



HAL
open science

Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents : application à la simulation en environnement virtuel 3D

Thomas Durif

► **To cite this version:**

Thomas Durif. Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents : application à la simulation en environnement virtuel 3D. Web. Université de Bourgogne, 2014. Français. NNT : 2014DIJOS079 . tel-02318387

HAL Id: tel-02318387

<https://theses.hal.science/tel-02318387v1>

Submitted on 17 Oct 2019

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

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents.

Application à la simulation en environnement virtuel 3D.

■ THOMAS DURIF



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



SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

THÈSE présentée par

THOMAS DURIF

pour obtenir le

Grade de Docteur de
l'Université de Bourgogne

Spécialité : **Informatique**

Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents.

Application à la simulation en environnement virtuel 3D.

Unités de Recherche :

Équipe Checksem, Le2i, UMR CNRS 6306, Université de Bourgogne,
Multiagent Group, IRTES-SeT, EA 7274, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Soutenue publiquement le 17 octobre 2014 devant le Jury composé de :

PIERRE GANÇARSKI	Rapporteur	Université de Strasbourg
RENÉ MANDIAU	Rapporteur	Université de Valenciennes
OLIVIER BOISSIER	Examineur	ENS Mines de Saint-Étienne
ABDERRAFIAA KOUKAM	Examineur	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
CHRISTOPHE NICOLLE	Directeur de thèse	Université de Bourgogne
NICOLAS GAUD	Co-Encadrant de thèse	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier MM. René Mandiau, Professeur des Universités de l'Université de Valenciennes, et Pierre Gańczarski, Professeur des Universités de l'Université de Picardie Jules Verne, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon sujet en acceptant de rapporter mon travail. Je les remercie pour les différentes remarques et corrections qu'ils ont suggérées en vue d'améliorer la qualité et la pertinence de ce mémoire de thèse.

Je remercie également MM. Olivier Boissier, Professeur à l'ENS de Mines Saint-Etienne, et Abderrafiaa Koukam, Professeur des Universités de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de mon jury.

Je tiens également à remercier mon directeur de thèse, M. Christophe Nicolle, Professeur des Universités de l'Université de Bourgogne pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe **CHECKSEM**. Il a su m'initier et me former au travail de chercheur et a dirigé cette thèse en partageant généreusement ses connaissances dans la recherche scientifique. Je lui adresse l'expression de ma sympathie et de ma profonde gratitude. Grâce à lui, je pourrai moi aussi dire que « *je l'ai fait dans ma thèse* ».

Je remercie très chaleureusement mon co-encadrant de thèse, M. Nicolas Gaud, Maître de conférences au laboratoire Systèmes et Transports de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour tous ses conseils, ses recommandations, son soutien, ses encouragements et pour m'avoir suivi tout au long de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de l'équipe **CHECKSEM**, anciens comme nouveaux, que ce soit pour leur aide active ou simplement la bonne humeur et l'ambiance conviviale : Ana, Anett, Aurélie, Fayrouz, Florence, Mélodie, Perrine, Valériane, Benjamin, Clément, Christophe, Christophe, David, Florian, Florian, Florian, Helbert, Henri, Jordan, Laurent, Mahdi, Rafaël, Romain, Sylvain, Tarcisio, Yoan. Je remercie tout particulièrement M. Florian Orpelière, Ingénieur d'études au sein de l'équipe **CHECKSEM**, pour l'apport tant technique que scientifique à mes recherches.

Je remercie Conseil Régional de Bourgogne, qui m'a donné les moyens de réaliser mes recherches.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin afin que je puisse mener à bien ces travaux de recherche.

Merci à tous mes proches, pour leur soutien, leurs encouragements, leurs relectures et bien plus.

SOMMAIRE

I	Contexte	1
1	Introduction	3
1.1	Contexte	4
1.2	Problématiques et objectifs de ces travaux	7
1.3	Description du plan de la thèse	9
2	État de l'art	11
2.1	Introduction	13
2.2	Définitions et fondamentaux sur les systèmes multi-agents	13
2.2.1	Définition de la notion d'agent	13
2.2.2	Définition d'un système multi-agents	14
2.3	Définitions et fondamentaux sur la simulation	15
2.4	La simulation multi-agents	15
2.5	La simulation en environnement virtuel	18
2.6	Comportement d'agent : planification et sélection d'action	20
2.6.1	Sélection d'action	20
2.6.2	Planification	23
2.6.3	Représentation de l'environnement et planification	24
2.7	Vers un modèle informé de l'environnement	26
2.8	Définitions et fondamentaux sur le web sémantique	27
2.8.1	Le World Wide Web	28
2.8.2	Définitions	29
2.8.3	Technologies et Architecture	31
2.9	Les logiques de description	34
2.10	Bases de connaissances à base de logique de description	37
2.11	Définitions et fondamentaux du raisonnement	40

2.11.1	Raisonnement par déduction	41
2.11.2	Raisonnement par induction	41
2.11.3	Raisonnement par abduction	42
2.11.4	Raisonneur sémantique	43
2.12	La sémantique appliquée aux SMA	45
2.12.1	Sémantique pour l'environnement	46
2.12.2	Sémantique pour les agents	47
2.13	Conclusion	48
 II Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents		49
 3 Introduction		51
 4 Environnement informé sémantiquement enrichi		57
 5 Mécanismes comportementaux à base de règles		59
 6 Conclusion		61
 III Application		63
 7 Navigation de piétons dans des bâtiments en 3D		65
 IV Conclusions et Perspectives		67
 8 Conclusion		69
 9 Perspectives		71

<i>SOMMAIRE</i>	ix
V Annexes	75
VI Références	79
Bibliographie	81
Table des figures	91
Liste des tables	93



CONTEXTE

INTRODUCTION

Sommaire

1.1	Contexte	4
1.2	Problématiques et objectifs de ces travaux	7
1.3	Description du plan de la thèse	9

1.1/ CONTEXTE

La modélisation et la simulation de la dynamique de piétons et d'individus, et plus généralement la modélisation du comportement humain et des dynamiques collectives associées représentent un challenge théorique majeur pour de nombreuses disciplines scientifiques. Ce type de simulation intervient de plus en plus dans la conception d'outils de formation et d'entraînement notamment pour la formation à la conduite (train, bus, etc.) et la formation des personnels dans les domaines de la défense et de la sécurité. Il intervient également pour la conception d'outils d'aide à la décision et pour l'évaluation de différents scénarios de planification, d'aménagement du territoire ou d'optimisation de réseaux de transports. Ce type de simulation est de plus en plus souvent associé à une visualisation en deux ou trois dimensions tentant de reproduire le plus fidèlement possible le système réel étudié en exploitant la multitude des sources de données actuellement disponibles au niveau des systèmes d'informations géographiques et des diverses bases de données associées.

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 comportemental (simulation pour la sécurité ou les sciences sociales) ou une visualisation de haute qualité (production de films, de jeux vidéos, d'outils de réalité virtuelle) [Thalman 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 s'avèrent nécessaires pour un apprentissage ou un entraînement efficaces.

La simulation multi-agents est l'une des approches les plus adéquates pour tenter de reproduire la dynamique de population. Elle se réfère aux modèles qualifiés individus-centrés (cf. [Amblard, 2003]) et fournit un outil permettant de modéliser et simuler la dynamique de populations composées d'individus en interaction. Ce type de simulation assimile l'individu à un agent. La simulation multi-agents a été appliquée à un grand nombre de domaines tels que la robotique [Drogoul, 1993, Kitano et al., 1997], l'éthologie [Drogoul and Picault, 1999], l'écologie et la biologie, ou les sciences sociales [Conte et al., 1998, Gilbert and Troitzsch, 2005].

Le domaine qui nous intéresse en premier lieu dans ce manuscrit est la simulation en tant que support pour le développement d'outils d'aide à la décision et plus particulièrement d'aide à l'évaluation de la configuration d'un bâtiment et de son adéquation à ses usages.

En d'autres termes, l'application à long terme visée par nos travaux est la qualification de bâtiments en exploitant des techniques d'évaluation basées sur la simulation multi-agents. L'objectif de cette thèse n'est évidemment pas de développer un tel outil, mais de fournir le support théorique qui en facilitera la conception.

La thèse défendue dans ce manuscrit s'intéresse donc plus particulièrement à **la simulation multi-agents appliquée à la simulation d'individus dans des bâtiments 3D virtuels**. Pour ce faire, nos travaux se proposent de capitaliser l'expérience acquise dans le domaine du web sémantique sur les ontologies et les moteurs d'inférence associés pour faciliter la conception et le développement de comportements intelligents pour des agents évoluant dans des univers virtuels. L'objectif est de **fournir aux agents une approche générique pour gérer leur représentation du monde et raisonner sur cette représentation**. Cette thèse se situe donc à la croisée de deux domaines théoriques : la **simulation multi-agents** et plus généralement les **systèmes multi-agents**, et le domaine des **ontologies** et du **web sémantique**.

La composante applicative des travaux de recherche décrite dans ce manuscrit constitue cependant une dimension prépondérante. Par la suite, nous verrons que la conception d'une simulation multi-agents est un processus long et coûteux, cette thèse aspire donc à optimiser ce processus en intégrant différents standards (notamment ceux du domaine du bâtiment : BIM¹ et IFC²) et en proposant une architecture logicielle générique et extensible.

Il est clair que développer des comportements intelligents pour des agents passe nécessairement par l'étude des aspects théoriques liés à la notion de raisonnement. Le raisonnement qualifie tout à la fois un processus cognitif et les résultats issus de ce processus. La notion de raisonnement constitue l'un des fondamentaux de la philosophie depuis ses origines antiques avec Aristote au travers notamment de la science qui lui est dédiée : la logique. Dès l'Antiquité, la dualité de la notion de raisonnement en tant que processus et résultat de ce processus est d'ailleurs soulignée. Le domaine de la logique mène de front l'étude des processus logiques au travers notamment de la notion d'inférence, qu'elle soit déductive, inductive ou abductive (voire intuitive pour Descartes), avec l'examen des objets manipulés par ces processus : les faits, l'information ou la connaissance. La notion d'ontologie trouve d'ailleurs ses racines dans cette seconde discipline en se focalisant d'abord sur l'étude de la nature et l'identification des propriétés du réel et de l'être.

De nombreux travaux se sont intéressés à l'étude du raisonnement dans le domaine des systèmes multi-agents et plus généralement de l'intelligence artificielle au travers notamment des problématiques de sélection d'action, de planification, etc. On peut considérer que l'approche initialement développée dans cette discipline a d'abord été centrée sur la vision du raisonnement en tant que processus dans l'idée de développer des mécanismes

1. Building Information Model
2. Industry Foundations Classes

mimétiques du fonctionnement du cerveaux humain et animal. Ces travaux ont été certes féconds, cependant après plus de vingt année de recherche, il reste difficile d'identifier un standard dans ce domaine. La question de la représentation de la connaissance demeure une question brûlante dans le domaine des systèmes multi-agents.

À contrario, les chercheurs et les industriels du domaine du web sémantique ont adopté une approche différente d'abord centrée sur la connaissance, sur sa représentation et sur l'identification de mécanismes standards pour la décrire et l'échanger avant de s'intéresser ensuite à sa manipulation. La littérature s'accorde généralement sur les termes de Gruber pour définir une ontologie : « *spécification explicite d'une conceptualisation partagée d'un domaine* » [Gruber, 1993]. Plus de vingt années se sont écoulées depuis cette définition et aujourd'hui la conception d'ontologies est devenue une tâche commune. La raison d'être d'une ontologie est le partage de la connaissance d'un domaine. Pour supporter cet échange, différents langages ont été proposés. Parmi eux, on distingue généralement les langages d'échange d'ontologies sur le Web (RDF³ et OWL⁴), dont la syntaxe est basée sur le langage XML, et les langages opérationnels qui implémentent les ontologies à des fins d'inférences (SWRL⁵), afin de constituer un composant d'un système d'information (graphes, logiques, langues restreintes). Le domaine des ontologies est de plus en plus mature grâce aux outils fournis par la communauté du Web sémantique⁶. L'implication des industriels et l'explosion de l'Internet ont contribué à l'établissement plus rapide de standards internationalement reconnus dans ce domaine pour la représentation des connaissances, notamment RDF et OWL. Aujourd'hui, ce domaine s'intéresse pleinement à la notion de raisonnement en tant que processus et de nombreux outils sont désormais disponibles sur le marché. Ils ont bien sûr bénéficié des travaux qui ont été menés en intelligence artificielle tout en s'intégrant dans les standards qui régissent le web. Cette thèse s'inscrit donc dans cette approche fédératrice nourrie par les échanges mutuels entre les domaines de l'intelligence artificielle et du web sémantique.

3. RDF : Dan Brickley [2004]

4. OWL : Working Group [2012a]

5. SWRL : Horrocks et al. [2004]

6. SW - Semantic Web : <http://www.w3.org/2001/sw/>

1.2/ PROBLÉMATIQUES ET OBJECTIFS DE CES TRAVAUX

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse peut être résumé ainsi :

Proposer un modèle pour concevoir et développer des comportements complexes et réalistes pour la simulation multi-agents dans des environnements 3D sémantiquement enrichis.

Cet énoncé peut être analysé de la manière suivante :

« Proposer un **modèle** »

Pour Le Moigne [1999], la notion de **modèle** est « *une représentation intelligible artificielle, symbolique, des situations dans lesquelles nous intervenons : modéliser c'est à la fois identifier et formuler quelques problèmes en construisant des énoncés, et chercher à résoudre ces problèmes en raisonnant par des simulations. En faisant fonctionner le modèle énoncé, on tente de produire des modèles solutions. Modélisation et simulation, réflexion et raisonnements, sont les deux faces inséparables de toute délibération* ». Adhérant pleinement au raisonnement de Le Moigne [1999], la thèse défendue dans ce manuscrit s'attache à fournir une représentation intelligible de la notion d'environnement au sein d'une simulation afin de faciliter la conception des comportements d'agents manipulant cette représentation.

« pour concevoir et développer des **comportements complexes et réalistes** »

Le terme **comportement** s'intéresse aux processus de délibération des agents qui guident la prise de décision et la détermination des actions qu'ils effectuent et qui modifient l'état de leur environnement. La notion de complexité survient bien évidemment lorsque ces comportements s'attachent à reproduire sous certaines conditions les comportements observés dans le monde réel. La notion de comportement s'intéresse notamment à la détermination de la séquence d'actions qui, à partir de l'état courant de l'environnement, permettra à l'agent d'atteindre un état de l'environnement correspondant à ses objectifs personnels. Cette thèse ne contribue pas directement à produire de nouveaux modèles ou outils pour la conception de comportements mais exploite les moteurs d'inférences sémantiques pour faciliter la phase de planification et de sélection d'action.

« pour la **simulation multi-agents** dans des **environnements 3D sémantiquement enrichis** »

L'objectif de la simulation est de faciliter la compréhension de la dynamique d'un système et de tenter d'en prédire l'évolution. Notre approche se focalise sur l'une des composantes principales de toute simulation multi-agents : l'environnement. Pour Weyns et al.

[2007], l'environnement est une abstraction de premier ordre qui fournit les conditions générales aux agents pour exister et qui joue le rôle d'interface pour supporter les interactions entre agents et leur permettre d'accéder aux ressources⁷.

Derrière cette définition générique se cachent en fait de multiples représentations et visions de la notion d'environnement : environnement physique, environnement social, et environnement d'exécution. Nous nous focalisons principalement sur la dimension physique de l'environnement, l'environnement situé en tant que collection d'objets physiques du monde et ensemble de processus garantissant la dynamique endogène de ce monde. La notion d'environnement physique se réfère à la classe de systèmes réels ou simulés dans laquelle les agents, ainsi que les objets, disposent d'une position explicite et produisent des actions elles-aussi localisées. Notre objectif vise à enrichir cette description physique de l'environnement en ajoutant une dimension sémantique personnalisable et extensible en fonction des objectifs de l'application ciblée. Chaque objet se voit associer une description sémantique des actions possibles pour le manipuler et des effets potentiels associés. Cette description est adaptée à la typologie et aux objectifs de l'agent qui la perçoit. C'est l'exploitation de cette couche sémantique qui permet dans un second temps de contribuer à faciliter les processus de délibération des agents et la planification de leurs actions pour la satisfaction de leurs objectifs.

Le terme planification prend un sens particulier dans les environnements situés dans lesquels la problématique de navigation est centrale. De plus, la dimension applicative de cette thèse est centrée sur la simulation à l'intérieur des bâtiments. Notre approche portera donc un intérêt tout particulier à l'enrichissement sémantique de l'environnement dans l'objectif d'optimiser le comportement des agents face aux problématiques de planification de chemin et de navigation. Cependant, le modèle proposé reste générique et applicable à d'autres approches de planification.

La problématique centrale pour enrichir sémantiquement l'environnement d'une simulation multi-agents est **la définition d'une ontologie décidable modélisant l'ensemble des connaissances contenues dans l'environnement virtuel 3D**.

Enfin pour offrir aux agents la possibilité d'exploiter pleinement les moteurs d'inférence sémantique, le cœur de la problématique adressée par cette thèse vise à **définir une ontologie et les règles associées pour modéliser le comportement d'agents mobiles dans un environnement virtuel**.

La résolution de ces deux problèmes nous permettra de disposer d'un environnement de simulation entièrement représenté sous la forme d'ontologies et de règles sémantiques, parfaitement inséré dans un processus de conception professionnelle du bâtiment.

7. "The environment is a first-class abstraction that provides the surrounding conditions for agents to exist and that mediates both the interaction among agents and the access to resources".

1.3/ DESCRIPTION DU PLAN DE LA THÈSE

Après ce bref tour d'horizon des propositions présentées dans cette thèse, cette section introduit le plan de ce manuscrit. Selon les objectifs énoncés dans la section 1.2, cette thèse est organisée en quatre parties. Les différents chapitres qui composent ce document ainsi que leur organisation respective sont résumés par la figure 1.1.

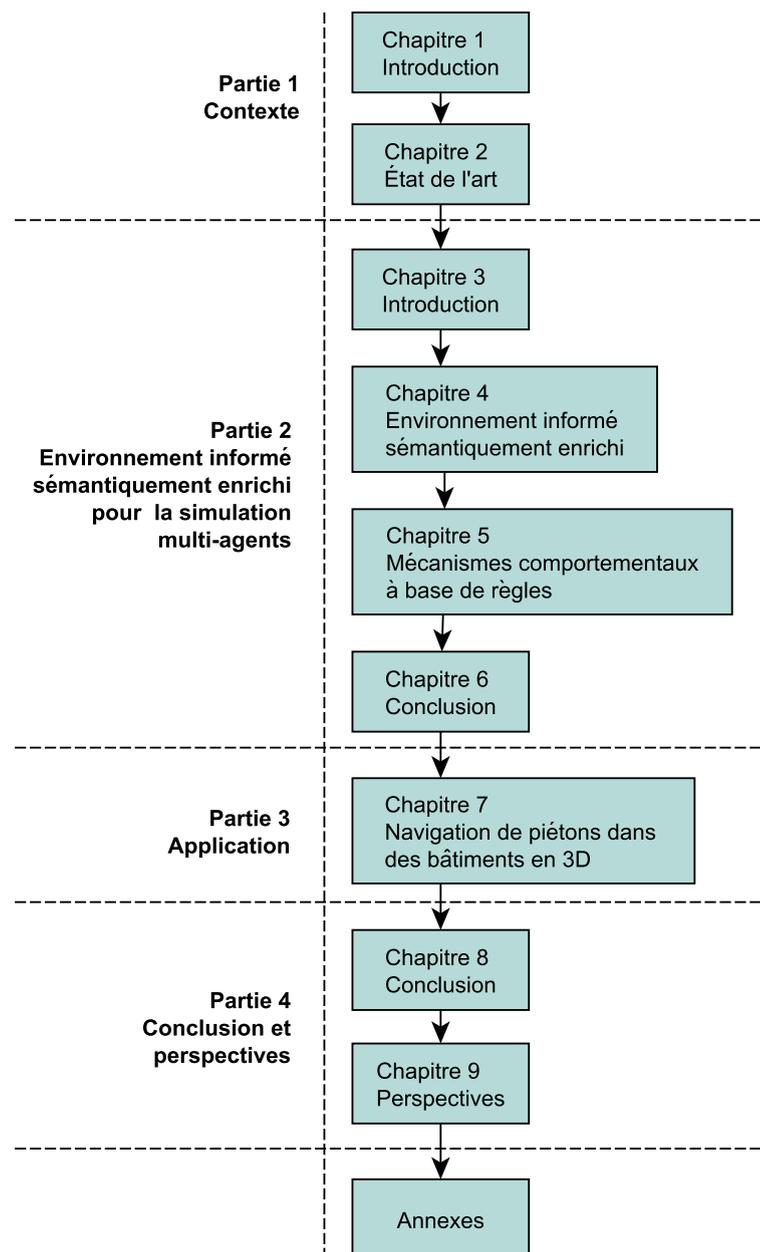


FIGURE 1.1 – Plan de la thèse

La **partie I**, intitulée **Contexte**, présente le cadre de ces travaux de recherche, avec, dans un premier temps l'introduction générale ci-présente. Et dans un second temps, l'**État de l'art** est consacré à la présentation des éléments théoriques des deux domaines sous-jacents aux travaux présentés dans cette thèse, à savoir les systèmes multi-agents d'une part, et le domaine du web sémantique d'autre part. Les fondamentaux sur les systèmes multi-agents et à la simulation multi-agents sont donc introduits avec une attention toute particulière sur la simulation multi-agents en environnement virtuel et les problématiques associées. Nous ferons ensuite une courte introduction du web sémantique, présentant les fondements et les technologies de ce dernier.

