The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (metropolitan activity relocation simulator) - development, testing and application. Technical Report 1/2003, Institute for Transport Planning and Traffic Engineering.

[Pfaffenbichler et al., 2007] Pfaffenbichler, P., Emberger, G., and Shepherd, S. (2007). The integrated dynamic land use and transport model MARS. *LLC*.

[Picard, 2004] Picard, G. (2004). *Méthodologie de développement de systèmes multi-agents adaptatifs et conception de logiciels à fonctionnalité émergente*. PhD thesis, Université Paul Sabatier de Toulouse III.

[Poslad et al., 2000] Poslad, S., Buckle, P., and Hadingham, R. (2000). FIPA-OS : the FIPA agent platform available as open source. In *Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM)*, pages 355–368.

[Pouyanne, 2004] Pouyanne, G. (2004). *Forme Urbaine et Mobilité Quotidienne*. PhD thesis, Université Montesquieu - Bordeaux IV.

[Ralyte and Rolland, 2001] Ralyte, J. and Rolland, C. (2001). An approach for method reengineering. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 2224, page 471.

[Razavi et al., 2011a] Razavi, S. N., Gaud, N., Koukam, A., and Mozayani, N. (2011a). Using Motion Levels of Detail in the Fast Multipole Method for Simulation of Large Particle Systems. In *the 15th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI)*, Orlando, Florida, USA. International Institute of Informatics and Cybernetics.

[Razavi et al., 2012] Razavi, S. n., Gaud, N., Koukam, A., and Mozayani, N. (2012). Automatic dynamics simplification in fast multipole method : application to large flocking systems. *The Journal of Supercomputing*, 62(3) :1537–1559.

[Razavi et al., 2011b] Razavi, S. N., Gaud, N., Mozayani, N., and Koukam, A. (2011b). Multi-agent based simulations using Fast Multipole Method : Application to large scale simulations of flocking dynamical systems. *Artificial Intelligence Review*, 35(1) :53–72.

[Reynolds, 1999] Reynolds, C. (1999). Steering behaviors for autonomous characters. In *Proceedings of the Game Developers Conference*, page 763–782.

[Reynolds, 1987] Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. In *SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 25–34, New York, NY, USA. ACM.

[Rodriguez, 2005a] Rodriguez, S. (2005a). *From analysis to design of holonic multi-agent systems : A framework, methodological guidelines and applications*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Rodriguez, 2005b] Rodriguez, S. (2005b). *From analysis to design of Holonic Multi-Agent Systems : A Framework, Methodological Guidelines and Applications*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Rodriguez et al., 2006] Rodriguez, S., Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., and Koukam, A. (2006). An analysis and design concept for self-organization in holonic multi-agent systems. In *the International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications (ESOA'06)*, pages 62–75. Springer-Verlag.

[Rodriguez et al., 2007] Rodriguez, S., Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., and Koukam, A. (2007). An analysis and design concept for self-organization in holonic multi-agent systems. In Brueckner s., E. a., editor, *International Conference on Engineering Self-Organising Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence 4435*, pages 15–27. Springer-Verlag.

[Rodriguez et al., 2011] Rodriguez, S., Hilaire, V., Gaud, N., Galland, S., and Koukam, A. (2011). *Holonic Multi-Agent Systems*, chapter 11, pages 238–263. Self-Organising Software From Natural to Artificial Adaptation - Natural Computing. Springer, first edition.

[Russell and Norvig, 2003] Russell, S. J. and Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Pearson Education, 2 edition.

[Sauter et al., 2002] Sauter, J., Matthews, R., Parunak, V., and Brueckner, S. (2002). Evolving adaptive pheromone path planning mechanisms. In *First International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pages 434–441, Bologna, Italy.

[Schaefer et al., 1998] Schaefer, L. A., Mackulak, G. T., Cochran, J., and Cherilla, J. L. (1998). Application of a general particle system model to movement of pedestrians and vehicles. In *WSC '98 : Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pages 1155–1160, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press.