La **partie II**, intitulée **Environnement informé sémantiquement enrichi pour la simulation multi-agents**, constitue le cœur de notre contribution et présente le modèle d'environnement informé sémantiquement enrichi, ainsi que son exploitation pour le développement de comportements de planification et de navigation.

Le **chapitre 4**, intitulé **Environnement informé sémantiquement enrichi** présente les éléments mis en place dans la description de l'environnement pour répondre à la problématique de l'enrichissement sémantique de l'environnement. Il propose une modélisation de l'environnement qui associe à la fois une représentation géométrique et une représentation sémantique des objets de l'environnement. Cette modélisation de l'environnement doit être aussi proche que possible de la réalité de l'environnement physique. Pour cela nous avons fait deux choix :

- nous insérer dans le processus de conception d'un bâtiment réel en dérivant des maquettes numériques du bâtiment conçues par les architectes ;
- utiliser une représentation ontologique de la connaissance du bâtiment.

Le **chapitre 5**, intitulé **Mécanismes comportementaux à base de règles** présente la façon dont nous utilisons cet environnement enrichi afin d'aider le processus de planification d'agents intelligents en exploitant les mécanismes d'inférences. Ces mécanismes peuvent être réalisés sur des ontologies décidables à l'aide de raisonneurs pour représenter le comportement des agents mobiles au sein de l'environnement.

La **partie III**, intitulée **Application**, propose la mise en œuvre des travaux présentés sur l'exemple de l'évacuation de piétons d'un établissement recevant du public.

Enfin, la **partie IV**, intitulée **Conclusions et Perspectives**, présente un bilan des travaux de recherche décrits dans cette thèse et dresse un panorama de quelques-unes des perspectives possibles afin de guider les travaux futurs et les éventuelles extensions des modèles proposés.

L'objectif de ce chapitre est de positionner nos travaux de recherche par rapport à l'existant. Nos travaux proposent de faire travailler de concert les domaines de la simulation multi-agents et du web sémantique. Ce chapitre est donc une introduction à ces domaines. Une fois ces deux domaines présentés, nous devons focaliser notre étude sur les problématiques de chacun pour en identifier les verrous et poser les fondements de notre approche.

Sommaire

2.1	Introduction	13
2.2	Définitions et fondamentaux sur les systèmes multi-agents	13
2.2.1	Définition de la notion d'agent	13
2.2.2	Définition d'un système multi-agents	14
2.3	Définitions et fondamentaux sur la simulation	15
2.4	La simulation multi-agents	15
2.5	La simulation en environnement virtuel	18
2.6	Comportement d'agent : planification et sélection d'action	20
2.6.1	Sélection d'action	20
2.6.2	Planification	23
2.6.3	Représentation de l'environnement et planification	24
2.7	Vers un modèle informé de l'environnement	26
2.8	Définitions et fondamentaux sur le web sémantique	27
2.8.1	Le World Wide Web	28
2.8.2	Définitions	29
2.8.3	Technologies et Architecture	31
2.9	Les logiques de description	34
2.10	Bases de connaissances à base de logique de description	37
2.11	Définitions et fondamentaux du raisonnement	40
2.11.1	Raisonnement par déduction	41
2.11.2	Raisonnement par induction	41

2.11.3	Raisonnement par abduction	42
2.11.4	Raisonneur sémantique	43
2.12	La sémantique appliquée aux SMA	45
2.12.1	Sémantique pour l'environnement	46
2.12.2	Sémantique pour les agents	47
2.13	Conclusion	48

2.1/ INTRODUCTION

Un système multi-agents peut être simplement décrit comme un système composé d'un ensemble d'agents, plus ou moins autonomes, évoluant et interagissant dans un environnement. Ces systèmes sont très souvent utilisés pour modéliser des comportements individuels ou plus largement des sociétés.

Il existe dans le domaine des systèmes multi-agents de nombreux champs d'études liés à la représentation des agents, à la représentation des environnements, ou à la définition même de types de simulations qui peuvent être développés. Depuis une dizaine d'années, avec le développement du web sémantique, de nouveaux modèles de représentation des connaissances ont fait leur apparition : les ontologies. Dans le domaine des systèmes multi-agents, le besoin de modéliser, soit les agents soit les environnements a donné le jour à de nouvelles approches intégrant ces modèles sémantiques.

Dans la suite de ce document, nous présentons tout d'abord un état de l'art du domaine de la simulation multi-agents. Cet état de l'art est articulé en deux grandes parties. La première partie présente des notions fondamentales (agent, environnement, simulation). La seconde partie présente les travaux liés à la représentation du comportement des agents (la planification et la sélection d'actions). Ensuite, nous présentons un état de l'art sur le domaine du web sémantique. Dans cette partie nous nous intéresserons tout particulièrement aux ontologies et aux mécanismes de raisonnement associés. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est un état de l'art sur l'ensemble des travaux qui associent les deux domaines, celui des systèmes multi-agents et celui du web sémantique. Dans cette partie nous identifierons les axes et les contraintes de ce type de combinaison.

2.2/ DÉFINITIONS ET FONDAMENTAUX SUR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

2.2.1/ DÉFINITION DE LA NOTION D'AGENT

L'une des définitions les plus célèbres de la notion d'agent a été formulée par [Russell and Norvig, 1995], ils considèrent un agent comme « *Tout ce qui peut être vu comme percevant son environnement à l'aide de capteurs et agissant sur cet environnement à l'aide d'effecteurs, de façon autonome* ». Cette définition très générale et volontairement minimaliste dans sa formulation (uniquement) a été étendue notamment par Ferber pour, en outre, accentuer l'importance de l'environnement (qui demeurerait rarement spécifié).

Pour [Ferber, 1995], « l'agent est une entité physique ou virtuelle :

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

»

2.2.2/ DÉFINITION D'UN SYSTÈME MULTI-AGENTS

La plupart des auteurs s'accordent généralement pour définir un Système Multi-Agents (SMA) comme un système composé d'agents qui communiquent et collaborent pour atteindre des objectifs spécifiques personnels ou collectifs. La communication implique l'existence d'un espace partagé support de cette communication. Cet espace est généralement qualifié d'Environnement.

Pour [Ferber, 1995, p. 15], « un SMA est un système composé des éléments suivants :

- un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique ;
- un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents ;
- un ensemble A d'agents qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lequel représente les entités actives du système ;
- un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux ;
- un ensemble d'opérations O_p permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer, et manipuler des objets de O ;¹
- des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

»

Un SMA est une société organisée d'agents dans laquelle un certain nombre de phénomènes peuvent émerger comme la résultante des interactions entre les agents².

1. Cela correspond, entre autres, à la faculté des agents de percevoir leur environnement, de manger, etc.

2. Cette résultante n'est d'ailleurs pas forcément prédictible.

Cette notion d'émergence est essentielle dans les SMA, car c'est l'une des propriétés majeures qui caractérisent leur capacité à modéliser des systèmes complexes.

2.3/ DÉFINITIONS ET FONDAMENTAUX SUR LA SIMULATION

Shannon [1977] définit la simulation comme « *le processus permettant de concevoir un modèle d'un système réel et de mener des expérimentations sur la base de ce modèle pour comprendre le comportement du système ou évaluer différentes stratégies pour son fonctionnement (dans les limites imposées par un critère ou un ensemble de critères)* »³.

L'objectif de la simulation est de faciliter la compréhension de la dynamique d'un système et tenter d'en prédire l'évolution. Satisfaire cet objectif nécessite l'élaboration d'un modèle du système à étudier, son exécution sur un ordinateur et l'analyse des résultats de cette exécution [Fishwick, 1997].

Le modèle de simulation désigne généralement l'ensemble des mécanismes qui gèrent les changements d'état du système. Il correspond à l'ensemble des lois, conditions ou contraintes qui définissent le comportement du système, ainsi que la manière dont ses composantes sont agrégées. L'exécution, quant à elle, doit faire évoluer dans le temps le modèle du système [Coquillard and Hill, 1997]. Pour y parvenir, elle est généralement associée à un ensemble d'outils qui constitue le simulateur.

2.4/ LA SIMULATION MULTI-AGENTS

La simulation multi-agents se réfère aux modèles microscopiques ou qualifiés individus-centrés (cf. [Amblard, 2003]) et fournit un outil permettant de modéliser et simuler la dynamique de populations composées d'individus en interaction.

Ce type de simulation assimile l'individu à un agent. La simulation multi-agents a été appliquée à un grand nombre de domaines tels que la robotique [Drogoul, 1993, Kitano et al., 1997], l'éthologie [Drogoul and Picault, 1999], l'écologie et la biologie, ou les sciences sociales [Conte et al., 1998, Gilbert and Troitzsch, 2005].

Ces techniques tentent explicitement de modéliser les comportements spécifiques des individus composant une population. La perspective adoptée se situe au niveau de l'individu ; la dynamique du système est issue des interactions entre les individus. La structure du système est considérée comme émergente de ces interactions.

De manière générale, on peut considérer que les techniques de simulation microscopique offrent un niveau de précision important dans les comportements simulés, mais au

3. la citation originelle est : *"the process of designing a model of a real system and conducting experiments with this model for the purpose either of understanding the behaviour of the system or of evaluating various strategies (within the limits imposed by a criterion or a set of criteria) for the operation of the system."*

détriment d'un coût computationnel plus élevé. En outre, elles nécessitent des données précises et nombreuses pour leur initialisation, ce qui les rend de fait difficilement applicables à des systèmes de grande échelle. De plus, nous verrons que ces travaux participent également à faciliter cette phase d'initialisation des simulations en exploitant des données existantes et décrites dans un format standard.

Le modèle proposé par Michel [2004] pour la modélisation et la simulation de systèmes multi-agents constitue la base pour la conception d'un simulateur multi-agents. Il adopte une approche multi-vues et distingue quatre aspects fondamentaux dans un modèle de simulation multi-agents :

- les **comportements** : cet aspect traite de la modélisation des processus de délibération des agents (leur « esprit ») ;
- l'**environnement** : ce point de vue vise à définir les différents objets physiques du monde simulé (l'environnement situé et le « corps » des agents) ainsi que la dynamique endogène de l'environnement ;
- l'**ordonnancement** : cet aspect concerne la modélisation de l'écoulement du temps et la définition de l'ordonnancement utilisé pour exécuter le comportement des agents ;
- les **interactions** : cette vue s'intéresse plus particulièrement à la modélisation du résultat des actions et des interactions à un instant donné.

La figure 2.1 illustre les relations entre ces quatre aspects fondamentaux d'une simulation multi-agents.

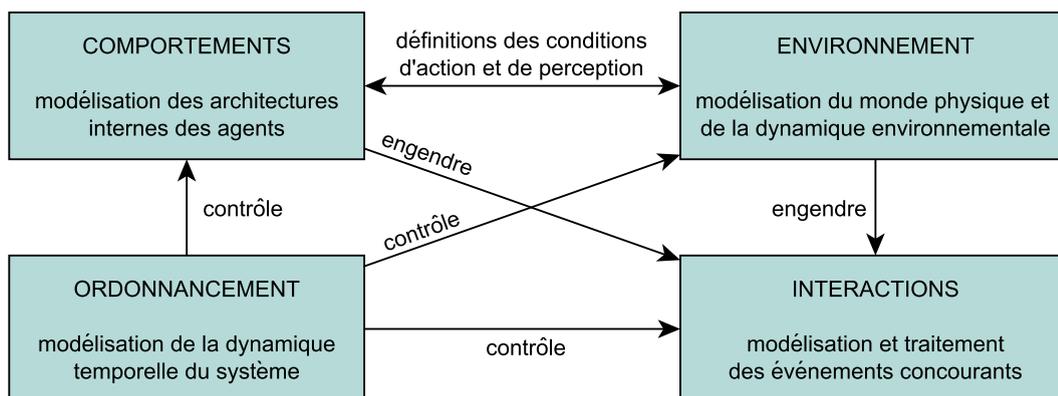


FIGURE 2.1 – Les quatre aspects d'un modèle de simulation multi-agents Michel [2004]

La modélisation et l'implantation de chacun de ces aspects et de leurs relations sont autant de points délicats qui soulèvent les problématiques suivantes :

- **respecter la contrainte de localité** : un agent est une entité dont les perceptions et les actions n'ont qu'une portée locale. Deux approches principales existent pour respecter cette contrainte :
 - l'approche discrète (centrée environnement) où la discrétisation de l'environnement sous forme de zones définit la granularité des perceptions et des actions des agents ;

- l'approche continue (centrée agent) où la portée de chaque perception et de chaque action fait l'objet d'un traitement particulier qui est fonction de la nature et des caractéristiques de l'agent concerné [Weyns et al., 2004] ;

Ces deux approches peuvent également être combinées.

- **respecter la contrainte d'intégrité environnementale** : un agent ne doit pas être en mesure de modifier directement les variables d'état de l'environnement ;
- **éviter de biaiser la simulation et gérer la simultanéité des actions** : pour éviter d'introduire des biais dans la simulation, il est nécessaire de disposer d'un modèle de gestion de l'action des agents et du temps, qui permet de modéliser la simultanéité de deux événements. Un modèle de simulation ne doit pas être lié à une implantation particulière [Zeigler et al., 2000]. L'ordre dans lequel les agents sont activés influe sur la dynamique du système et peut entraîner des biais de simulation.

De manière générale, pour prendre en considération ces différentes contraintes et concevoir des simulations multi-agents, nous adoptons le modèle Influence-Réaction [Ferber and Müller, 1996, Michel, 2001, 2006, Weyns and Holvoet, 2004].

L'action d'un agent au sein d'une simulation est généralement modélisée comme la transformation d'un état global [Ferber, 1995], c'est-à-dire la modification directe d'une des variables de l'environnement. Le cœur du modèle Influence-Réaction consiste à séparer l'action d'un agent de l'effet qu'elle produit. Dans ce modèle, un agent produit des influences sur son environnement et non des actions au sens vu précédemment. L'influence représente le désir d'un agent de vouloir modifier l'environnement d'une certaine façon. Le résultat effectif de cette tentative de modification de l'environnement par un agent ne peut être calculé sans connaître l'ensemble des influences produites au même instant. Ce modèle se base en fait sur la distinction claire entre deux dynamiques qui sont combinées dans un système multi-agents [Michel, 2006] :

1. la dynamique au niveau de l'agent qui produit des influences ;
2. la dynamique au niveau du système qui calcule la réaction de l'environnement compte tenu de l'ensemble des influences émises simultanément. Pour calculer cette réaction, les influences sont considérées en fonction des lois de l'univers [Ferber and Müller, 1996].

Adopter le modèle Influence-Réaction implique également de distinguer deux composantes de l'agent : son corps et son esprit ([Michel, 2004, p. 117-119]). Cette distinction est nécessaire afin de clairement séparer le modèle d'environnement du modèle du système. En effet, l'esprit de l'agent est dépendant du système cible alors que son corps est intégré au modèle d'environnement. Cette distinction esprit/corps correspond à la partition entre les variables utilisées par le système décisionnel de l'agent, sur lesquelles l'agent dispose d'un contrôle total, et les variables liées à la modélisation de sa partie physique contrôlées par l'environnement, sur lesquelles l'agent n'a aucun pouvoir. La figure 2.2 explicite cette distinction entre l'esprit et le corps d'un agent.

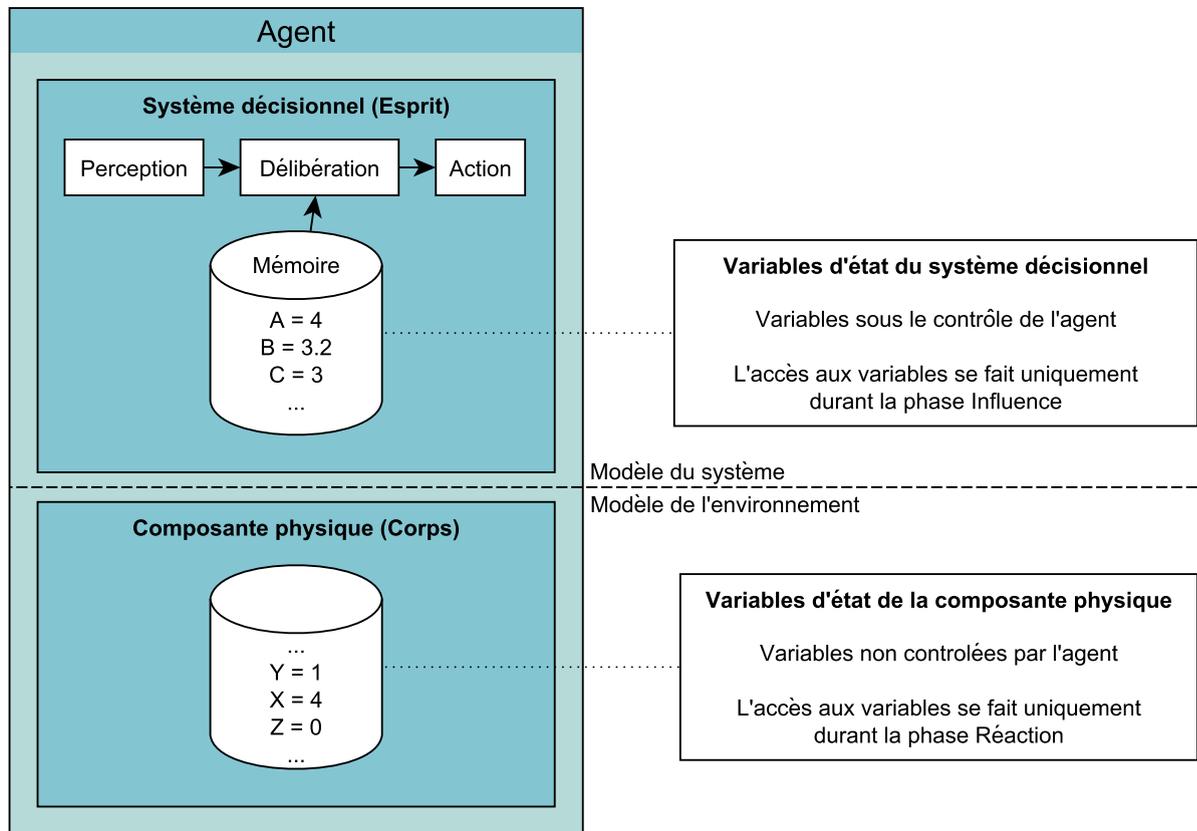


FIGURE 2.2 – Distinction entre l'esprit et le corps d'un agent dans le contexte du principe Influence/Réaction [Michel, 2004]

2.5/ LA SIMULATION EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

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 (production de films, de jeux vidéos, d'outils de réalité virtuelle) [Thalman 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.

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 ? [Braun et al., 2003, Goto et al., 2001, Seo et al., 2002]
2. **Animation et mouvements des individus** : Comment chaque individu peut-il se déplacer de manière réaliste au sein de l'univers en tenant compte des objets statiques et dynamiques ? Comment les individus formant un groupe peuvent-ils se déplacer de manière coordonnée ? [Anderson et al., 2003, Ashida et al., 2001, Braun et al., 2005, Buisson et al., 2013, Goldenstein et al., 2001, Lamarche and Donikian, 2004, Van den Berg et al., 2008]
3. **Génération de comportements individuels et collectifs** : Comment une population peut-elle réagir aux changements pouvant survenir dans son environnement ? Comment chaque individu peut-il interagir avec ses voisins, et avoir une activité sociale avec eux ? [Bouvier et al., 1997, Brogan and Hodgins, 1997, Galland et al., 2009, Hodgins and Brogan, 1994, Musse and Thalmann, 2001, Niederberger and Gross, 2003, Razavi et al., 2011, Reynolds, 1987, 1999, Tu and Terzopoulos, 1994, Ulicny and Thalmann, 2002]
4. **Modélisation de l'environnement virtuel** : Quels aspects de l'univers (ou de l'environnement virtuel) doivent être modélisés ? Quel modèle peut supporter efficacement l'ensemble des comportements des individus ? Comment générer efficacement les perceptions de chaque individu dans l'univers virtuel ? Comment appliquer correctement les actions des individus tout en respectant l'intégrité de l'environnement ? [Bayazit et al., 2002, Behe et al., 2014a, Demange et al., 2010, Farenc et al., 1999b, Galland et al., 2009, Gaud, 2007, Kallmann et al., 2003, Loscos et al., 2003, Paiva et al., 2005]
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., 1999a, 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, Courty and Musse, 2005, Heras et al., 2005, Loscos et al., 2001, Pettré et al., 2006, Tecchia et al., 2002, Wand and Strasser, 2002]

Dans les travaux de recherche que nous avons menés dans le cadre de cette thèse nous sommes plus particulièrement intéressés au point 3, génération de comportements individuels et collectifs et au point 4, modélisation de l'environnement virtuel. Nous démontrerons dans la suite que la génération du comportement dépend très fortement de la modélisation de l'environnement virtuel. Nous montrerons qu'au-delà d'une

simple perception géométrique de l'environnement, les processus de représentation du comportement au sein d'un système multi-agents peuvent être simplifiés en ajoutant de la sémantique sur l'environnement. Cette sémantique sera la base d'une définition simplifiée, mais efficace du comportement des agents sous la forme de règles logiques. Notre volonté de représenter l'environnement sous la forme d'une ontologie modélisant les contraintes métiers du bâtiment nous permettra de donner des réponses aux questions identifiées par Thalmann et al. [2009] sur la modélisation de l'environnement virtuel.

2.6/ COMPORTEMENT D'AGENT : PLANIFICATION ET SÉLECTION D'ACTION

Après avoir défini, dans la section précédente, les grands principes du domaine de la simulation multi-agents, nous concentrons notre étude sur le comportement des agents, principalement sur les étapes de planification et de sélection d'actions puis sur la modélisation de l'environnement. La planification fait référence à une forme d'organisation dans le temps de la réalisation d'objectifs. Dans notre cas, ces objectifs sont atteints lorsque les agents sélectionnent les actions adéquates à la satisfaction de l'objectif. Dans la suite de cette section, nous présenterons tout d'abord la notion de sélection d'action. Puis, nous présenterons la notion de planification. Enfin, nous évoquerons l'impact de la représentation de l'environnement sur la planification.

2.6.1/ SÉLECTION D'ACTION

La capacité humaine à sélectionner une action à réaliser plutôt qu'une autre est complexe. Il est possible de séparer les processus décisionnels en deux groupes distincts. Cette séparation est réalisée selon que le processus nécessite d'être conscient ou pas. Le premier groupe réunit les systèmes de processus dits *réactifs* et le deuxième les systèmes de processus dits *cognitifs*.

Systemes réactifs

Ces processus préétablis ne font pas directement intervenir de processus conscient. Il s'agit de relier la perception à l'action sans raisonnement nécessitant une projection dans le temps. Cette première catégorie de comportements de sélection d'action correspond à des comportements *réflexes*. Un réflexe est un comportement en réaction à une situation particulière. Il n'y a pas de mécanisme décisionnel, il s'agit d'un automatisme. Ces comportements peuvent avoir été appris, mais sont devenus tellement nécessaires et/ou répétitifs qu'il n'y a plus de réflexion pour les produire. Pour mettre en pratique ce comportement, plusieurs systèmes ont été proposés.

Les systèmes de *stimuli-réponse* correspondent à la première génération de modèles

permettant de formaliser des comportements réactifs. Ils sont issus de travaux en éthologie [Brooks, 1995, Wilhelms and Skinner, 1989] pour lesquels le comportement est considéré comme la réponse à une série d'interactions directes avec l'environnement. Cette approche comporte deux points noirs. Le premier est que ce type de système est apparenté à une boîte noire. On sait que c'est une réponse attendue à un stimulus, mais on ne sait pas pourquoi. De plus, pour chaque modification du comportement, il faut refaire tout l'apprentissage. Le deuxième problème est la difficulté de se retrouver face à des situations complexes, nécessitant de définir beaucoup de cas. Le point positif est le fait que l'apprentissage est aisé dans les cas pertinents.

Les systèmes à *base de règles* permettent de mettre en pratique des règles associant une condition à une action. Il est possible de trouver des systèmes à base de règles de niveau identique [Laird, 2001, Laird et al., 1987] et des arbres de règles [Blumberg, 1996]. Les systèmes à base de règles pèchent par la difficulté de gérer la concurrence des règles et par l'impossibilité d'exprimer des chaînages d'actions dans le cas de règles de niveau identique. Par contre, ils sont très simples d'interprétation et d'extension et ils permettent de produire la connaissance d'un comportement global de manière logique.

Les systèmes à *automates* proposent de décrire le comportement sous la forme d'un enchaînement conditionnel d'actions. Un état de l'automate correspond à une tâche unitaire simple à son niveau de modélisation, mais qui peut être subdivisée ou regroupée avec d'autres tâches à d'autres niveaux de modélisation. Les automates à pile [Noser and Thalmann, 1998] permettent de mettre en pratique le processus de pile d'exécution et traitent les comportements de façon séquentielle. Les automates parallèles [Badler et al., 1995] proposent de décrire des comportements complexes comme étant le résultat de l'exécution de plusieurs automates au comportement plus simple. L'intérêt des systèmes à automates est la facilité de décrire des processus nécessitant un enchaînement d'actions liées par des conditions posées. Par contre, il est difficile de produire des comportements de même complexité afin de rester cohérent lors de leur mise en commun.

La table 2.1 propose un récapitulatif des systèmes de prise de décision réactifs présentés. Les colonnes représentent :

1. la connaissance globale du comportement
2. la facilité d'interprétation / d'extension
3. la possibilité de modéliser la cohérence temporelle d'une suite d'actions

Systèmes réactifs	1	2	3
stimuli-réponse	+	-	-
à base de règles	+	+	-
à automates	-	-	+

TABLE 2.1 – Comparatif des systèmes de sélection d'actions réactifs

Systemes cognitifs

Les modèles de *calcul situationnel*, proposés par McCarthy and Hayes [1968], permettent de décrire des mondes complexes et les interactions qui peuvent se produire avec ce monde. Cette formalisation consiste à calculer de potentiels états du monde en fonction de la situation courante. Elle est exprimée par six concepts :

- les situations : l'expression de l'état du monde à un instant donné ;
- les fluents : une propriété modifiable de l'environnement ;
- les causalités : les liens de cause à effet ;
- les actions : elles permettent de modifier une situation. Elles sont exprimées par une précondition (état attendu du monde) et un effet (transformation de la situation) ;
- les stratégies : il s'agit d'étapes de raisonnement prédéfinies ;
- la connaissance : une entité connaît un état du monde ou non ;

Le problème principal de cette approche est la difficulté d'exprimer les éléments de l'environnement qui ne changent pas lors d'une transformation. Scherl and Levesque [2003] se sont attachés à ce problème en exprimant le problème des fenêtres. Tout ce qui n'est pas expressément énoncé par l'effet d'une action reste inchangé. De plus, la concurrence des actions est un problème lorsque deux entités effectuent des actions qui influent sur les états du monde utilisés par l'une ou l'autre. Cependant, l'atout principal de ce modèle est la possibilité de modéliser des systèmes très complexes.

Le formalisme *STRIPS*, proposé par Fikes and Nilsson [1972], est un sous-ensemble simplifié du calcul situationnel. Les effets des actions sont modélisés par deux listes : les faits ajoutés et les faits retirés. Le but est traduit par un ensemble de faits pour une situation donnée. La planification consiste à trouver la chaîne d'actions permettant de faire correspondre la situation au but. Bien qu'il pose toujours un problème de concurrence, ce modèle est moins expressif que le calcul situationnel, ce qui apporte des temps de planification réduits, donc une réponse plus rapide.

La planification *HTN*, proposée par Erol et al. [1994], n'utilise plus un modèle plat de faits pour décrire le monde. Il s'agit de proposer une hiérarchie de faits en s'appuyant sur trois concepts. Les *tâches* sont l'expression des buts. Les *méthodes* décrivent une suite d'actions préconditionnées permettant de remplir une tâche. Les *actions* reprennent la définition proposée par le calcul situationnel avec des préconditions et des effets. La hiérarchie a pour objectif la réalisation d'une tâche (en haut de la hiérarchie). La tâche est décomposée en plusieurs méthodes. Cette décomposition génère un arbre. La base de l'arbre représente une situation. Un chemin de la base vers le sommet représente une planification permettant d'effectuer la tâche et donc d'atteindre le but. L'intérêt de cette proposition est la possibilité d'intégrer des connaissances métiers avec les méthodes.

Le mode de raisonnement *BDI*, proposé par Bratman [1987], est inspiré du raisonnement humain. BDI, pour Beliefs Desire Intention, est basé sur trois concepts. Les *croyances* sont les connaissances générales de l'entité décisionnaire. Les *désirs* sont les objec-

tifs. Les *intentions* regroupent l'ensemble des plans que l'agent choisit pour réaliser ses désirs. Dès la conception, l'agent dispose de plusieurs plans d'action imaginés et implémentés par le concepteur de simulation. Pour satisfaire un désir, s'il y a plusieurs plans d'actions possibles, alors un mécanisme de sélection est utilisé. Cette approche nécessite de produire des plans d'actions complets au préalable, ce qui nécessite des connaissances spécifiques. Par contre, il n'y a pas de raisonnement puisque tout est déjà prévu, donc cette solution propose un temps de réponse très faible.

Le tableau 2.2 propose un récapitulatif de systèmes de prise de décision réactifs. Les colonnes représentent :

1. la réactivité au changement de l'environnement ;
2. la capacité à satisfaire un but ;
3. la mode d'expression d'un but ;
4. la connaissance opératoire.

Systèmes cognitifs	1	2	3	4
calcul situationnel	-	+	-	-
STRIPS	-	+	-	-
HTN	-	-	+	+
BDI	+	-	+	+

TABLE 2.2 – Comparatif des systèmes cognitifs de sélection d'actions

2.6.2/ PLANIFICATION

La planification est l'organisation dans le temps de la réalisation d'objectifs dans un contexte précis. Ce contexte correspond à l'environnement, aux capacités et au savoir de l'entité qui doit planifier. La caractéristique principale de la planification est la dimension de chronologie même s'il est possible de planifier sans la notion de *temps* ou de *durée*. Des événements ou actions peuvent s'enchaîner les uns derrière les autres sans pour autant être contraints par une composante de temps. Il existe plusieurs types de planifications suivant les actions à planifier. La planification de chemins consiste à trouver un enchaînement de déplacements permettant de se rendre d'un point A à un point B. La planification de mouvements permet de produire une suite logique d'interactions avec l'environnement. La planification de perceptions propose de percevoir et comprendre l'environnement. Enfin, la planification de navigation regroupe les trois autres types de planifications.

Plusieurs approches de la planification sont possibles. La première consiste à planifier sur une situation spécifique à un domaine / un cas particulier. Elle est pertinente dans un univers spécifique, mais coûteuse en ressources et en développement, car à chaque problème doit être adressée une solution. La deuxième propose de rester en dehors de

toute application concrète. Elle est plus difficile à mettre en pratique, car elle doit rester abstraite, mais cette approche saura s'adapter aux nouvelles situations.

La représentation classique de la planification se base sur les concepts suivants. Les *états* sont des atomes logiques vrais ou faux dans un état global de l'environnement. Les *actions* sont des opérateurs permettant de modifier les valeurs des états. Les actions ont des préconditions et des effets. Les préconditions sont l'expression des éléments nécessaires à l'exécution de l'action. Les effets sont les transformations engendrées par les actions. Le *domaine* correspond à l'ensemble des actions pouvant s'appliquer au monde. Un *problème* s'exprime avec un état initial et un objectif à réaliser à partir de cet état. Un *plan* est une solution pour un problème qui consiste en une séquence d'actions décrivant un chemin de l'état initial du problème à l'objectif.

Planification hiérarchique

La planification hiérarchique [Nau et al., 2003] est basée sur les mêmes concepts que la planification classique (état, action, problème, etc.). Cependant, il ne s'agit pas d'atteindre une situation composée d'un ensemble d'états, mais de résoudre un ensemble de tâches. La planification hiérarchique apporte le concept de *méthodes* permettant de découper des tâches en sous-tâches. Ce découpage continue jusqu'à arriver à des tâches indivisibles, qui sont en général solvables directement par les actions.

Planification sous hypothèses

La planification sous hypothèses [Pellier and Fiorino, 2005] consiste à effectuer des hypothèses permettant d'atteindre l'objectif. Une hypothèse est un plan qui mène à l'objectif et qui peut être réalisé selon certaines conditions non existantes. Ces hypothèses correspondent aux manques de la situation actuelle pour atteindre la situation visée. Ce type de planification correspond au fait de proposer des plans d'action tout en minimisant la quantité d'hypothèses prises en compte, au détriment des états effectifs.

2.6.3/ REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT ET PLANIFICATION

Dans la plupart des cas, l'environnement est modélisé par de simples géométries sur trois dimensions. Les géométries complètes peuvent être exprimées de façon complexe. En ce qui concerne les éléments nécessaires à la planification, les informations sont filtrées afin d'effectuer les calculs sur un jeu plus restreint d'informations. Ce filtrage permet de gagner du temps sur les tâches de calcul de planification. Au final, les informations restantes correspondent à une projection de l'environnement en 2D, comportant les éventuels obstacles aux déplacements de l'agent.

La représentation restante correspond à l'espace navigable. Dans cet espace, les obstacles sont la plupart du temps modélisés par des cylindres englobants afin de faciliter la détection de collisions [Li and Huang, 2004]. Il reste au final l'espace libre. Il existe deux familles de représentation de l'espace libre, toutes deux basées sur les graphes.

La *décomposition en cellules* propose de découper l'espace libre en de multiples zones. Ces zones peuvent être décidées de manière approximative ou exacte. Le *découpage approximatif* correspond à une sectorisation de l'environnement de manière régulière en fonction de figures, le plus souvent carrées [Chestnutt et al., 2003]. Une information est associée à chaque cellule permettant de savoir si il est possible de pratiquer la zone pour s'y déplacer. À partir de ce marquage, un graphe d'accessibilité est défini et correspond aux parcours possibles dans l'environnement. Ce système est rapide, car le découpage est en général uniforme. Néanmoins, en raison de la géométrie fixe des figures de découpage, il est possible de perdre de l'espace utilisable. Le *découpage exact* de l'espace libre propose des géométries plus simples, mais il est nécessaire de contrebalancer la précision et la taille mémoire.

Les *cartes de cheminement* proposent la définition d'un graphe de position dans l'environnement dans lequel l'agent évolue. Ces positions particulières sont les nœuds du graphe et les chemins entre ces positions sont les arcs du graphe. L'élaboration de *cartes de cheminement déterministes* repose sur des sommets définis logiquement. Les arcs sont ajoutés entre les sommets si un déplacement en ligne droite existe. Le problème de ce type de carte est le nombre de possibilités de cheminement en cas de zones très ouvertes. Par contre, si l'environnement est fortement divisé, il est possible de considérer seulement un point de passage par zone. Les *cartes de cheminement probabiliste* [Pétré et al., 2003] proposent de placer des points de passage aléatoirement dans l'espace libre. Comme pour les cartes déterministes, les nœuds sont reliés si les points de passage peuvent être reliés en ligne droite. Pour les deux types de cartes, il faut trouver un compromis entre précision du déplacement et temps de calcul. En effet, si beaucoup de points de passage sont définis, le calcul des chemins possibles sera long. Au contraire, si peu de points de passage sont définis, des zones peuvent rester isolées.

Qu'il s'agisse de la décomposition de cellules ou des cartes de cheminement, on obtient un graphe représentant toutes les solutions possibles de déplacement. Avec ce graphe, la planification de chemins consiste à utiliser des algorithmes de parcours de graphe. Le parcours du graphe à la recherche d'un chemin est la plupart du temps résolu avec des algorithmes de plus court chemin. Les arcs sont pondérés en fonction de l'effort à fournir pour relier un sommet à l'autre. Un chemin complet est associé à la somme des pondérations des arcs et la somme la plus basse correspond à une solution à privilégier.

Nous venons de voir que l'environnement peut être décomposé en zones représentant des espaces de vie. Il existe deux approches pour fixer les points de passage entre ces espaces de vie. L'approche probabiliste positionne aléatoirement les points de passage. Cette approche est rapide à mettre en place, mais implique des temps de calcul plus longs, car elle n'est pas optimisée pour des cas particuliers nécessitant des connaissances expertes sur le bâtiment. L'approche déterministe, où des connaissances de l'environnement sont nécessaires pour positionner les points de passage, est plus longue à mettre en place, mais permet d'être plus fidèle à la réalité de l'environnement et plus

rapide à l'exécution. Notre approche introduit une nouvelle vision de la représentation de l'environnement. Notre souhait est de partir d'une maquette numérique sémantiquement enrichie du bâtiment réel, fournie par un architecte, à partir d'un processus de construction standard d'un bâtiment. Cela nous permet d'identifier dynamiquement dans l'environnement les zones et les points de passage logiques adaptés à la connaissance experte du domaine. Notre approche peut être classée comme une approche déterministe avec les avantages de rapidité de mise en place des méthodes probabilistes.

2.7/ 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, etc.) et sur l'environnement (lieux particuliers, lois de l'univers, etc.). Les environnements informés [Farenc et al., 1999b, Paiva et al., 2005] sont des modèles de l'environnement intégrant tout ou partie de la connaissance sur le domaine de l'application simulée. Thalmann and Musse [2007] considèrent que les environnements informés basés sur les ontologies permettent de créer des comportements plus complexes et plus réalistes dans les systèmes multi-agents.

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 [Barros et al., 2004, Braun et al., 2003, Musse and Thalmann, 2001], 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 [Behe et al., 2014b, Thalmann and Musse, 2007] :

1. enrichir 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 ;

3. autoriser la création semi-automatique d'objets géométriques constituant l'univers simulé.

Ces modèles informés sont portés par les « *modèles d'information urbaines* » (UIM, "*Urban Information Model*"). Les définitions des modèles d'information urbaines sont variées et il n'y a pas de définition bien établie. Coors [2003] définit le Urban Data Model (UDM) comme un modèle de données urbain qui représente la géométrie d'une surface ou d'un volume par un ensemble de faces planes et convexes. On voit donc ici l'importance de la géométrie dans la modélisation urbaine, mais il n'est pas fait état de l'information sémantique liée au modèle.

Ainsi sont définis les UIM, considérés comme une extension des BIM [Hamilton et al., 2005]. Ces travaux soulignent les difficultés liées à la mise en place de tels systèmes, notamment sur les problèmes de l'hétérogénéité ou de la gestion de l'espace et du temps. Plusieurs thèses de doctorat ont été réalisées ces dernières années dans ce domaine avec le même objectif [Koussa, 2011, Ramos, 2003].

Notre cadre de travail se focalise sur la modélisation de l'entité bâtiment. En effet, comme nous venons de le voir, un bâtiment ne se représente pas seulement à l'aide des informations géométriques de sa structure 3D. Pour les besoins de la modélisation de systèmes multi-agents par exemple, il est nécessaire d'ajouter à la structure 3D du bâtiment de nouveaux éléments. Ces éléments peuvent être de différentes sortes : le découpage des zones de vie, la description des objets présents, etc. Il s'agit d'ajouter des informations sémantiques à l'environnement. Parfois, cette sémantisation permet de définir qu'une sous-structure 3D de l'environnement correspond à une table ou une porte. Dans notre cas, ces informations nous permettront de faciliter les processus de planification et de sélection d'actions. Pour réaliser cet ajout d'informations dans l'environnement, il faut s'attacher à la manipulation d'outils sémantiques. La section suivante présente le domaine du web sémantique.