[Seidita et al., 2010] Seidita, V., Cossentino, M., Hilaire, V., Gaud, N., Galland, S., Koukam, A., and Gaglio, S. (2010). The metamodel : a starting point for design processes construction. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering (IJSEKE)*, 20(4) :575–608.

[Seo et al., 2002] Seo, H., Yahia-Cherif, L., Goto, T., and Magnetat-Thalmann, N. (2002). Genesis : Generation of e-population based on statistical information. In *Computer Animation '02*. IEEE Press.

[Shannon, 1977] Shannon, R. E. (1977). Simulation modeling and methodology. *SIGSIM Simul. Dig.*, 8(3) :33–38.

[Shao and Terzopoulos, 2007] Shao, W. and Terzopoulos, D. (2007). Autonomous pedestrians. *Graphical Models*, 69(5-6) :246–274. Special Issue on SCA 2005.

[Shiller, 2001] Shiller, Z. (2001). Motion planning in dynamic environments : obstacles moving along arbitrary trajectories. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3716–3721.

[Simmonds, 1999] Simmonds, D. (1999). The design of the DELTA land-use modelling package. *Journal on Environment and Planning - Part B*, 26(5) :665—-684.

[Simon, 1996] Simon, H. A. (1996). *The Science of Artificial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 3rd edition.

[Singh, 1992] Singh, B. (1992). Interconnected Roles (ir) : A Coordination Model. Technical Report CT-084-92, MCC.

[Stentz, 1994] Stentz, A. (1994). Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3310–3317.

[Still, 2000] Still, G. (2000). *Crowd Dynamics*. PhD thesis, Warwick University.

[Stylianou and Fyrillas, 2004] Stylianou, S. and Fyrillas, M. M. (2004). Scalable pedestrian simulation for virtual cities. In *In ACM VRST*.

[Szymanezyk et al., 2011] Szymanezyk, O., Dickinson, P., and Duckett, T. (2011). Towards agent-based crowd simulation in airports using games technology. In O'Shea, J., Nguyen, N. T., Crockett, K. A., Howlett, R. J., and Jain, L. C., editors, *KES-AMSTA*, volume 6682 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 524–533. Springer.

[Taylor and Davis, 1999] Taylor, D. and Davis, W. J. (1999). Review of basic research in bicycle traffic science, traffic operations, and facility design. *Transportation Research Record*, 1674 :102–110.

[Tecchia et al., 2002] Tecchia, F., Loscos, C., and Chrysanthou, Y. (2002). Image-based crowd rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(2) :36–43.

[Teknomo, 2002] Teknomo, K. (2002). *Microscopic pedestrian flow characteristics : development of an image processing data collection and simulation model*. PhD thesis, Tohoku University, Japan.

[Thalman et al., 1999] Thalman, D., Farenc, N., and Boulic, R. (1999). Virtual human life simulation and database : Why and how. In *DANTE '99 : Proceedings of the 1999 International Symposium on Database Applications in Non-Traditional Environments*, page 471, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Thalmann et al., 2009] Thalmann, D., Grillon, H., Maim, J., and Yersin, B. (2009). Challenges in crowd simulation. In *CyberWorlds, 2009. CW '09. International Conference on*, pages 1–12.

[Thalmann and Musse, 2007] Thalmann, D. and Musse, S. R. (2007). *Crowd simulation*. Springer.

[Thomas and Donikian, 2000] Thomas, G. and Donikian, S. (2000). Virtual humans animation in informed urban environments. In *CA '00 : Proceedings of the Computer Animation*, page 112, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Thompson and E., 1995] Thompson, P. and E., M. (1995). A computer-model for the evacuation of large building population. *Fire Safety Journal*, 24(2) :131–148.

[Treiber et al., 2000] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62 :1805–1824.

[Tu and Terzopoulos, 1994] Tu, X. and Terzopoulos, D. (1994). Artificial fishes : Physics, locomotion, perception, behavior. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 28, pages 43–50, Orlando, FL, USA. ACM.

[Ulicny et al., 2004] Ulicny, B., Heras Ciechomski, de, P., and Thalmann, D. (2004). Crowdbrush : Interactive authoring of real-time crowd scenes. In *ACM SIGGRAPH/European Symposium on Computer Animation (SCA'04)*, pages 243–252.

[Ulicny and Thalmann, 2002] Ulicny, B. and Thalmann, D. (2002). Towards interactive real-time crowd behavior simulation. *Computer Graphics Forum*, 21(4) :767–775.

[Ulieru and Geras, 2002] Ulieru, M. and Geras, A. (2002). Emergent holarchies for e-health applications : a case in glaucoma diagnosis. In *IEEE IECON'02*, volume 4, pages 2957–2961.

[Van Aeken, 1999] Van Aeken, F. (1999). *Les systèmes multi-agents minimaux*. PhD thesis, Leibniz / IMAG, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.

[Van den Berg et al., 2008] Van den Berg, J., Lin, M., and Manocha, D. (2008). Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1928–1935.

[Vanbergue, 2003] Vanbergue, D. (2003). *Conception de simulation multi-agents : application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota*. PhD thesis, Université Paris VI.

[Vanbergue and Drogoul, 2002] Vanbergue, D. and Drogoul, A. (2002). Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *Journée Cassini 2002*.

[Veksler, 2013] Veksler, V. D. (2013). Examining model scalability through virtual world simulations. In Kennedy, B., Reitter, D., and Amant, R., editors, *the 22nd Annual Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation*, pages 1189–1200, Ottawa, Canada.

[VISSIM,] VISSIM.

[Waddell, 2002] Waddell, P. (2002). UrbanSim : Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, (68) :297–314.

[Wand and Strasser, 2002] Wand, M. and Strasser, W. (2002). Multi-resolution rendering of complex animated scenes. *Computer Graphics Forum*, 21(3).

[Wegener, 2004] Wegener, M. (2004). Overview of land-user transport models.

[Weyns and Holvoet, 2004] Weyns, D. and Holvoet, T. (2004). A Formal Model for Situated Multiagent Systems. *Special Issue of Fundamenta Informaticae*, 63(2).

[Weyns et al., 2006] Weyns, D., Parunak, H. V. D., Michel, F., Holvoet, T., and Ferber, J. (2006). Environments for Multiagent Systems State-of-the-Art and Research Challenges. In Weyns, D., Parunak, H. V. D., and Michel, F., editors, *Third International Workshop (E4MAS 2006)*, volume 4389 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 1–47. Springer, Hakodate, Japan.

[Weyns et al., 2005] Weyns, D., Schumacher, M., Ricci, A., Viroli, M., and Holvoet, T. (2005). Environments in multiagent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 20(2) :127–141.

[Wiedemann, 1974] Wiedemann, R. (1974). Simulation des straßenverkehrsflusses. Number 8 in Schriftenreihe des IfV.

[Wilson, 1997] Wilson, A. (1997). Land-use/transport interaction models - past and future. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32(1).

[Wooldridge et al., 2000] Wooldridge, M., Jennings, N. R., and Kinny, D. (2000). The GAIA methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(3) :285–312.

[Wyns, 1999] Wyns, J. (1999). *Reference architecture for Holonic Manufacturing Systems - the key to support evolution and reconfiguration*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven.

[Zambonelli et al., 2003] Zambonelli, F., Jennings, N., and Wooldridge, M. (2003). Developing multiagent systems : the GAIA methodology. *ACM Trans. on Software Engineering and Methodology*, 12(3).

[Zeigler et al., 2000] Zeigler, B. P., Kim, T. G., and Praehofer, H. (2000). *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press, 2nd edition edition.