2.8/ DÉFINITIONS ET FONDAMENTAUX SUR LE WEB SÉMANTIQUE

Le web sémantique est un domaine très récent qui vise à favoriser l'émergence de nouvelles connaissances à partir de connaissance existantes et principalement celles trouvées sur l'Internet. Le web sémantique est apparu avec le besoin d'étendre les notions de l'informatique décisionnelle (business intelligence) à l'Internet, système d'information distribué global. Dans la suite de cette section, nous débuterons par une présentation du World Wide Web. Ensuite, nous donnerons une définition du domaine du web sémantique. Enfin, nous détaillerons les technologies et les architectures du domaine du web sémantique et plus particulièrement les langages utilisés pour construire des ontologies.

2.8.1/ LE WORLD WIDE WEB

Le World Wide Web (WWW), que l'on peut traduire par *la toile (d'araignée) mondiale* et communément appelée Web, est un système hypertexte public fonctionnant sur Internet. Le Web permet de consulter, avec un navigateur, des pages accessibles sur des sites. Internet et le Web sont des notions souvent confondues. Internet désigne le système d'interconnexion de machines sur un réseau informatique mondial, utilisant un ensemble standardisé de protocoles de transfert de données. Le Web n'est qu'une des applications du réseau global Internet, comme le sont, entre autres, la messagerie instantanée, le partage de fichiers en pair à pair ou le courrier électronique. L'image de la toile d'araignée vient de l'interconnexion des pages entre elles à l'aide des liens hypertextes.

Depuis son invention par Tim Berners-Lee et Robert Cailliau plusieurs années après Internet, le Web est en perpétuelle évolution. On distingue actuellement 3 niveaux au Web, qui, malgré une désignation commerciale, correspondent à des paliers techniques et scientifiques dans l'évolution globale du Web.

Le Web 1.0 tel que Berners-Lee l'avait imaginé se devait d'être un espace collaboratif de diffusion de médias, dans lequel tous les acteurs pouvaient être spectateurs et acteurs. Mais il s'est transformé en un espace global de diffusion d'informations plutôt que de collaboration. C'est dans cet esprit que le Web 1.0 a évolué. Ce niveau a donc vu apparaître de nombreuses fermes de liens et autres annuaires de pages et plus tard, les moteurs de recherche. Ce niveau s'est construit de façon unidirectionnelle. Seuls les *webmestres* sont à l'origine des informations mises en ligne à destination des *internautes* (les personnes qui parcourent le Web).

Dans le Web 2.0, les usagers entrent dans un mode actif : au fur et à mesure de leur navigation, les utilisateurs ajoutent du contenu au travers de liens hypertextes et autres tags, annotations ou commentaires. Le contenu est généré par les utilisateurs grâce à l'émergence des blogs, des wikis, des journaux citoyens. Wikipédia, Dailymotion, YouTube, Flickr, Delicious, etc., et tous les nouveaux médias sont de véritables espaces de discussions, d'expression, d'échanges et de débats. Les utilisateurs deviennent alors la source d'informations et de création, le concept d'intelligence collective émerge. La production de contenu se fait par les internautes et l'hébergement par des entreprises, voire les internautes eux-mêmes. Les données sont partagées, l'internaute est acteur et fournit ses propres contenus au travers des réseaux sociaux (comme Facebook, MySpace), des blogs, du contenu partagé. S'il le souhaite, grâce au principe de syndication (flux RSS), l'internaute peut se tenir au courant en temps réel des dernières parutions sur les thèmes qui l'intéressent.

Le terme Web 3.0 est apparu pour la première fois en 2006 dans un article du blog de Zeldman [2006]. Ce Web a pour ambition de regrouper tous les savoir-faire en matière de représentation de la connaissance. Dans ce Web 3.0, on retrouve l'Internet classique, l'Internet mobile et l'Internet des objets. Internet des objets représente une extension de

l'Internet dans le monde réel grâce à un système d'étiquettes associant des URL aux lieux ou aux objets lisibles par des dispositifs mobiles [Bastide, 2008]. Dans ce cadre, le logiciel se libère des contraintes physiques des ordinateurs personnels. De nombreuses applications sont désormais directement accessibles en ligne. Au-delà de cet aspect, Internet se transforme peu à peu en un véritable écosystème informationnel dans lequel l'utilisateur sera immergé. Dans ce nouvel environnement, tous les sites sont liés d'une façon ou d'une autre. De plus, les sites sont envahis de publicités contextuelles en rapport avec le document consulté. Avec le Web sémantique, qui se met en place grâce à l'impulsion du W3C (World Wide Web Consortium), se dessine un Web intuitif, une nouvelle toile d'informations, compatible avec tous les objets reliés au réseau global sans contraintes techniques comme les systèmes d'exploitation ou le rendu visuel des pages sur le Web. Avec le web sémantique, la demande appelle un résultat cohérent, méticuleusement assemblé. Le système travaille pour l'utilisateur : il classe tous les commentaires et trouve, par déduction, une correspondance adéquate. Des technologies sont mises en place pour permettre de comprendre l'information et adapter les réponses fournies dans un contexte plus riche et plus finement proposé. Une meilleure connaissance de l'utilisateur permettra d'obtenir des réponses plus ajustées à son profil, voire proposera d'autres résultats potentiellement acceptables par l'utilisateur.

2.8.2/ DÉFINITIONS

Le web sémantique est défini différemment en fonction de la personne ou de l'expert qui en parle. Bien que les définitions diffèrent dans les mots, toutes se recoupent à des niveaux plus ou moins éloignés.

Les origines du concept de *modèle de réseau sémantique* remontent aux années 1960 avec les chercheurs Allan M. Collins (professeur en sciences cognitives), Ross Quillian (linguiste) et Elizabeth F. Loftus (professeur en psychologie). Ce concept, exposé dans diverses publications [Collins and Quillian, 1969, Quillian, 1967], est proposé comme une manière de représenter des connaissances structurées. Ce modèle étend le réseau de liens hypertextes des pages Web lisibles humainement de deux façons. La première consiste à insérer des métadonnées lisibles par la machine sur les pages. La deuxième définit la manière dont ces pages sont liées les unes aux autres, permettant à des entités intelligentes virtuelles d'effectuer des tâches pour le compte d'utilisateurs.

Selon [Working Group, 2009], le web sémantique est un groupe de méthodes et de technologies qui permettent aux machines de comprendre la *signification* (ou sémantique) des informations contenues sur le World Wide Web. Comme déjà indiqué, l'expression *web sémantique* a été inventée par Berners-Lee et al. [2001], l'inventeur du World Wide Web et actuel directeur du World Wide Web Consortium (W3C). Ainsi, on peut considérer que la définition du web sémantique donnée par le W3C est la définition la plus juste.

Le web sémantique est un donc un web que les machines sont aptes à consulter. Ac-

tuellement, le contenu du web est destiné à un usage par les humains et les données sont donc représentées sous forme de langage naturel. Les ressources disponibles s'adressent donc à l'humain et non la machine, cette dernière se contentant simplement d'afficher l'information.

Le web sémantique a donc pour vocation de changer la donne et de rendre les informations *compréhensibles* par les machines. Pour ce faire, le web sémantique change la définition du mot ressource sur le web. Ce terme désigne aujourd'hui un document quelconque publié sur le web, en langage naturel et donc destiné à des êtres humains. Le but est de désigner dans le futur une ressource par des concepts relatifs aux machines, par exemple des classes, des propriétés, etc.

Pour ce faire, des métadonnées sont introduites dans les pages web afin de permettre aux machines de les interpréter. Des métadonnées sont des données sur les données : par exemple, la citation d'une personne. Un être humain saura que l'on parle d'une personne, car le contexte de la phrase s'y prête ou tout simplement, car son nom commence par une majuscule. La méta-donnée associée ici au nom sera qu'il s'agit d'une personne. Ainsi, si la machine doit effectuer une recherche sur cette personne, elle *saura* qu'il s'agit d'une personne et cherchera en conséquence. Les métadonnées peuvent également servir à établir des relations entre diverses entités. En reprenant l'exemple de la personne, on peut par exemple également signaler que la personne en question est l'auteur du livre que l'on cite. Ainsi, si l'on demande à la machine de trouver des informations sur le livre, elle saura que cet individu en est l'auteur et qu'il s'agit d'une personne, elle sera donc capable de faire le lien entre l'ouvrage et l'auteur et saura où chercher les informations sur l'auteur. Le but principal du web sémantique est donc d'obtenir un web où chaque information pourra être liée à d'autres et où une machine pourra également rechercher des informations. Tim Berners-Lee appelle d'ailleurs le web sémantique le Giant Global Graph [Berners-Lee, 2007], renvoyant ici bien à l'idée d'informations toutes liées entre elles, par opposition au World Wide Web.

La notion de métadonnées servant à mettre en lien plusieurs données est apparue dès 1994 lors de la conférence sur le WWW à Genève [Berners-Lee, 1994]. Cette notion à l'époque se limitait uniquement à mettre en relation plusieurs informations et ne disposait pas encore de toutes les technologies actuelles permettant de pousser le concept à son paroxysme. Des notions de web sémantique sont également déjà présentes actuellement, par exemple dans les blogs via les tags. L'auteur associe une suite de mots clés à un article, ceux-ci pouvant faire le lien avec d'autres articles ayant un rapport avec un tag donné, on peut ainsi commencer à établir une sorte de graphe qui représentera des liens entre divers sujets. Le graphe ainsi réalisable est donc beaucoup plus vaste et ne se limite pas à un graphe constitué sur un seul blog. Ce système de tags n'est qu'une notion de web sémantique dans la mesure où il permet effectivement de faire le lien entre des informations, mais en revanche ne couvre pas le fait de rendre ces informations accessibles pour des machines.

2.8.3/ TECHNOLOGIES ET ARCHITECTURE

Le web sémantique s'appuie sur les technologies du web actuel en plus de technologies qui lui sont propres. Concernant donc les technologies du web, il s'agit du HTTP, des URI et du XML.

HTTP, pour Hyper Text Transfer Protocol, est un protocole de communication client-serveur inventé par Tim Berners-Lee comme méthode de transfert d'informations pour créer le World Wide Web. Pour utiliser le HTTP, il faut un client HTTP pour lire l'information et un serveur HTTP pour délivrer l'information. Les clients HTTP les plus connus sont les navigateurs Web permettant à un utilisateur d'accéder à un serveur contenant les données.

L'architecture du web sémantique est généralement présentée par la figure 2.3.

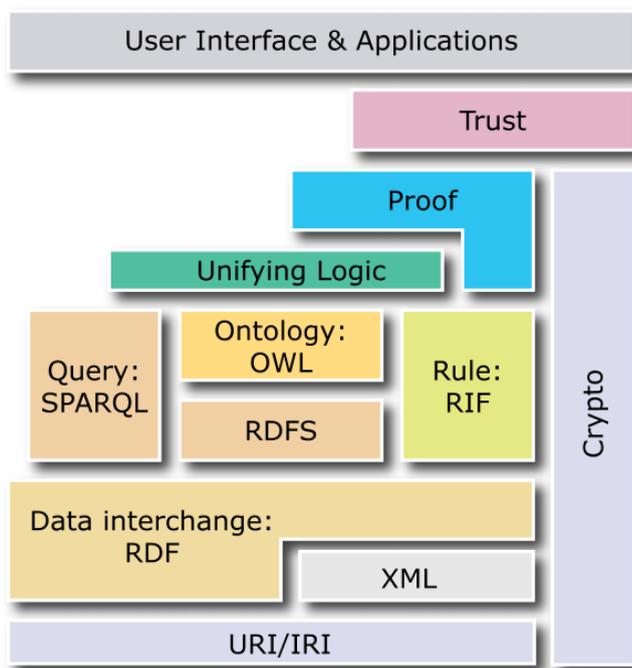


FIGURE 2.3 – Pile du web sémantique [Working Group, 2012b]

Les couches les plus basses assurent l'interopérabilité syntaxique : la notion d'**URI** (Uniform Resource Identifier) fournit un adressage standard universel permettant d'identifier les ressources. Rappelons que l'URL (Uniform Resource Locator), comme l'URI, est une chaîne de caractères utilisée pour identifier des ressources (physiques) par leur localisation.

XML (eXtensible Meta Language) est un langage qui fournit une syntaxe pour décrire la structure du document, créer et manipuler des instances des documents. Il utilise l'espace de nommage (namespace) afin d'identifier les balises utilisées dans le document XML. Le schéma XML permet de définir les vocabulaires pour des documents XML va-

lides. Cependant, XML n'impose aucune contrainte sémantique à la signification de ces documents. L'interopérabilité syntaxique n'est pas suffisante pour qu'un logiciel puisse comprendre le contenu des données et les manipuler d'une manière significative.

Les couches **RDF** (Resource Description Framework) et **RDF Schema** (RDFS) sont considérées comme les premières fondations de l'interopérabilité sémantique [Dan Brickley, 2004]. Elles permettent de décrire les taxonomies des concepts et des liens entre ces concepts. RDF fournit un moyen d'insérer la sémantique dans un document. L'information est conservée principalement sous forme de déclarations RDF. Le schéma RDF (RDFS) décrit les hiérarchies des concepts et leurs relations, les propriétés et les restrictions domaine/co domaine pour les propriétés. Par abus de langage, il est commun de dire que c'est un *langage* d'assertion et d'annotation. RDF est un outil fondamental du web sémantique : il permet de définir des métadonnées afin de préciser les caractéristiques d'une information (les informations sur les informations). Il établit des relations entre ressources. Il est donc particulièrement adapté aux annotations associées aux ressources du Web. RDFS (RDF Schéma) définit un vocabulaire utilisé dans les modèles de données RDF. Un document RDFS précise également les propriétés des différents objets modélisés, les domaines de valeurs possibles et décrit les relations entre ces différents objets.

La couche suivante est **OWL** (Web Ontology Language - [Working Group, 2012a]), langage de formalisation d'ontologies. Elle décrit des sources d'information hétérogènes, distribuées et semi-structurées en définissant les consensus du domaine commun et partagées par plusieurs personnes et communautés (la signification de la connaissance). OWL permet d'étendre le vocabulaire et les propriétés de RDF. Il offre une grande souplesse dans la définition des relations. Par exemple, OWL permet de préciser qu'une propriété est l'inverse de l'autre, ce qui permet d'inférer des relations non explicites. Dans le cas de l'assertion suivante : « A est le père de B », RDF ne sait pas spécifier que B est le fils de A. C'est possible avec OWL. Ceci paraît trivial, mais en informatique, il faut établir ce genre de raisonnement de base afin d'avoir des informations traitées *intelligemment*. OWL permet aussi de construire des relations de disjonctions ou de faire des unions. Les ontologies aident la machine et l'humain à communiquer avec concision en utilisant l'échange sémantique plutôt que syntaxique.

Au même niveau, on trouve la couche du langage **SPARQL** [Working Group, 2013]. Ce langage est désigné par le W3C comme le standard pour l'interrogation des graphes RDF et OWL. SPARQL est au web sémantique ce que le SQL est aux bases de données. SPARQL se base directement sur les métadonnées RDF. Cela permet aux machines ou aux humains d'interroger des bases de données sur le Web, sans forcément en connaître le schéma au préalable, ce qui permet un accès aux données sans intermédiaire.

La couche de règles a pour objectif de normaliser la représentation des règles RDF. Elle comporte deux langages de règles : **SWRL** (Semantic Web Rule Language) et **RIF** (Rule Interchange Format). SWRL est une extension d'OWL. RIF ne repose pas directement

sur RDF, mais sur XML et il permet de faciliter l'utilisation et l'échange de règles entre les formats déjà existants. RDF, RDFS et OWL permettent de définir la structure de la connaissance. SWRL permet d'ajouter des contraintes à cette connaissance afin de l'affiner.

La **couche logique** se trouve au-dessus de la couche ontologie. Certains considèrent ces deux couches comme étant au même niveau : c'est-à-dire comme des ontologies basées sur la logique et permettant des axiomes logiques. En appliquant la logique déductive, on peut inférer de nouvelles connaissances à partir d'une information explicitement représentée.

Les couches **preuve** et **confiance** fournissent des éléments pour réaliser la vérification des déclarations effectuées dans le web sémantique. On s'oriente vers un environnement du web sémantique fiable et sécurisé dans lequel nous pouvons effectuer des tâches complexes en sûreté. D'autre part, la provenance des connaissances, des données, des ontologies ou des déductions est authentifiée et assurée par des signatures numériques. Dans le cas où la sécurité est importante ou si le secret est nécessaire, le chiffrement est utilisé.

La couche **cryptographie** a pour but de s'assurer et de vérifier que les déclarations issues du web sémantique proviennent d'une source sûre, ce qui peut être réalisé par la signature numérique des déclarations RDF.

Comme nous avons pu le voir tout au long de cette section, le web sémantique est, ou tout du moins fait partie, de l'avenir du web. On peut voir ce web comme une nouvelle source d'informations pour le développement de divers logiciels. On peut par exemple imaginer un système de simulation multi-agents où les agents seront capables d'aller interroger ce web sémantique pour obtenir plus d'informations sur les objets de leur environnement.

Nous venons de voir que le web sémantique permet de générer de la connaissance à partir de connaissances existantes issues de l'Internet. Plus simplement le web sémantique peut aussi être utilisé dans des environnements de représentation de données plus petits qu'Internet pour atteindre les mêmes objectifs de représentation de la connaissance. Une fois que cette connaissance est modélisée, il est possible de construire des mécanismes de raisonnement. Néanmoins, cette modélisation doit obéir à un certain niveau de complexité pour être décidable. Le raisonnement est un processus cognitif qui permet soit d'obtenir de nouvelles connaissances, soit de vérifier la réalité d'un fait en faisant appel à différents processus. Ce raisonnement peut être appliqué dans tout domaine. Dans la suite de ce chapitre, nous ferons une brève présentation de la logique de description qui nous permettra d'identifier la complexité de l'ontologie que nous développerons. Si l'ontologie est décidable, nous pourrons alors effectuer des raisonnements sur ces propriétés.

2.9/ LES LOGIQUES DE DESCRIPTION

Les logiques descriptives sont un sous-ensemble des logiques du premier ordre ainsi qu'une famille de formalismes permettant la représentation de connaissances basées sur la logique [Baader, 2003].

Les logiques de description ont deux objectifs. Le premier est de représenter les connaissances, c'est donc la partie description. Le deuxième propose de raisonner à partir des connaissances c'est la partie logique. Les éléments du monde réel y sont représentés à l'aide de concepts, rôles et individus. La sémantique est clairement définie et associée à la description des concepts ainsi que des rôles. Cette sémantique affecte la façon de manipuler ces éléments. Les concepts ainsi que les rôles sont organisés de façon hiérarchique à l'aide de relations de subsomption. L'utilisation de ce type de logique permet la réalisation de tâches de raisonnement. Deux types de raisonnement sont réalisables, les *classifications* et les *instanciations*.

LES FAMILLES DE LOGIQUES DESCRIPTIVES

Les logiques descriptives forment une famille de différentes logiques, chacune caractérisée par des constructeurs. À chaque constructeur est associée une lettre capitale.

Chaque constructeur détermine les opérateurs autorisés. Par exemple, la logique *SHOIQ* est une combinaison de rôles transitifs (*S*), de rôles inverses (*I*), de hiérarchie de rôles (*H*), de classe nominale ou énumération par individus (*O*), de quantificateur restrictif sur les rôles (*Q*). Cette logique autorise l'utilisation de la conjonction \cap , de la disjonction \cup , de la négation \neg , du quantificateur existentiel \exists et du quantificateur universel \forall . La table 2.3 propose un récapitulatif de toutes ces lettres.

La logique descriptive minimale est \mathcal{AL} qui est nommée logique Attributive, elle a été définie par [Amblard, 2003, Schmidt-Schauß and Smolka, 1991]. Elle est dite minimale, car une logique d'expressivité inférieure n'aurait pas d'intérêt pratique [Baader and Nutt, 2003]. La logique \mathcal{ALC} est la logique \mathcal{AL} étendue avec la négation complète *C*, elle constitue la logique descriptive de base.

Le tableau 2.4 récapitule toutes les syntaxes de tous les constructeurs disponibles dans les logiques de description. Le tableau 2.5 récapitule la sémantique de chaque constructeur disponible dans les logiques de description.