Document réalisé avec LaTeX et :
le style LaTeX pour HDR créé par S. Galland — http://www.multiagent.fr/HDRStyle
la collection de paquets tex-upmethodology — http://www.arakhne.org/tex-upmethodology/
l'outil de compilation AutoLaTeX — http://www.arakhne.org/autolatex/

Document généré le 24/01/2014.

Résumé :

La modélisation de la dynamique des piétons, des cyclistes et des conducteurs de véhicules est d'un grand intérêt théorique et pratique. Au cours des deux dernières décennies, la Recherche dans un large éventail de domaines tels que l'infographie, la physique, la robotique, les sciences sociales, la sécurité et les systèmes de formation a créé des simulations impliquant des individus de type hétérogènes. Deux grands types de simulation d'individus dans un univers virtuel peuvent généralement être distingués selon qu'elles cherchent à atteindre : un haut niveau de réalisme de comportement (simulation pour la sécurité ou les sciences sociales) ou une visualisation de haute qualité (productions de films, de jeux vidéos, d'outils de réalité virtuelle). Dans la première catégorie, les résultats de simulation sont généralement cohérents avec les observations réalisées sur la population réelle et peuvent servir de base à des études théoriques pour l'évaluation et la prévision du comportement des individus. Dans la seconde catégorie, les modèles de comportement ne sont pas la priorité et ne correspondent pas quantitativement au monde réel. Cependant, les individus sont des personnages en 3D entièrement animés et les utilisateurs de l'application peuvent avoir un degré élevé d'interaction avec les éléments de la simulation. Les recherches et les applications récentes tendent à unifier ces deux domaines, en particulier dans le domaine des systèmes de formation où les deux aspects sont nécessaires pour une formation efficace. Dans ce cadre, les systèmes multiagents sont utilisés pour modéliser les populations d'individus. Ils forment un paradigme prometteur pour la conception de logiciels complexes. En effet, ce paradigme propose de nouvelles stratégies pour analyser, concevoir et implémenter de tels systèmes. Les systèmes multiagents sont considérés comme des sociétés composées d'entités autonomes et indépendantes, appelées agents, qui interagissent en vue de résoudre un problème ou de réaliser collectivement une tâche. Les systèmes multiagents peuvent être considérés comme un outil viable pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes, et notamment les systèmes de simulation d'individus dans un univers virtuel.

Nous proposons un métamodèle organisationnel et holonique permettant de modéliser ces systèmes multiagents. L'approche organisationnelle permet de décomposer le système en unités comportementales appelées rôles. L'approche holonique permet de composer le système en un ensemble d'agents, eux-mêmes, pouvant être décomposés en un ensemble d'agents, et ainsi de suite. Ce métamodèle est utilisé comme la base de notre processus méthodologique, appelé ASPECS, qui guide les scientifiques et les experts d'un domaine dans la modélisation et la construction d'un modèle d'un SMA représentant un système complexe. Sur la base du métamodèle organisationnel et holonique, nous proposons des modèles d'environnement et de groupes d'individus constituant un système de grande échelle spatiale et avec une large population d'individus. Ces modèles sont utilisés pour la simulation d'individus et de foules dans des univers virtuels. L'une des particularités intéressantes de nos modèles est leur conception multiniveau. Nous proposons des modèles de décomposition hiérarchique dynamique pour l'environnement et pour la population. Durant le processus de simulation, il devient alors possible de sélectionner les niveaux permettant d'atteindre le meilleur compromis entre la qualité des résultats produits par la simulation et les performances de calculs pour obtenir ces résultats. Les modèles présentés dans ce mémoire ont été appliqués à la simulation de foule et de trafic dans le cadre de contrats de recherche dont certains sont abordés dans ce document : simulation du réseau urbain de bus de Belfort, simulation de foules dans un centre ville de Belfort, simulation du covoiturage dans les Flandres.

SPIM

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

UFC UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