Lettre	Définition
\mathcal{F}	Propriétés fonctionnelles
\mathcal{E}	Quantification existentielle complète
\mathcal{U}	Union
\mathcal{C}	Négation complète
\mathcal{S}	Abréviation de \mathcal{ALC} avec les rôles transitifs équivalents à \mathcal{ALUE} puisque l'union et la quantification existentielle complète s'expriment par la négation complète et inversement
\mathcal{H}	Hierarchie de rôles ou sous-propriétés
\mathcal{O}	Classes nominales ou énumération par individus
\mathcal{I}	Propriétés inverses
\mathcal{N}	Restrictions de cardinalité sur les rôles
\mathcal{Q}	Restrictions de quantificateur de cardinalité sur les rôles
\mathcal{S}	Transitivité des rôles
(\mathcal{D})	Ajoute le support des types primitifs (entiers, les chaînes de caractères, les entiers positifs, etc.)

TABLE 2.3 – Expressivité des logiques descriptives.

Constructeurs	Syntaxes	Symboles
Concept Universel (top)	\top	\mathcal{AL}
Concept Vide (bottom)	\perp	\mathcal{AL}
Conjonction	$C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$	\mathcal{AL}
Disjonction	$C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$	\mathcal{U}
Négation	$\neg C$	\mathcal{C}
Quantification universelle	$\forall R.C$	\mathcal{AL}
Quantification existentielle limitée	$\exists R.\top$	\mathcal{AL}
Quantification existentielle	$\exists R.C$	\mathcal{E}
Rôle transitif	R^+	\mathcal{S}
Rôle inverse	R^-	\mathcal{I}
Rôle hiérarchique	$C \sqsubseteq D$	\mathcal{H}
Rôle fonctionnel	$\leq 1R$	\mathcal{F}
Inclusion de rôles complexes	$RoS \subseteq R, RoS \subseteq S$	\mathcal{R}
Restriction de nombre non qualifiée (au moins)	$\geq nR$	\mathcal{N}
Restriction de nombre non qualifiée (au plus)	$\leq nR$	\mathcal{N}
Restriction de nombre non qualifiée (exactement)	$= nR$	\mathcal{N}
Restriction de nombre qualifiée (au moins)	$\geq nR.C$	\mathcal{Q}
Restriction de nombre qualifiée (au plus)	$\leq nR.C$	\mathcal{Q}
Restriction de nombre qualifiée (exactement)	$= nR.C$	\mathcal{Q}
Nominal (individus)	$\{a\}$ or $\{a_1, \dots, a_n\}$	\mathcal{O}

TABLE 2.4 – Constructeurs, syntaxes et symboles des logiques descriptives.

Constructeurs	Syntaxes	Sémantique
Vide (resp. Universel)	\top (resp. \perp)	\emptyset (resp. $\Delta^{\mathcal{J}}$)
Concept atomique	C	$C^{\mathcal{J}} \subseteq \Delta^{\mathcal{J}}$
Rôle	R	$R^{\mathcal{J}} \subseteq \Delta^{\mathcal{J}} \times \Delta^{\mathcal{J}}$
Individu	a	$a^{\mathcal{J}} \in \Delta^{\mathcal{J}}$
Négation	$\neg C$	$\Delta^{\mathcal{J}} \setminus C^{\mathcal{J}}$
Conjonction	$C_1 \sqcap C_2$	$C_1^{\mathcal{J}} \cap C_2^{\mathcal{J}}$
Disjonction	$C_1 \sqcup C_2$	$C_1^{\mathcal{J}} \cup C_2^{\mathcal{J}}$
Quantificateur universel	$\forall R.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \forall y(x, y) \in R^{\mathcal{J}} \rightarrow y \in C^{\mathcal{J}}\}$
Quantificateur existentiel	$\exists R.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \exists y(x, y) \in R^{\mathcal{J}} \rightarrow y \in C^{\mathcal{J}}\}$
Restriction au moins	$\geq nR$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \{y \mid (x, y) \in R^{\mathcal{J}}\} \geq n\}$
Restriction au plus	$\leq nR$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \{y \mid (x, y) \in R^{\mathcal{J}}\} \leq n\}$
Restriction au moins qualifiée	$\geq nR.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \{y \in C^{\mathcal{J}} \mid (x, y) \in R^{\mathcal{J}}\} \geq n\}$
Restriction au plus qualifiée	$\leq nR.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{J}} \mid \{y \in C^{\mathcal{J}} \mid (x, y) \in R^{\mathcal{J}}\} \leq n\}$
Constructeur d'équivalence	$C_1 \equiv C_2$	$C_1 = C_2$
Constructeur de subsomption	$C_1 \sqsubseteq C_2$	$C_1 \subseteq C_2$
Assertion de concept	$a : C$	$a^{\mathcal{J}} \in C^{\mathcal{J}}$
Assertion de rôle	$\langle a b \rangle : R$	$(a^{\mathcal{J}}, b^{\mathcal{J}}) \in R^{\mathcal{J}}$

TABLE 2.5 – Constructeurs, syntaxes et sémantique des logiques descriptives.

2.10/ BASES DE CONNAISSANCES À BASE DE LOGIQUE DE DESCRIPTION

Les bases de connaissances permettent de regrouper les connaissances d'un domaine donné de façon exploitable par la machine. C'est une ontologie peuplée, c'est à dire contenant des individus. Une distinction est généralement faite entre les deux composantes de la base de connaissances \mathcal{K} : la ABox et la TBox.

La TBox (Terminological Box) correspond au niveau terminologique. Elle consiste en la description de concepts et rôles de la base de connaissances, c'est le schéma de l'ontologie. La ABox (Assertions Box), correspondant au niveau assertionnel, décrit les individus et contient les données. Ainsi une base de connaissances \mathcal{K} est composée d'une TBox T ainsi que d'une ABox A , $\mathcal{K} = (A, T)$. Seuls des axiomes d'égalité $C \equiv D$ ou d'inclusion $C \sqsubseteq D$ forment la TBox. Une ABox doit impérativement être associée à une TBox. Plusieurs ABox peuvent être associées à une TBox. Les assertions s'expriment en termes de concepts $C(a)$ et de rôles $R(b, c)$, provenant de la TBox, c'est pourquoi une ABox ne peut exister sans l'existence préalable d'une TBox

Les logiques de description adoptent l'hypothèse de nom unique, ce qui signifie que les individus possèdent toujours des noms différents. Dans le cas contraire, les individus sont les mêmes. De plus, les bases de connaissances à base de logiques de description adoptent la sémantique du monde ouvert. L'hypothèse du monde ouvert implique que les informations peuvent être incomplètes. Cela signifie que ce qui ne peut pas être prouvé à partir des informations disponibles n'est pas nécessairement faux, contrairement à l'hypothèse de monde clos qui implique que l'information dans la base de connaissances est nécessairement complète. Cela signifie que ce qui ne peut pas être prouvé à partir des informations disponibles est faux. Par exemple, la base de connaissances est composée des individus suivants *Homme(Jean)*, *Homme(Paul)* et de l'assertion de rôle suivant : *possedeEnfants(Jean, Paul)*. La question est : est-ce que tous les enfants de Jean sont des hommes ? La réponse est vraie dans l'hypothèse d'un monde clos, tel qu'il est adopté dans le domaine des bases de données relationnelles. Par contre, le résultat est inconnu pour la sémantique du monde ouvert. Car aucune information n'est disponible stipulant que Paul est le seul enfant de Jean.

LE LANGAGE ONTOLOGIQUE OWL

OWL est le langage de représentation de connaissances permettant la définition d'ontologies. Ce langage est recommandé par le W3C. Il est basé sur les travaux dans le domaine de la logique de description précédemment introduite. Cela permet la mise en place de processus de vérification de cohérence ainsi que de déduction de connaissances à partir des connaissances existantes. Différentes syntaxes peuvent être utilisées

afin de sérialiser une ontologie OWL, par exemple Turtle, N3 ou XML (qui est très verbeux).

L'exemple 2.1 de syntaxe XML propose la définition d'une classe définie comme étant l'intersection des classes Homme et Humain.

```

1 <owl:Class>
2   <owl:intersectionOf rdf:parserType="Collection">
3     <owl:Class rdf:about="#Humain"/>
4     <owl:Class rdf:about="#Homme"/>
5   </owl:intersectionOf>
6 </owl:Class>

```

Listing 2.1 – exemple d'intersection

L'exemple 2.2 de syntaxe XML propose la définition d'une restriction sur la cardinalité minimum d'une relation.

```

1 <owl:Restriction>
2   <owl:OnProperty rdf:Ressource="#possedeEnfant"/>
3   <owl:minCardinality rdf:datatype="xsd:NonNegativeInteger"> 2
4   <owl:minCardinality>
5 </owl:Restriction>

```

Listing 2.2 – exemple d'intersection

Les tableaux 2.6 et 2.7 présentent les constructeurs ainsi que les axiomes du langage OWL ainsi que leur correspondance en logique de description.

Constructeurs	Syntaxe DL	Exemple
intersectionOf	$C_1 \sqcap C_2$	<i>Humain</i> \sqcap <i>Homme</i>
unionOf	$C_1 \sqcup C_2$	<i>Docteur</i> \sqcup <i>Avocat</i>
complementOf	$\neg C$	\neg <i>Homme</i>
oneOf	$\{x_1 \dots x_2\}$	$\{marie, jean\}$
allValueFrom	$\forall r.C$	$\forall possedeEnfant.Docteur$
someValueFromFrom	$\exists r.C$	$\exists possedeEnfant.Avocat$
hasValue	$\exists r.\{x\}$	$\exists citoyenDe.\{France\}$
minCardinality	$(\geq n r)$	$(\geq 2 possedeEnfant)$
maxCardinality	$(\leq n r)$	$(\leq 1 possedeEnfant)$
inverseOf	r^-	<i>possedeEnfant</i> ⁻

TABLE 2.6 – Constructeurs OWL

Il y a une correspondance entre le niveau d'expressivité désiré en OWL, c'est à dire les axiomes utilisés pour la représentation des connaissances et leur correspondance en logique de description.

Ainsi, les ontologies OWL-Lite correspondent à l'expressivité de la logique de description *SHIF(D)*, OWL-DL à la logique de description *SHOIN(D)*. Ces deux premières ver-

Axiome	Syntaxe DL	Exemple
subClassOf	$C_1 \sqsubseteq C_2$	$Humain \sqsubseteq Animal \sqcap Bipede$
equivalentClass	$C_1 \equiv C_2$	$Homme \equiv Humaine \sqcap Male$
subPropertyOf	$P_1 \sqsubseteq P_2$	$possedeFille \sqsubseteq possedeEnfant$
equivalentProperty	$P_1 \equiv P_2$	$Cout \equiv Prix$
disjointWith	$C_1 \sqsubseteq \neg C_2$	$Male \sqsubseteq \neg Femelle$
sameAs	$\{x_1\} \equiv \{x_2\}$	$\{presid_hollande\} \equiv \{fran_hollande\}$
differentFrom	$\{x_1\} \sqsubseteq \neg\{x_2\}$	$\{marie\} \sqsubseteq \neg\{jean\}$
transitiveProperty	P rôle transitif	$estAncetreDe$ rôle transitif
functionalProperty	$\top \sqsubseteq (\leq 1P)$	$\top \sqsubseteq (\leq 1 estMereDe)$
inverseFunctionalProperty	$\top \sqsubseteq (\leq 1P^-)$	$\top \sqsubseteq (\leq 1 aPourMere^-)$
symmetricProperty	$P \equiv P^-$	$estMarieAvec \equiv estMarieAvec^-$

TABLE 2.7 – Axiomes OWL

sions sont décidables contrairement à OWL-FULL. Depuis 2012, OWL2 est recommandé par le W3C et permet l'expressivité de la logique $SROIQ(\mathcal{D})$.

L'évolution de l'expressivité, depuis les logiques descriptives les moins expressives (le langage attributif) jusqu'aux logiques les plus complexes utilisées dans le domaine du web sémantique, est présentée dans le schéma 2.4.

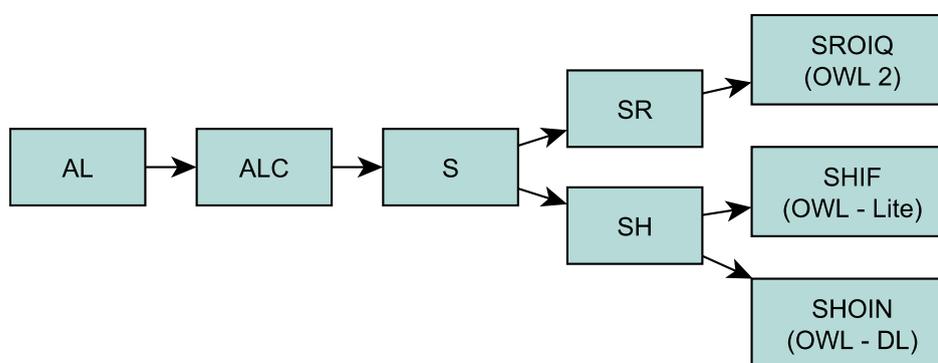


FIGURE 2.4 – Familles de logiques descriptives

Comme cela a été mentionné, le passage de la logique \mathcal{AL} à la logique \mathcal{ALC} se fait par l'ajout de la négation $\neg C$, C . Le gain d'expressivité permettant le passage de la logique \mathcal{ALC} à la logique \mathcal{S} se fait par la possibilité de prendre en compte la transitivité de rôles R^+ . Les langages OWL-DL et OWL-Lite sont basés respectivement sur les logiques \mathcal{SHOIN} et \mathcal{SHIF} qui sont une augmentation de l'expressivité de la logique \mathcal{SH} , elle-même basée sur la logique \mathcal{S} à laquelle la gestion des hiérarchies de rôles a été ajoutée $C \sqsubseteq D$. Tandis que le langage OWL2 a l'expressivité de la logique \mathcal{SROIQ} qui est une augmentation de l'expressivité de la logique \mathcal{SR} basée sur la logique \mathcal{S} à laquelle contrairement à la logique \mathcal{SH} , les inclusions de rôles complexes $RoS \subseteq R, RoS \subseteq S$ ont été ajoutés en plus des hiérarchies de rôles $C \sqsubseteq D$.

Les ontologies de niveau $SHOIN(\mathcal{D})$ peuvent être décrites par le langage OWL DL. Ces ontologies sont dites décidables. Il est donc possible de construire des règles logiques sur ces ontologies pour réaliser des raisonnements, à l'aide de raisonneurs. Dans la suite, nous présenterons une définition et les principes fondamentaux du raisonnement. Ensuite, nous focaliserons notre présentation sur différents processus de raisonnement tels que la déduction, l'induction et l'abduction. Enfin, nous présenterons les outils développés pour raisonner sur des données sémantiques et plus particulièrement les ontologies.

Nous venons de voir que le web sémantique permet de générer de la connaissance à partir de connaissances existantes issues de l'Internet. Plus simplement le web sémantique peut aussi être utilisé dans des environnements de représentation de données plus petits que l'Internet pour atteindre les mêmes objectifs de représentation de la connaissance. Une fois que cette connaissance est modélisée, il est possible de construire des mécanismes de raisonnement. Le raisonnement est un processus cognitif qui permet soit d'obtenir de nouvelles connaissances, soit de vérifier la réalité de faits. Ce raisonnement peut être appliqué dans tout domaine. Dans la suite de ce chapitre, nous donnerons une définition et les principes fondamentaux du raisonnement. Ensuite, nous focaliserons notre présentation sur les différents processus de raisonnement tels que la déduction, l'induction et l'abduction. Enfin, nous présenterons les outils développés pour raisonner sur des données sémantiques et plus particulièrement les ontologies.

2.11/ DÉFINITIONS ET FONDAMENTAUX DU RAISONNEMENT

Le sens du mot raisonnement est double. Il s'agit d'une action et du résultat d'une action. La première définition liée au raisonnement est donnée par Aristote et concerne le raisonnement déductif :

« Un discours tel que, certaines choses étant posées, quelque autre chose en résulte nécessairement par cela seul que les premières sont posées. »

Le raisonnement est une activité mentale intentionnelle au cours de laquelle on traite des informations dans le but d'en tirer des conclusions. Le raisonnement exige que l'on produise des inférences à partir de l'observation de faits. L'inférence désigne les actions de mise en relation d'un ensemble de propositions, aboutissant à une démonstration de vérité, de fausseté ou de probabilité, sous la forme d'une proposition appelée conclusion. On conduit des raisonnements pour diverses raisons comme la prise de décision, la démonstration, la confirmation d'une hypothèse, etc. Lorsque quelqu'un effectue des inférences, on dit que le mécanisme d'élaboration de ces inférences s'appelle le raisonnement. Les raisonnements logiques en général s'appuient sur l'utilisation de syllogismes, c'est-à-dire des raisonnements que l'on peut formaliser par des règles. On distingue trois natures de raisonnement : la déduction [Sternberg, 2008], l'induction [Lavrac and Dzeroski, 1994] et l'abduction [Denecker and Kakas, 2002, Vu, 2011].

2.11.1/ RAISONNEMENT PAR DÉDUCTION

La déduction est une forme de raisonnement dans laquelle la conclusion est nécessairement vraie si les présuppositions à partir desquelles la conclusion a été inférée sont vraies. Si ces présuppositions sont vraies, alors la conclusion est vraie.

La forme syllogistique de la déduction est la suivante :

- Règle : « Tous les chats de ce panier sont de type européen »
- Fait : « Ces chats viennent de ce panier »
- Résultat : « Ces chats sont de type européen »

La déduction construit des relations pour tirer des conséquences.

2.11.2/ RAISONNEMENT PAR INDUCTION

Le processus inductif est une forme de raisonnement qui donne naissance à des généralisations à partir d'observations spécifiques. À la différence de la déduction, la conclusion inférée ne découle pas forcément logiquement des présuppositions. Elle est valide au moment de son énonciation. La forme syllogistique de l'induction est celle-ci :

- Fait : « Ces quelques chats viennent de ce panier »
- Résultat : « Ces chats sont de type européen »
- Règle : « Tous les chats de ce panier sont de type européen »

La notion d'induction correspond au raisonnement humain qui consiste à remonter, par une suite d'opérations cognitives, de données particulières (faits, expériences, énoncés) à des propositions plus générales, de cas particuliers à la loi qui les régit, des effets à la cause, de l'expérience à la théorie. On passe donc d'un échantillon d'éléments, correspondant à l'observation d'événements (réels ou virtuels suivant le type des éléments observés), à la prédiction de règles, modélisées par des hypothèses, qui les régissent. Si on se lie à la définition philosophique de l'induction, on se base alors sur 3 notions : expliquer, prédire et simplifier.

La généralisation permet de passer d'observations particulières à des catégories d'événements ou à des lois qui s'appuient sur une volonté d'explication. On parvient à expliquer un phénomène si on peut le relier de façon claire à des antécédents déjà connus et étudiés. Pour distinguer les races de chats, on doit d'abord savoir que dans nos régions tempérées, à notre niveau de l'évolution, peuvent coexister un certain nombre d'espèces vivantes ayant des caractéristiques particulières. Cela détermine des types d'animaux, notamment, des chats, dont celles que l'on peut nommer *européens* ou *de gouttière*. À chaque race correspondent des caractéristiques propres. À partir de ces caractéristiques, il devient alors possible de distinguer les chats entre eux à partir d'individus encore non observés, car ils entrent en ligne de correspondance avec ces caractéristiques.

L'explication, qui consiste à remonter d'un phénomène connu à ses causes inconnues, fera appel à des principes de prédiction. Une prédiction n'est peut-être pas vraie à 100%, mais elle est fondée et valide au moment de sa proposition. On ne trouve pas de manchot pygmée (ou *petit manchot bleu*, la plus petite espèce de manchots) sur les côtes françaises. Actuellement, c'est vrai, mais rien de dit qu'un jour ce ne sera pas le cas.

L'étude de l'induction est donc liée à celle des concepts d'explication, de prédiction et d'économie de description.

2.11.3/ RAISONNEMENT PAR ABDUCTION

L'abduction est une forme de raisonnement qui implique aussi une inférence d'effet à causes. À la différence de la déduction et de l'induction qui font référence à des concepts, l'abduction crée de nouveaux concepts. La forme syllogistique de l'abduction est encore différente :

- Règle : « Tous les chats de ce panier sont de type européen »
- Résultat : « Ces chats sont de type européen »
- Fait : « Ces chats viennent de ce panier »

Une base de connaissances n'est pas forcément nécessaire pour le fonctionnement de l'induction puisqu'elle se crée au fur et à mesure. Pour l'abduction, la base de connaissances est nécessaire dans le but de construire et tester les propositions générées. D'après le créateur de cette notion, Charles Sanders Peirce, l'abduction est un type d'inférence logique et est le seul mode de raisonnement par lequel on peut aboutir à des connaissances nouvelles [Peirce, 1974]. Il y a deux points clés qui permettent de différencier l'abduction des autres formes de raisonnement. Premièrement, l'abduction fonctionne dans le sens descendant, au lieu du sens ascendant comme utilisé généralement. Deuxièmement, la nature de l'abduction se veut non-monotonique. Cela signifie que, à la différence de l'inférence déduite qui restera comme une vérité, le raisonnement abductif est valable à un instant *t*, mais les explications générées pourront être invalidées par la suite par d'autres inférences.

Pour synthétiser ces trois types de raisonnement, on peut dire que :

- la déduction prouve que quelque chose *doit* être ;
- l'induction montre que quelque chose *est* effectivement ;
- l'abduction suggère que quelque chose *pourrait* être.

Maintenant que nous avons une vision plus concrète de ce qu'est le raisonnement et des différents processus de raisonnement, nous allons étudier plus spécifiquement le raisonnement dans le domaine du web sémantique.

2.11.4/ RAISONNEUR SÉMANTIQUE

Un raisonneur sémantique, moteur de raisonnement, moteur de règles, moteur d'inférences, ou tout simplement un raisonneur, est une application capable de déduire les conséquences logiques d'un ensemble de faits ou axiomes affirmés. La notion de raisonneur sémantique généralise celle d'un moteur d'inférence, en fournissant un ensemble plus riche de mécanismes pour travailler. Les règles d'inférence sont généralement spécifiées par le biais d'un langage d'ontologie, et souvent un langage de description. Par exemple, soit deux personnes et une relation *ami* volontairement spécifiée symétrique (ce qui n'est pas forcément le cas pour l'exemple), si *la personne A est ami de la personne B* alors le raisonneur peut déduire de lui-même que *la personne B est ami de la personne A*. Ce mécanisme peut sembler simple et logique, mais il n'est pas naturel pour une machine. Il faut donc lui apprendre. Cet apprentissage passe par la définition d'un modèle, de règles de fonctionnement de ce modèle (contraintes, règles logiques, etc.). Il y a plusieurs moteurs d'inférence. Les principaux sont CEL, FaCT++, HermiT, Pellet, RacerPro, TrOWL. Ils ont tous des caractéristiques particulières.

CEL (pour Classifier for EL), créé par l'Université technique de Dresde, met en œuvre un algorithme polynomial raffiné qui lui permet de traiter de très grandes ontologies EL+ dans un délai raisonnable [Baader et al., 2006].

Fact++, créé par l'Université de Manchester, est la nouvelle génération (à l'époque) de raisonneurs FaCT supportant OWL DL [Tsarkov and Horrocks, 2006].

Hermit, de l'Université d'Oxford peut, entre autres, déterminer si oui ou non une ontologie proposée est cohérente et identifier les relations de subsomption entre concepts [Shearer et al., 2008].

Pellet a été le premier raisonneur à implémenter complètement OWL DL (*SHOIN(D)*) et a été étendu à OWL 2 (*SROIQ(D)*) et OWL 2 EL [Sirin et al., 2007].

RacerPro (pour Renamed ABox and Concept Expression Reasoner, Racer Systems) met en œuvre la description logique *SHIQ*. Des optimisations dédiées OWL 2 EL ont été apportées [Haarslev and Müller, 2001].

TrOWL (pour Tractable reasoning infrastructure for OWL 2) de l'Université d'Aberdeen, est une interface commune à plusieurs raisonneurs et plusieurs niveaux de logique de description [Thomas et al., 2010].

Le tableau 2.8 propose une comparaison sur plusieurs points de ces raisonneurs.

La *méthodologie* utilisée par les raisonneurs est la première caractéristique proposée. La plupart des raisonneurs utilisent l'algorithme tableaux. Les autres utilisent des règles de complétude.

Tous les raisonneurs présentés sont capables de vérifier la *cohérence* et la *consistance* d'une ontologie. La cohérence correspond à la détection d'anomalies au niveau

	CEL	FACT++	Hermit	Pellet	RacerPro	TROWL
Méthode	CEL	fact++	Hermit	Pellet	RacerPro	TROWL
	règles de complétude	tableaux	hyper-tableaux	tableaux	tableaux	règles de complétude
Cohérence	+					
Consistance	+					
Expressivité	EL^+	$SROIQ(D)$	$SROIQ(D)$	$SHOID(D)$	$SHID(D-)$	$SROIQ$
Règles	-	-	SWRL	SWRL	SWRL	-
Justification	+	-	-	+	+	-
Rais. ^a ABox	+					
OWL API	+					
Protégé	+	+	+	+	-	+
Licence	AP 2.0	GLGPL	GLGPL	GLGPL	personnelle	AGPL
Open Source	+	+	+	+	-	-
Lang. ^b	Comon Lisp	C++	Java	Java	Lisp	Java

TABLE 2.8 – Comparatif technique des raisonneurs

- a. Raisonnement
- b. Langage de programmation

du schéma de l'ontologie. Pour la consistance, il s'agit de vérifier les anomalies au niveau des individus de l'ontologie.

Le niveau de *description logique* supporté est propre à chaque raisonneur (voir la section 2.9 pour un point sur la description logique).

Il y a plusieurs façons de contraindre les connaissances modélisées par une ontologie, les contraintes sur le schéma et les *règles*. Ces règles permettant d'exprimer des contraintes sur le modèle sont décrites en logique, par le langage SWRL.

La *justification* correspond à la capacité d'expliquer quelque chose. Pellet et RacerPro sont capables d'expliquer pourquoi une anomalie est détectée. De plus, Pellet est capable de produire une explication pour toute inférence effectuée.

Par définition, un raisonneur est capable de *raisonner* sur le modèle. Tous les raisonneurs présentés ici sont, en plus, capables de raisonner sur la ABox, c'est-à-dire les individus.

OWL API est la librairie qui fait référence pour travailler avec les ontologies. Tous les raisonneurs présentés proposent l'API OWL et existent sous la forme d'un plug-in de Protégé, hormis RacerPro.

Les *licences d'utilisation* sont diverses : CEL est proposé sous licence AP 2.0 (Apache 2), FaCT++, HermiT et Pellet sont proposés sous licence LGPL (GNU Lesser General Public License) et sont utilisables hors contexte commercial. CEL, FaCT++, HermiT et Pellet sont open source. Enfin, Hermit, Pellet et TrOWL ont été réalisés en Java, FaCT++ en C++, RacerPro en Lisp et CEL en Comon LIPS.

2.12/ LA SÉMANTIQUE APPLIQUÉE AUX SMA

Dans la littérature concernant l'utilisation de la sémantique dans le milieu des SMA, trois domaines sont principalement abordés : l'environnement, les agents et la communication entre agents. Ce dernier domaine sort du cadre des travaux présentés. Ainsi, la sémantique peut intervenir à tous les principaux étages qui composent un SMA.

Les agents évoluent dans un environnement virtuel qu'ils peuvent percevoir. La perception de l'environnement par un agent peut s'apparenter à la vision humaine dans la mesure où elle s'exécute dans un champ de perception donné. Ce champ de perception est en général modélisé selon la fonction et de la nature de l'agent concerné. Ainsi, la perception d'un agent n'est pas traitée par l'agent lui-même, mais par le moteur de simulation multi-agents qui lui retourne la liste des objets en intersection avec son champ de vision. L'ajout ou non dans la liste peut faire l'objet de diverses heuristiques, mais le principe reste toujours le même. La sémantique de l'environnement est alors ici importante puisque celle-ci pourra apporter de l'information sur les objets perçus par l'agent. Il est aussi possible d'influencer les paramètres de perception. La sémantique dans l'environnement est donc un élément important dans les systèmes multi-agents pour peu que l'on

souhaite obtenir des comportements et interactions avec l'environnement.

L'environnement est donc le principal élément à bénéficier de l'ajout de sémantique. Cette sémantique peut être destinée soit au moteur de simulation, soit à l'agent. Dans ce cas, il est nécessaire que l'agent soit capable d'interpréter une telle information. Il faut aussi qu'il soit capable d'effectuer un raisonnement et d'avoir une capacité d'analyse reposant sur ce raisonnement. En plus de la capacité de traitement de la sémantique de l'environnement, la sémantique peut également être utilisée au niveau des agents pour décrire des propriétés directement en rapport avec eux. Certains proposent ainsi une sémantique directement en rapport avec l'agent afin de faciliter par exemple le stockage des animations dans une ontologie, etc. Cette sémantique associée directement à l'agent peut également altérer le processus de perception. Ici aussi, l'utilisation de la sémantique avec les agents permet de définir des comportements toujours plus affinés.

2.12.1/ SÉMANTIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT

Position relative

Lozano et al. [2007] propose de stocker une position relative (au-dessus, en dessous, entre, etc.) par rapport à un autre objet référentiel. Les informations qu'elle contient ne sont donc pas de première importance dans la mesure où il est possible de les calculer depuis la géométrie de l'environnement. Il peut être intéressant d'explorer cette voie dans la mesure où la sémantique de la position relative peut être définie par les agents et non être contenue dans l'environnement. Trinh et al. [2010] présente également une approche qui utilise un placement relatif entre les objets pour décrire l'environnement. Cette dernière est formalisée par la méthode UML et les contraintes OCL.

Environnement informé pour le contexte urbain

Farenc et al. [1999b] présente une sémantique utilisable directement par le moteur de simulation afin de moduler la perception des agents. L'environnement proposé repose sur une structure arborescente et découpe un environnement urbain sur plusieurs niveaux. Pour une ville par exemple, nous aurons la racine de l'arbre qui concernera la ville, les nœuds fils les quartiers, les nœuds de ces derniers les routes, d'autres les trottoirs, etc. Ainsi un agent, qu'il représente une voiture ou un piéton sera en mesure de rester sur les voies qui lui sont destinées en fonction de son profil. Le problème est qu'un certain type d'agent est cloisonné sur le type de voie prévue à cet effet. Mekni [2010] propose d'étendre le modèle précédent en organisant les différents types d'objets en couches. Un profil particulier d'agent peut alors utiliser tous les éléments d'une couche.

Annotation des éléments de l'environnement

Lugrin and Cavazza [2007] propose un modèle dans lequel chaque objet 3D est composé de sa géométrie ainsi que d'éléments invisibles (les marqueurs) et de liens vers

le reste de l'environnement. Ainsi en évoluant dans l'environnement, un objet verra ses marqueurs changer ainsi que ses liens modifiés pour en déterminer les capacités ou les états. Cette approche peut permettre un comportement réaliste dans l'utilisation des objets par les agents. Ces travaux sont très intéressants et inspirent notre travail. Mais ils sont beaucoup trop précis et demandent un travail énorme a posteriori sur l'environnement afin d'établir toutes les propriétés et liaisons.

2.12.2/ SÉMANTIQUE POUR LES AGENTS

Holmes and Stocking [2009] propose une approche dans laquelle les agents sont capables de se servir d'une ontologie pour augmenter leur base de connaissances. Leur cadre de travail est le framework agent JACK qui utilise leur propre ontologie, pertinente seulement avec cette plateforme. L'approche propose deux types de connaissances pour les agents. La première consiste en une connaissance a priori de l'environnement et la seconde consiste en une connaissance située qui est en fait la représentation de ce que l'agent croit vrai.

Gero and Kannengiesser [2003] propose un approche basée principalement sur trois notions : fonction, comportement et structure. Cette approche part du postulat suivant : un agent qui utilise cette approche attribuera une fonction à un comportement et déterminera son comportement en fonction d'une structure. Une connexion directe entre structure et fonction n'est pas réalisée. C'est l'agent qui associera ainsi un comportement particulier à une structure. Cette approche permet donc de laisser l'agent sélectionner comment se comporter face à un objet donné. On obtient ainsi une certaine généralité dans les comportements dans la mesure où un comportement n'est pas associé à un objet en particulier. Il est par contre associé à un ensemble de propriétés qui peuvent par exemple se retrouver dans plusieurs objets différents. C'est ensuite en se servant des effets d'un comportement que l'agent est capable d'associer une fonction à un objet de façon indirecte. Ces travaux ont inspiré notre travail en partie, car la dépendance forte entre structure et agent n'est pas justifiée. Dans la vie réelle, tout le monde sait qu'une chaise permet de s'asseoir et une porte de fermer un espace logique ou de passer d'un espace à un autre. Donc chacun de nous abordera le problème de la même façon. Par contre, selon notre profil, il est possible de ne pas pouvoir utiliser les éléments de la même façon.

2.13/ CONCLUSION

Un système multi-agents est un environnement complexe qui peut être décrit simplement par les trois composantes : les agents, l'environnement et la simulation. Nous avons vu qu'il existe dans ce domaine de nombreux champs d'études liés à chacune de ces composantes. Nous avons aussi constaté que ce domaine était actuellement très influencé par les nouvelles approches de modélisation de la connaissance issues du web sémantique, domaine émergent lié à l'informatique décisionnelle du *système d'information* Internet.

Nous avons présenté un état de l'art du domaine des systèmes multi-agents en pointant du doigt deux enjeux importants qui sont la modélisation de l'environnement virtuel et la génération de comportements. Ces deux enjeux sont ceux traités dans la suite de ce document. Sur l'enjeu de la modélisation de l'environnement, nous avons identifié deux approches, l'une probabiliste (approximative, mais rapide à mettre en place) et l'autre déterministe (précise, mais coûteuse). Nous souhaitons développer une approche associant les avantages de chacune sans leurs inconvénients : une approche rapide et précise. Nous souhaitons partir d'une maquette numérique sémantiquement enrichie du bâtiment réel fournie par un architecte, à partir du processus de construction standard d'un bâtiment, nous permettant d'identifier dynamiquement dans l'environnement, les zones et les points de passage logiques adaptés à la connaissance experte du domaine. Cet environnement sémantiquement enrichi nous permettra de réaliser des raisonnements. Nous souhaitons démontrer que la génération du comportement dépend très fortement de la modélisation de l'environnement virtuel. Nous montrerons qu'au-delà d'une simple perception géométrique de l'environnement, les processus de représentation du comportement au sein d'un système multi-agents peuvent être simplifiés en ajoutant de la sémantique sur l'environnement. Cette sémantique sera la base d'une définition simplifiée, mais efficace du comportement des agents sous la forme de règles logiques.

La suite de ce document présente notre approche, d'une part pour la modélisation de l'environnement en utilisant des ontologies, et d'autre part pour la modélisation du comportement des agents l'aide de raisonneurs sémantiques.



ENVIRONNEMENT INFORMÉ SÉMANTIQUEMENT
ENRICHİ POUR LA SIMULATION MULTI-AGENTS

INTRODUCTION

Le domaine du Web sémantique s'attache en grande partie à proposer des langages, méthodes et outils afin de modéliser et/ou travailler avec des connaissances expertes. La modélisation de la connaissance peut prendre plusieurs formes. L'une des plus abouties est l'ontologie. L'ontologie peut être considérée comme un modèle de représentation de la vérité d'un domaine. Cette représentation peut être complète, on parle alors de « *Clause World Assumption* », ou incomplète « *Open World Assumption* ». De la même manière, cette représentation peut être plus au moins formelle. Il existe des modèles simples de représentation de connaissances, appelés taxonomies ou classifications, et des modèles plus complexes, dits décidables qui permettent de réaliser de l'inférence. Dans tous les cas, une ontologie est constituée d'un ensemble de concepts, de relations entre ces concepts et de contraintes sur les relations, qui permettent de modéliser la connaissance d'un domaine. D'après Gruber [1995], les ontologies ont pour vocation originelle de modéliser la connaissance d'un domaine d'un point de vue objectif, cohérent et enfin extensible.

Les ontologies peuvent être utilisées pour modéliser de nombreux domaines. Elles permettent de répondre à des problèmes d'interopérabilité en offrant une représentation homogène de la connaissance. Elles permettent aussi de modéliser des connaissances sur lesquelles on peut définir des règles logiques pour générer par inférence de nouvelles connaissances ou de nouvelles classifications. C'est ce dernier aspect que nous avons valorisé dans l'usage des ontologies pour modéliser l'environnement et la cognition de l'agent dans le domaine de la simulation multi-agents.

La simulation multi-agents (SMA) consiste à placer des entités virtuelles autonomes dans un environnement virtuel et de programmer des comportements. Son objectif est d'identifier, soit les limites de l'environnement au regard des comportements, soit les limites du comportement dans cet environnement. Cet ensemble, agent et environnement, permet de virtualiser des situations réelles afin d'étudier les bâtiments de l'environnement et le comportement des agents. Le réalisme est une composante importante de l'environnement de simulation. Plus l'environnement est proche de l'existant, plus les agents évoluent dans un environnement proche de la réalité. L'ontologie définissant par nature

une vérité de modélisation d'une connaissance appartenant à un domaine, un environnement modélisé par une ontologie possède donc une représentation virtuelle au plus près de la réalité de l'environnement.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour modéliser les environnements de simulation à partir d'ontologies. Néanmoins, elles ne sont généralement pas en accord avec les principes de base de la définition d'une ontologie. La clarté de l'ontologie est altérée par le fait que ces méthodes sont dépendantes de leur contexte d'utilisation. La cohérence n'est pas un élément aisé à respecter, voire même à vérifier. Parmi les outils associés aux ontologies, les raisonneurs permettent de tester cette cohérence, notamment par l'expression d'une logique liée à l'ontologie.

Notre objectif est de faciliter la conception de comportements complexes et réalistes pour la simulation à base d'agents dans des environnements 3D virtuels et sémantiquement enrichis. La représentation de l'environnement est donc un point crucial. Cet environnement sera modélisé géométriquement, mais aussi sémantiquement, conformément à la finalité des ontologies. Enfin, nous devons aussi définir un système de gestion des comportements réalistes des agents en tirant parti des avantages des ontologies. La figure 3.1 permet de visualiser les différentes problématiques auxquelles nous nous attachons.

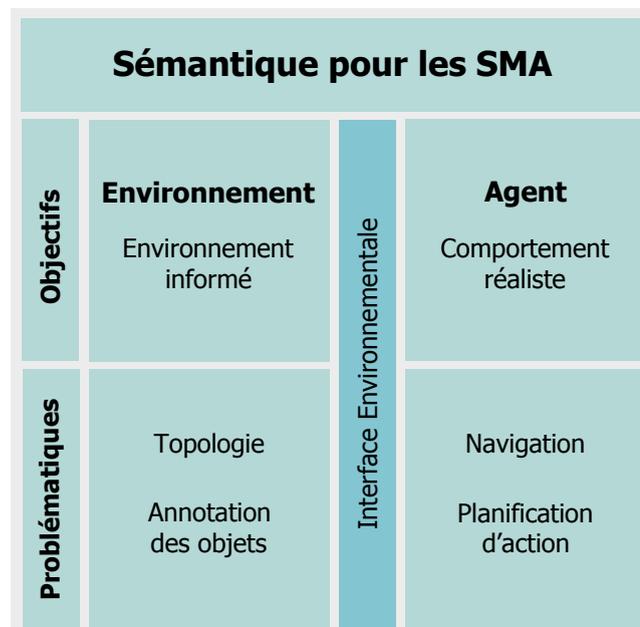


FIGURE 3.1 – Problématiques SMA et sémantique

Le chapitre 2 a montré que la production d'un environnement sémantiquement informé nécessite de travailler sur plusieurs problématiques particulières. Parmi celles-ci, nous avons fait le choix de travailler sur deux en particulier : la topologie de l'environnement et l'annotation des objets. La première correspond à la définition même de la structure de l'environnement à travers une définition de l'environnement qui nous est propre. En effet, il est nécessaire que la logique humaine de création de structures de bâtiments

soit transposée dans notre modèle afin de permettre la navigation des agents virtuels, comme le ferait un être humain dans un bâtiment réel. Ensuite, le modèle proposé met en pratique une amélioration de la définition d'objets de l'environnement au travers de l'ajout d'informations aux informations géométriques composant l'environnement et ses objets. La section 2.4 a aussi montré que la définition de comportements d'agents virtuels intelligents nécessite de travailler sur plusieurs problématiques particulières. Dans notre cas, nous allons proposer plusieurs pistes permettant de mettre en pratique des solutions concernant la navigation de l'agent dans son environnement et la planification d'actions de la part de ce dernier.

Concernant l'environnement, notre approche est différente de celle qui consiste à produire un environnement particulier pour les besoins d'une simulation. Au lieu de créer un environnement ex nihilo, nous proposons une solution pour produire automatiquement des environnements à partir de plans réels de bâtiments. Nous répondrons ainsi à un des premiers objectifs : produire un environnement virtuel au plus près de sa représentation réelle. Le modèle de l'environnement est automatiquement créé à partir d'un format de données issu de l'industrie : le format IFC. Le format IFC (Industry Foundation Classes - ISO 16739 :2013) est un format de fichier orienté objet, utilisé par l'industrie du bâtiment pour échanger et partager des informations entre logiciels. L'objectif des IFC est de remplacer un système d'information fragmenté en une solution interopérable autour d'un modèle commun de données. Tous les acteurs d'un projet de bâtiment (architectes, bureaux d'études, maîtres d'ouvrages, entreprises, etc.) enrichissent un modèle commun.



FIGURE 3.2 – Bâtiment d'accueil de l'UTBM sur le site de Belfort

Avec cette norme, la productivité est améliorée, les pertes et les altérations de données sont fortement réduites. Ce format permet de décrire des bâtiments à la fois de manière géométrique et sémantique. Par exemple, la classe IFCDoor permet de regrouper, au sein d'un même concept, la géométrie d'une porte, la description des matériaux, mais aussi les liens de la porte avec la pièce, le mur, etc.

En tout premier lieu, nous avons développé un cadre de travail permettant de construire une ontologie du modèle IFC (Mendes De Farias et al. [2014]). Cette génération concerne à la fois le modèle de l'ontologie et les données à insérer dans l'ontologie. Cela nous per-

met d'obtenir une ontologie du bâtiment indépendante du contexte d'utilisation, bâtiment dont nous pouvons contrôler la cohérence d'usage, grâce aux outils du web sémantique. En effet, le passage de la spécification au format IFC d'un bâtiment à l'ontologie IFC est une opération automatique. Cette génération automatique nous permet d'extraire, des fichiers IFC, les éléments d'un environnement réel sans intervention ou parti pris humain. Ces données du bâtiment sont la base de la modélisation de l'environnement de simulation. De plus, la création et la validation de l'intégrité du bâtiment, deux opérations nécessitant des connaissances expertes dans nombre de domaines, sont grandement facilitées par cette génération automatique.

L'intelligence des agents virtuels repose sur deux choses : la connaissance à laquelle ils ont accès et leur capacité à raisonner. Ces connaissances et cette capacité à raisonner amènent un agent à être autonome. La formalisation de ces connaissances sémantiques et génériques sous forme d'ontologie permet non seulement de pallier les problèmes de clarté, de cohérence et de possibilité de réutilisation, mais en plus d'utiliser des outils du web sémantique comme les raisonneurs. Les raisonneurs sémantiques permettent de raisonner sur des connaissances préalablement modélisées. La seule contrainte réside dans le niveau de formalisation de l'ontologie qui doit être décidable. Appliqué aux simulations d'agents intelligents, cela permet à un agent de prendre des décisions en fonction de l'état de son environnement et de planifier des actions si ses connaissances à un instant donné le permettent.

Dans le domaine des SMA, la pertinence des raisonnements d'un agent virtuel est fonction de la qualité du programme qui gère l'intelligence de l'agent. La création de cette intelligence nécessite des connaissances expertes dans le domaine de l'intelligence artificielle. En effet, la complexité des algorithmes en charge de l'intelligence des agents provient du nombre important de choix de scénarios possibles. Face à une situation, un agent a un ou plusieurs choix possibles. Plus l'environnement de simulation est important et complexe, plus l'intelligence d'un agent est difficile à programmer.

Pour pallier ce problème de complexité de programmation de l'intelligence des agents, nous proposons un modèle supplémentaire, permettant d'utiliser les raisonneurs sémantiques. Ce modèle permet de modéliser des objets interactifs. À partir du profil d'un agent (ses connaissances et capacités) et du contexte de la simulation (l'objectif et les données de l'ensemble de la simulation), la sémantique nous permet de présélectionner un sous-ensemble cohérent des choix disponibles à l'agent.

Comme le montre la figure 3.1, nous proposons une solution permettant de résoudre les problèmes de navigabilité et de planification d'actions des agents dans un environnement 3D pour les simulations virtuelles. Pour cela, nous mettons en place des outils permettant de décrire la topologie et la nature de l'environnement de simulation. Notre objectif est de montrer qu'il est possible de faciliter la conception de comportements complexes et réalistes pour la simulation à base d'agents dans des environnements 3D sémantiquement enrichis. Pour cela, la présentation de la contribution est scindée en

plusieurs chapitres. Le premier chapitre, intitulé **??**, concerne la définition de la structure de l'environnement et l'ajout d'une couche sémantique à la définition de l'environnement. Cette sémantique décrit les interactions possibles entre les agents et les objets. La base du travail présenté dans ce chapitre est la description de l'ontologie produite pour répondre à la problématique d'un environnement enrichi. Il s'agit donc de définir la façon dont les informations sur les interactions sont modélisées.

Le deuxième chapitre, intitulé **??**, permet de décrire l'utilisation de cette nouvelle connaissance afin d'améliorer le processus de planification des agents. Il s'agit de décrire les contraintes ajoutées au modèle pour que le raisonnement produit soit celui attendu.

MODÈLE D'ENVIRONNEMENT INFORMÉ SÉMANTIQUEMENT ENRICHİ

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place des outils permettant de décrire la topologie et la nature de l'environnement de simulation. Le but est de montrer qu'il est possible de faciliter la conception de comportements complexes et réalistes pour la simulation à base d'agents dans des environnements 3D sémantiquement enrichis. Ce chapitre concerne la définition de la structure de l'environnement et l'ajout d'une couche sémantique à la définition de l'environnement. Cette sémantique décrit les interactions que les agents peuvent avoir avec les objets de l'environnement. Le travail présenté dans ce chapitre correspond à la description de l'ontologie produite pour répondre à la problématique d'un environnement enrichi.

Ce chapitre est confidentiel.

5

MÉCANISMES À BASE DE RÈGLES POUR LA PLANIFICATION ET LA NAVIGATION

Ce chapitre a pour but de décrire l'utilisation de l'environnement enrichi afin d'aider le processus de planification des agents. Il s'agit de décrire les contraintes ajoutées au modèle pour que le raisonnement produit soit celui attendu. Le but est de montrer qu'il est possible de faciliter la conception de comportements complexes et réalistes pour la simulation à base d'agents dans des environnements 3D sémantiquement enrichis.

Ce chapitre est confidentiel.

6

CONCLUSION

Ce chapitre est confidentiel.



APPLICATION

NAVIGATION DE PIÉTONS DANS DES BÂTIMENTS EN 3D : L'EXEMPLE DE L'ÉVACUATION

Ce chapitre présente l'architecture proposée pour mettre en pratique tous les éléments présentés jusque-là dans le cadre d'une mise en application au contexte de navigation de piétons dans des bâtiments en 3D. Cette architecture regroupe à la fois les outils sémantiques (Stardog et Pellet) et les différents environnements et framework SMA (JaSIM et Janus). Ensuite, la représentation de l'environnement étant double (géométrique et sémantique), un processus de création de l'environnement sera présenté pour chacune des représentations. La suite du chapitre propose de suivre la logique interne à un agent intelligent. Enfin, ce chapitre propose de suivre pas à pas l'évolution des connaissances acquises et des raisonnements effectués par l'agent au cours du développement d'un cas pratique.

Ce chapitre est confidentiel.

IV

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

L'objectif initial de cette thèse était d'étudier une voie différente de représentation d'un environnement dans un système multi-agents.

Les travaux présentés dans cette thèse proposent de capitaliser l'expérience acquise dans le domaine du web sémantique sur les ontologies et les moteurs d'inférence associés pour faciliter la conception et le développement de comportements intelligents pour des agents évoluant dans des univers virtuels. L'objectif est de **fournir aux agents une approche générique pour gérer leur représentation du monde et raisonner sur cette représentation.**

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la simulation multi-agents appliquée à la simulation d'individus dans des bâtiments 3D virtuels. Un système multi-agents est un environnement complexe décrit par trois composantes : les agents, l'environnement et la simulation. Il existe dans ce domaine de nombreux champs d'études liés à chacune de ces composantes. Notre état de l'art du domaine des systèmes multi-agents a fait apparaître deux enjeux importants : la modélisation de l'environnement virtuel et la génération de comportements individuels et collectifs (plus particulièrement le problème de la navigabilité et le problème de planification d'action).

Pour répondre à ces deux enjeux, nous avons proposé, dans la partie contribution, une modélisation de l'environnement sous la forme d'une ontologie. Dans la seconde partie de la contribution, nous avons étendu cette ontologie pour modéliser la partie interactionnelle des éléments de l'environnement permettant de proposer une modélisation d'un comportement réaliste d'agents virtuels. De plus, pour répondre à des impératifs de réalisme de l'environnement bâti, nous avons fait le choix d'utiliser des maquettes numériques produites par les architectes lors d'un processus de conception de bâtiment défini par la loi Mop, no 85-704 du 12 juillet 1985. La loi Mop est une loi française qui met en place, pour les marchés publics, la relation entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre et qui définit les différentes étapes de la conception d'un bâtiment. Comme supports à ce processus, les logiciels de conception assistée par ordinateur sont utilisés par les architectes pour réaliser la maquette numérique du bâtiment avant sa construction. C'est cette maquette, au format IFC, que nous avons utilisée dans notre approche

pour construire l'environnement. Ce choix nous permet de disposer d'un système flexible utilisable dans n'importe quel processus de construction mené dans le cadre de cette loi. Cela implique que des simulations peuvent être réalisées par notre proposition pour qualifier le niveau de navigabilité de tout bâtiment lors de son étape de conception.

Notre solution permet d'identifier dynamiquement dans l'environnement les zones et les points de passage logiques adaptés à la connaissance experte du domaine. Cet environnement sémantiquement enrichi permet de réaliser des raisonnements en vue de faciliter la conception de comportements complexes et réalistes pour la simulation à base d'agents dans des environnements 3D virtuels et sémantiquement enrichis. Il s'agit de décrire les contraintes ajoutées au modèle pour que le raisonnement produit soit celui attendu. Nous avons représenté l'ensemble de ces contraintes sous la forme de règles logiques. Le système que nous avons défini permet de réduire la complexité d'écriture des programmes habituels dans ce domaine et surtout de permettre au système de traiter dynamiquement des sous-objectifs qui émergent lors du parcours de l'agent pour atteindre l'objectif préalablement fixé.

L'implémentation de notre solution est basée sur une architecture à deux niveaux, le premier niveau concerne la modélisation sémantique et le raisonnement avec le triplestore Stardog et le raisonneur Pellet. Le second niveau correspond à un cadre de travail pour les simulations multi-agents avec la gestion de la simulation et de l'environnement avec JaSIM. Ce niveau est complété par l'environnement Janus, plate-forme multi-agents focalisée sur l'esprit des agents et l'exécution d'un système multi-agents.

Le résultat de notre travail est un environnement de simulation multi-agents pour environnement virtuel 3D dont la conception ne nécessite pas de connaissances expertes dans tous les domaines de compétences qu'impliquent un projet dans le bâtiment.

De plus, dans le cadre de la problématique de navigation des agents, l'architecture fournie est adaptable sans modification à tout bâtiment déjà modélisé en IFC. Notre solution est extensible, sous condition de modifier le modèle, à l'aide d'un outil dédié (??, voir annexe ??, page ??) qui permet d'accompagner des créateurs de simulation pour annoter l'environnement dans un objectif autre que le nôtre.

PERSPECTIVES

VERS UNE MÉTHODOLOGIE COMPLÈTE POUR LA CRÉATION DE SIMULATION MULTI-AGENTS EN ENVIRONNEMENT SÉMANTIQUEMENT ENRICHIS

Les travaux de recherche proposés dans cette thèse présentent une première étape vers la création d'une méthode générique d'élaboration de simulation multi-agents voire de système multi-agents sur la base des outils proposés par le web sémantique. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 : État de l'art, les méthodes actuelles proposent soit une évolution de la définition de l'agent, soit de l'environnement, soit des méthodes appliquées à une application particulière. La maquette numérique (au format IFC) utilisée nous permet d'extraire les éléments dont nous avons besoin pour notre travail. Cette extraction est réalisée de manière logique par une simple règle (voir la règle ??). Cette règle correspond à notre besoin. Mais la maquette numérique est beaucoup plus riche et cette richesse d'information permet une haute flexibilité pour de nombreux cas d'applications et diverses problématiques à traiter. Du côté de la sémantique appliquée aux objets, elle est adaptative. Par exemple, nous partons du principe qu'une porte est un connecteur entre espaces de vie et l'utilisation d'une porte permet de faire passer un agent d'un côté à l'autre de la porte. Par contre, nous laissons à JaSIM le soin de gérer le déplacement dans les espaces de vie, tout simplement parce ce déplacement prend en compte les contraintes physiques de l'environnement et de l'agent et que JaSIM sait déjà le faire. Il est possible de faire raisonner le système sur le modèle afin de produire les mêmes calculs. Il est possible aussi d'ajouter à notre modèle des points clés dans les espaces de vie afin d'établir des cartes de cheminement plus complètes, comme présentées dans l'état de l'art à la section 2.6.3 (page 24). Notre apport et notre application se limitent à proposer des solutions génériques pour la navigation et la planification d'actions mais les connaissances disponibles nous permettraient d'aller plus loin en proposant un cadre plus large de travail.

QUALIFICATION AUTOMATIQUE DE L'USAGE DU BÂTIMENT

Une perspective plus pragmatique permet d'apporter une première brique à la qualification automatique de bâtiments en exploitant des techniques d'évaluation basées sur la simulation multi-agents. Par l'analyse du parcours des agents que l'on considère capables d'affronter des situations inconnues, il devient possible de détecter des problèmes de modélisation du bâtiment, que ce soit à un niveau géométrique ou sémantique. Imaginons le contexte d'une simulation d'évacuation. Les agents ont donc pour objectif de sortir du bâtiment. Au départ de la simulation, les positions de démarrage des agents sont choisies de manière aléatoire dans les espaces de vie disponibles. Si un agent se trouve dans une zone qu'il ne peut pas quitter, il peut y avoir un problème de structure du bâtiment, comme l'oubli d'une porte pour sortir de la pièce. Cette qualification peut intervenir à un autre niveau. Le domaine du bâtiment est régi par de multiples réglementations. En partant du point de vue de l'hygiène et de la sécurité du bâtiment, il se peut qu'une règle impose de trouver des toilettes à chaque étage. Il devient alors très facile de détecter au cours de la simulation si l'agent parcourt un ou plusieurs étages avant de trouver les toilettes. Cela passerait par la simple prise en compte de la notion d'étage (en plus de celle d'espace de vie), déjà contenue dans les IFC et de celle de sémantisation d'un espace de vie en toilettes.

SYSTÈME DE RECOMMANDATION POUR L'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION

Une autre piste d'évolution de notre travail consiste à aider la prise de décision d'un agent par une pondération des possibilités en fonction du profil de l'agent et du contexte de la simulation au moment d'un choix d'action. En effet, tous les agents ne sont pas égaux face à une situation particulière. Toutes les situations ne se résolvent pas de la même façon selon le contexte de simulation non plus. Gardons l'exemple de la situation de déplacement dans un bâtiment et prenons deux profils d'agents différents, un agent représentant une personne valide (agent valide) et un agent représentant une personne à mobilité réduite (agent handicapé). Dans un contexte simple de vie dans la simulation et l'objectif (ou sous-objectif) descendre d'un étage, l'agent valide utilisera les escaliers, car plus rapide et pas l'ascenseur. Il s'agit ici d'un choix qui lui est possible de faire. Il est donc plus enclin à utiliser l'escalier que l'ascenseur. Ce n'est pas la même chose pour un agent handicapé. Dans son cas, il lui est très difficile d'utiliser les escaliers. On voit dans ce cas que, selon le profil de l'agent, les choix sont différents. Si on change de contexte, et que l'on prend le cas d'une évacuation, les choses changent encore, car il est peu recommandé, voir interdit d'utiliser des ascenseurs dans ce cas. Pour l'agent valide, rien de spécial, il utilisait déjà préférentiellement l'escalier. Par contre, pour l'agent handicapé,

il lui est difficile de prendre les escaliers et interdit de prendre l'ascenseur. Le choix est donc difficile voir impossible pour une machine, car deux règles de fonctionnement du cadre de simulation iraient en sens inverse. Dans le modèle présenté, un tel système n'est pas mis en place car nous n'avons pas travaillé sur la problématique du choix d'action, nos actions étant limitées au déplacement et à l'utilisation d'objets interactifs. On peut imaginer un système de pondération permettant selon le profil et le contexte de porter le choix d'un agent vers une solution plutôt qu'une autre. Cela permettrait de gagner en précision pour des cas d'applications particuliers, mais occasionnerait en même temps une perte de généralité de notre méthode.

V

ANNEXES

Les annexes sont confidentielles.

VI

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIE

- Dean Allemang and James Hendler. **Semantic web for the working ontologist : effective modeling in RDFS and OWL**. Elsevier, 2011.
- Frédéric Amblard. **Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées, Application à des modèles de dynamiques d'opinions**. PhD thesis, Cemagref, Clermont-Ferrand, France, Décembre 2003.
- M. Anderson, E. McDaniel, and S. Chenney. Constrained animation of flocks. In **ACM SIGGRAPH/European Symposium on Computer Animation (SCA'03)**, pages 286–297, 2003.
- K. Ashida, S. Lee, J. Allbeck, H. Sun, N. Balder, and D. Metaxas. Pedestrian : creating agent behaviors through statistical analysis of observation data. In **IEEE Computer Animation**, pages 84–92, Seoul, Korea, 2001.
- A. Aubel, R. Boulic, and D. Thalmann. Real-time display of virtual humans : Levels of details and impostors. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, 10(2) :207–217, 2000.
- Franz Baader. **The description logic handbook : theory, implementation, and applications**. Cambridge university press, 2003.
- Franz Baader and Werner Nutt. Basic description logics. In **Description logic handbook**, pages 43–95, 2003.
- Franz Baader, Carsten Lutz, and Boontawee Suntisrivaraporn. Cel—a polynomial-time reasoner for life science ontologies. In **Automated Reasoning**, pages 287–291. Springer, 2006.
- Norman I Badler, Bonnie L Webber, Welton Becket, Christopher W Geib, Michael B Moore, Catherine Pelachaud, Barry D Reich, and Matthew Stone. Planning and parallel transition networks : Animation's new frontiers. **Center for Human Modeling and Simulation**, page 91, 1995.
- L.M. Barros, A.T. Da Silva, and S.R. Musse. Petrosim : An architecture to manage virtual crowds in panic situations. In **Computer Animation and Social Agents**, pages 111–120, 2004.
- Alain Bastide. Six sites pour tout savoir sur la rfid, October 2008. URL <http://www.indexel.net/materiels/six-sites-pour-tout-savoir-sur-la-rfid.html>.

- O.B. Bayazit, J.-M. Lien, and N.M. Amato. Better group behaviors in complex environments using global roadmaps. In **Artificial Life '02**, 2002.
- Florian Behe, Stéphane Galland, Nicolas Gaud, Christophe Nicolle, and Abderrafiaa Koukam. An ontology-based metamodel for multiagent-based simulations. **International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory**, 40 :64–85, January 2014a.
- Florian Behe, Christophe Nicolle, Stéphane Galland, Nicolas Gaud, and Abderrafiaa Koukam. **Using Semantics in the Environment for Multiagent-based Simulation**, pages 1–7. IGI Global, July 2014b. to be published.
- Tim Berners-Lee. Plenary at www geneva, 1994. URL <http://www.w3.org/Talks/WWW94Tim/>.
- Tim Berners-Lee. Giant global graph, October 2007. URL <http://dig.csail.mit.edu/breadcrumbs/node/215>.
- Tim Berners-Lee, James Hendler, Ora Lassila, et al. The semantic web. **Scientific american**, 284(5) :28–37, 2001.
- Bruce Mitchell Blumberg. **Old tricks, new dogs : ethology and interactive creatures**. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- E. Bouvier, E. Cohen, and L. Najman. From crowd simulation to airbag deployment : particle systems, a new paradigm of simulation. **Journal of Electrical Imaging**, 6(1) : 94–107, 1997.
- Michael Bratman. Intention, plans, and practical reason. 1987.
- A. Braun, Bodmann B.E.J., L.P.L. Oliveira, and S.R. Musse. Modeling individual behaviors in crowd simulation. In **Computer Animation and Social Agents**, pages 143–148, New Brunswick, NJ, USA, 2003.
- Adriana Braun, Bardo E. J. Bodmann, and Soraia R. Musse. 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, 2005. ACM. ISBN 1-59593-098-1.
- D. Brogan and J. Hodgins. Group behaviors for systems with significant dynamics. **Autonomous Robots**, 4 :137–153, 1997.
- Rodney A Brooks. Intelligence without reason. **The artificial life route to artificial intelligence : Building embodied, situated agents**, pages 25–81, 1995.
- Jocelyn Buisson, Stéphane Galland, Nicolas Gaud, Mikaël Gonçalves, and Abderrafiaa Koukam. Real-time collision avoidance for pedestrian and bicyclist simulation : a smooth and predictive approach. In Ansar-ul-haque Yasar and Luk Knapen, editors,

- 2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS13)**, pages 815–820, Halifax, Nova Scotia, Canada, June 2013. Elsevier. Best Paper Award.
- Joel Chestnutt, James Kuffner, Koichi Nishiwaki, and Satoshi Kagami. Planning biped navigation strategies in complex environments. In **IEEE Int. Conf. Hum. Rob., Munich, Germany**, 2003.
- Allan M. Collins and M. Ross Quillian. Retrieval time from semantic memory. **Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior**, 8(2) :240 – 247, 1969. ISSN 0022-5371.
- R. Conte, N. Gilbert, and J. Simao Sichman. MAS and social simulation : A suitable commitment. In **First International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation**, volume 1534 of **LNCS**, pages 1–9. Springer-Verlag, 1998.
- Volker Coors. 3d-gis in networking environments. **Computers, Environment and Urban Systems**, 27(4) :345–357, 2003.
- Patrick Coquillard and David R.C. Hill. **Modélisation et Simulation des Ecosystèmes**. Masson, 1997.
- N. Courty and S.R. Musse. Simulation of large crowds in emergency situations including gaseous phenomena. In **Computer Graphics**, 2005.
- Brian McBride Dan Brickley, R.V. Guha. Rdf vocabulary description language 1.0 : Rdf schema, February 2004. URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-schema-20040210/>.
- Jonathan Demange, Stéphane Galland, and Abderrafiaa Koukam. Analysis and design of multi-level virtual indoor environment. **Int. Journal Systemics and Informatics World Network**, 10 :145–152, July 2010. ISSN 2044-7272.
- Marc Denecker and Antonis Kakas. Abduction in logic programming. In **Computational Logic : Logic Programming and Beyond**, pages 402–436. Springer, 2002.
- A. Drogoul. **De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes**. PhD thesis, University Paris 6, Paris, France, November 1993.
- A. Drogoul and S. Picault. Microbes : Vers des collectivités de robots socialement situés. In M.-P. Gleizes and P. Marcenac, editors, **VIIèmes Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA)**, pages 265–278. Hermès, 1999.
- Kutluhan Erol, James A Hendler, and Dana S Nau. Umcp : A sound and complete procedure for hierarchical task-network planning. In **AIPS**, volume 94, pages 249–254, 1994.

- N. Farenc, S.R. Musse, E. Schweiss, M. Kallman, O. Aune, R. Boulic, and D. Thalmann. A paradigm for controlling virtual humans in urban environment simulations. **Applied Artificial Intelligence Journal, Special issue on Intelligent Artificial Environments**, 14(1) :69–91, 1999a.
- Nathalie Farenc, Ronan Boulic, and Daniel Thalmann. An informed environment dedicated to the simulation of virtual humans in urban context. In **Proceedings of EUROGRAPHICS 99**, pages 309–318, 1999b.
- J. Ferber and J.P. Müller. Influences and reactions : a model of situated multiagent systems. In **Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)**, pages 72–79, 1996.
- Jacques Ferber. **Les Systèmes Multi-Agents : Vers une Intelligence Collective**. InterEditions, 1995.
- Richard E Fikes and Nils J Nilsson. Strips : A new approach to the application of theorem proving to problem solving. **Artificial intelligence**, 2(3) :189–208, 1972.
- Paul A. Fishwick. Computer simulation : growth through extension. **Trans. Soc. Comput. Simul. Int.**, 14(1) :13–23, 1997. ISSN 0740-6797.
- Stéphane Galland, Nicolas Gaud, Jonathan Demange, and Abderrafiaa Koukam. Environment model for multiagent-based simulation of 3D urban systems. In **the 7th European Conference on Multiagent Systems (EUMAS09)**, Ayia Napa, Cyprus, December 2009. Paper 36.
- Nicolas Gaud. **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, December 2007. In French.
- John S Gero and Udo Kannengiesser. Function-behaviour-structure : A model for social situated agents. In **Workshop on cognitive modeling of agents and multi-agent interactions, International Joint Conference on Artificial Intelligence**, pages 101–107, 2003.
- Nigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch. **Simulation for the Social Scientist**. Open University Press, Maidenhead and New York, 2 edition, 2005.
- S. Goldenstein, M. Karavelas, D. Metaxas, L. Guibas, E. Aaron, and A. Goswani. Scalable nonlinear dynamical systems for agent steering and crowd simulation. **Computers & Graphics**, 25(6) :983–998, 2001.
- T. Goto, S. Kshirsagar, and N. Magnetat-Thalmann. Automatic face cloning and animation. **IEEE Signal Processing Magazine**, 18(3) :17–25, 2001.

- Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. **Knowledge Acquisition**, 5 :199–220, June 1993. ISSN 1042-8143.
- Thomas R. Gruber. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. **International Journal of Human-Computer Studies**, 43(5–6) :907 – 928, 1995. ISSN 1071-5819.
- Volker Haarslev and Ralf Müller. Racer system description. In **Automated Reasoning**, pages 701–705. Springer, 2001.
- Andy Hamilton, Hongxia Wang, Ali Murat Tanyer, Yusuf Arayici, Xiaonan Zhang, and YH Song. Urban information model for city planning. **Journal of Information Technology in Construction (ITCon)**, 10 :55–67, 2005.
- P. Heras, de, S. Schertenleib, J. Maïm, and D. Thalmann. Real-time shader rendering for crowds in virtual heritage. In **6th Int. Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage**, 2005.
- J. Hodgins and D. Brogan. Robot herds : group behaviors for systems with significant dynamics. In **Artificial Live IV**, pages 319–324, 1994.
- Douglas Holmes and Richard Stocking. Augmenting agent knowledge bases with owl ontologies. In **Aerospace conference, 2009 IEEE**, pages 1–15. IEEE, 2009.
- Ian Horrocks, Peter F. Patel-Schneider, Harold Boley, Said Tabet, Benjamin Grosz, and Mike Dean. Swrl : A semantic web rule language, May 2004. URL <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>.
- M. Kallmann, H. Bieri, and D. Thalmann. Fully dynamic constrained delaunay triangulations. **Geometric Modelling for Scientific Visualization**, pages 241–257, 2003.
- Marcelo Kallmann and Daniel Thalmann. Modeling objects for interaction tasks. In **Proc. Eurographics Workshop on Animation and Simulation**, pages 73–86, 1998.
- Hiroaki Kitano, Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi, Itsuki Noda, and Eiichi Osawa. Robo-Cup : The robot world cup initiative. In W. Lewis Johnson and Barbara Hayes-Roth, editors, **Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents)**, pages 340–347, New York, 1997. ACM Press. ISBN 0-89791-877-0.
- Chokri Koussa. **Implantation d'un système d'information géographique 3D sur Internet pour la gestion des modèles urbains**. PhD thesis, Strasbourg, 2011.
- John E Laird. It knows what you're going to do : adding anticipation to a quakebot. In **Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents**, pages 385–392. ACM, 2001.
- John E Laird, Allen Newell, and Paul S Rosenbloom. Soar : An architecture for general intelligence. **Artificial intelligence**, 33(1) :1–64, 1987.

- F. Lamarche and S. Donikian. 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), 2004.
- Nada Lavrac and Saso Dzeroski. Inductive logic programming. In **WLP**, pages 146–160. Springer, 1994.
- Jean-Louis Le Moigne. **La modélisation des systèmes complexes**. Dunod, 4ième edition, 1999. ISBN 2-04-019704-4.
- Tsai-Yen Li and Pei-Zhi Huang. Planning humanoid motions with striding ability in a virtual environment. In **Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on**, volume 4, pages 3195–3200. IEEE, 2004.
- C. Loscos, Y. Chrysanthou, and F. Tecchia. Real-time shadows for animated crowds in virtual cities. In **ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**, pages 85–92, 2001.
- C. Loscos, D. Marchal, and A. Meyer. Intuitive crowd behavior in dense urban environments using local laws. In **Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG'03)**, 2003.
- Miguel Lozano, Pedro Morillo, Daniel Lewis, Dirk Reiners, and Carolina Cruz-Neira. A distributed framework for scalable large-scale crowd simulation. In **Virtual Reality**, pages 111–121. Springer, 2007.
- Jean-Luc Lugrin and Marc Cavazza. Making sense of virtual environments : action representation, grounding and common sense. In **Proceedings of the 12th international conference on Intelligent user interfaces**, pages 225–234. ACM, 2007.
- John McCarthy and Patrick Hayes. **Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence**. Stanford University USA, 1968.
- Mehdi Mekni. Hierarchical path planning for situated agents in informed virtual geographic environments. In **Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques**, page 30. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2010.
- Tarcisio Mendes De Farias, Ana Roxin, Christophe Nicolle, and Thomas Durif. Enrichissement sémantique d'un IFC pour une extraction partielle dynamique. In Presses Universitaires de Nancy, editor, **Actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique**, page à venir, Luxembourg, Luxembourg, July 2014.
- Fabien Michel. Le modèle influence/réaction pour la simulation multi-agents. In **Premières Journées Francophones Modèles Formels de l'Interaction (MFI)**, Toulouse, France, Mai 2001.

- Fabien Michel. **Formalism, tools and methodological elements for the modeling and simulation of multi-agents systems**. PhD thesis, LIRMM, Montpellier, France, December 2004.
- Fabien Michel. Le modèle irm4s : le principe influence/réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. In **Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)**, 2006.
- S.R. Musse and D. Thalmann. A hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, 7(2) : 152–164, 2001.
- Dana S Nau, Tsz-Chiu Au, Okhtay Ilghami, Ugur Kuter, J William Murdock, Dan Wu, and Fusun Yaman. Shop2 : An htn planning system. **J. Artif. Intell. Res.(JAIR)**, 20 :379–404, 2003.
- C. Niederberger and M. Gross. Hierarchical and heterogenous reactive agents for real-time simulation. **Computer Graphics Forum**, 22(3), 2003.
- Hansrudi Noser and Daniel Thalmann. Sensor-based synthetic actors in a tennis game simulation. **The Visual Computer**, 14(4) :193–205, 1998.
- D. Paiva, R. Vieira, and Musse S.R. Ontology-based crowd simulation for normal life situations. In **International Conference on Computer Graphics 2005**, 2005.
- Charles Sanders Peirce. **Collected papers of charles sanders peirce**, volume 5. Harvard University Press, 1974.
- Damien Pellier and Humbert Fiorino. Dialectical theory for multi-agent assumption-based planning. In **Multi-Agent Systems and Applications IV**, pages 367–376. Springer, 2005.
- Julien Pettré, Jean-Paul Laumond, and Thierry Siméon. A 2-stages locomotion planner for digital actors. In **Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation**, pages 258–264. Eurographics Association, 2003.
- Julien Pettré, Pablo de Heras Ciechowski, Jonathan Maïm, Barbara Yersin, Jean-Paul Laumond, and Daniel Thalmann. Real-time navigating crowds : scalable simulation and rendering : Research articles. **Computer Animation and Virtual Worlds**, 17(3-4) :445–455, 2006. ISSN 1546-4261.
- M. Ross Quillian. Word concepts : A theory and simulation of some basic semantic capabilities. **Behavioral Science**, 12(5) :410–430, 1967. ISSN 1099-1743.
- Fabien Ramos. **Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel**. PhD thesis, Marne-la-Vallée, 2003.

- Seyed Naser Razavi, Nicolas Gaud, Nasser Mozayani, and Abderrafiaa Koukam. Multi-agent based simulations using Fast Multipole Method : Application to large scale simulations of flocking dynamical systems. **Artificial Intelligence Review**, 35(1) :53–72, jan 2011. ISSN 02692821.
- Craig W. Reynolds. 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, 1987. ACM. ISBN 0-89791-227-6.
- C.W. Reynolds. Steering behaviors for autonomous characters. In **Proceedings of the Game Developers Conference**, page 763–782, 1999.
- Stuart J. Russell and Peter Norvig. **Artificial Intelligence : A Modern Approach**. Prentice Hall, (second edition 2003), 1st edition, January 1995. ISBN 0137903952.
- Richard B Scherl and Hector J Levesque. Knowledge, action, and the frame problem. **Artificial Intelligence**, 144(1) :1–39, 2003.
- Manfred Schmidt-Schauß and Gert Smolka. Attributive concept descriptions with complements. **Artificial intelligence**, 48(1) :1–26, 1991.
- H. Seo, L. Yahia-Cherif, T. Goto, and N. Magnetat-Thalmann. Genesis : Generation of e-population based on statistical information. In **Computer Animation '02**. IEEE Press, 2002.
- Robert E. Shannon. Simulation modeling and methodology. **SIGSIM Simul. Dig.**, 8(3) : 33–38, 1977. ISSN 0163-6103.
- Rob Shearer, Boris Motik, and Ian Horrocks. Hermit : A highly-efficient owl reasoner. In **OWLED**, volume 432, 2008.
- Evren Sirin, Bijan Parsia, Bernardo Cuenca Grau, Aditya Kalyanpur, and Yarden Katz. Pellet : A practical owl-dl reasoner. **Web Semant.**, 5(2) :51–53, June 2007. ISSN 1570-8268.
- Robert Sternberg. **Cognitive psychology**. Cengage Learning, 2008.
- F. Tecchia, C. Loscos, and Y. Chrysanthou. Image-based crowd rendering. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 22(2) :36–43, 2002.
- D. Thalmann, H. Grillon, J. Maim, and B. Yersin. Challenges in crowd simulation. In **CyberWorlds, 2009. CW '09. International Conference on**, pages 1–12, 2009.
- Daniel Thalmann and Soraia Raupp Musse. **Crowd simulation**. Springer, 2007. ISBN 978-1-8462-8824-1.

- Edward Thomas, Jeff Z Pan, and Yuan Ren. Trowl : Tractable owl 2 reasoning infrastructure. In **The Semantic Web : Research and Applications**, pages 431–435. Springer, 2010.
- Thanh-Hai Trinh, Ronan Querrec, Pierre De Loor, and Pierre Chevaillier. Ensuring semantic spatial constraints in virtual environments using uml/ocl. In **Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**, pages 219–226. ACM, 2010.
- Dmitry Tsarkov and Ian Horrocks. Fact++ description logic reasoner : System description. In **Automated reasoning**, pages 292–297. Springer, 2006.
- X. Tu and D. Terzopoulos. Artificial fishes : Physics, locomotion, perception, behavior. In **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, volume 28, pages 43–50, Orlando, FL, USA, 1994. ACM.
- B. Ulicny and D. Thalmann. Towards interactive real-time crowd behavior simulation. **Computer Graphics Forum**, 21(4) :767–775, 2002.
- B. Ulicny, P. Heras Ciechomski, de, and D. Thalmann. Crowd-brush : Interactive authoring of real-time crowd scenes. In **ACM SIGGRAPH/European Symposium on Computer Animation (SCA'04)**, pages 243–252, 2004.
- J. Van den Berg, Ming Lin, and D. Manocha. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. In **Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on**, pages 1928–1935, may 2008.
- Viet-Hoang Vu. **Contribution to abductive reasoning with concepts in description logics (an application to ontology-based semantic matchmaking for tourism information systems)**. PhD thesis, 2011.
- M. Wand and W. Strasser. Multi-resolution rendering of complex animated scenes. **Computer Graphics Forum**, 21(3), 2002.
- Danny Weyns and Tom Holvoet. Formal model for situated multi-agent systems. **Formal Approaches for Multi-agent Systems, Special Issue of Fundamenta Informaticae**, 63(2-3), 2004. Eds. B. Dunin-Keplicz, R. Verbrugge.
- Danny Weyns, Elke Steegmans, and Tom Holvoet. Towards active perception in situated multi-agent systems. **EUMAS, Special Issue of Journal on Applied Artificial Intelligence (AAI)**, 18(9-10) :867–883, October–December 2004.
- Danny Weyns, Andrea Omicini, and James Odell. Environment as a first class abstraction in multiagent systems. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, 14(1) :5–30, 2007. ISSN 1387-2532.

Jane Wilhelms and R Skinner. An interactive approach to behavioral control. In **Graphics Interface**, volume 89, pages 1–8, 1989.

W3C Working Group. W3c semantic web faq, October 2009. URL <http://www.w3.org/2001/sw/SW-FAQ>.

W3C Working Group. Owl 2 web ontology language - document overview (second edition), December 2012a. URL <http://www.w3.org/TR/owl-overview/>.

W3C Working Group. Semantic web stack, July 2012b. URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Semantic_Web_Stack.png.

W3C Working Group. Sparql 1.1 overview, March 2013. URL <http://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>.

Bernard P. Zeigler, Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer. **Theory of Modeling and Simulation**. Academic Press, 2nd edition edition, 2000.

Jeffrey Zeldman. A list apart : Web 3.0, January 2006. URL <http://alistapart.com/article/web3point0>.

TABLE DES FIGURES

1.1	Plan de la thèse	9
2.1	Les quatre aspects d'un modèle de simulation multi-agents Michel [2004] .	16
2.2	Distinction entre l'esprit et le corps d'un agent dans le contexte du principe Influence/Réaction [Michel, 2004]	18
2.3	Pile du web sémantique [Working Group, 2012b]	31
2.4	Familles de logiques descriptives	39
3.1	Problématiques SMA et sémantique	52
3.2	Bâtiment d'accueil de l'UTBM sur le site de Belfort	53

LISTE DES TABLES

2.1	Comparatif des systèmes de sélection d'actions réactifs	21
2.2	Comparatif des systèmes cognitifs de sélection d'actions	23
2.3	Expressivité des logiques descriptives.	35
2.4	Constructeurs, syntaxes et symboles des logiques descriptives.	35
2.5	Constructeurs, syntaxes et sémantique des logiques descriptives.	36
2.6	Constructeurs OWL	38
2.7	Axiomes OWL	39
2.8	Comparatif technique des raisonneurs	44

Résumé :

La thèse défendue dans ce manuscrit s'intéresse à la simulation multi-agents appliquée à la simulation d'individus dans des bâtiments 3D virtuels. Pour ce faire, nos travaux proposent de capitaliser l'expérience acquise dans le domaine du web sémantique sur les ontologies et les moteurs d'inférence associés pour faciliter la conception et le développement de comportements intelligents pour des agents évoluant dans des univers virtuels. L'objectif est de fournir aux agents une approche générique pour gérer leur représentation du monde et raisonner sur cette représentation. Pour cela, la problématique centrale repose sur la définition d'une ontologie décidable modélisant l'ensemble des connaissances contenues dans l'environnement virtuel 3D pour enrichir sémantiquement l'environnement d'une simulation multi-agents. Cette ontologie décidable a pour but d'offrir la possibilité d'intégrer les moteurs d'inférence sémantique au cœur de la modélisation de comportements d'agents mobiles dans un environnement virtuel.

Mots-clés : agents intelligents, environnement intelligent, simulation multi-agents, web sémantique, ontologie, raisonneur, triplestore

Abstract:

This thesis focuses on multi-agent simulation applied to the simulation of individuals in virtual 3D buildings. To do this, our work suggests to capitalize on the experience gained in the field of semantic web ontologies and inference engines to facilitate the design and development of intelligent behavior for agents operating in virtual worlds. The goal is to provide to agents a generic approach to managing their representation of the world and reason about this representation. For this, the central problem is based on the definition of a decidable ontology modeling all of the knowledge contained in the virtual 3D environment to enrich semantically the environment of a multi-agent simulation. This decidable ontology aims to provide an opportunity to integrate semantic inference engine at the heart of modeling behavior of mobile agents in a virtual environment.

Keywords: smart agents, smart environment, multi-agents based simulations, semantic web, ontology, reasoner, triplestore

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features a stylized orange horizontal bar on the left, followed by the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font.