



HAL
open science

Apport de l'intelligence artificielle au domaine des villes intelligentes : application à l'assistance des déplacements des personnes à mobilité réduite

Nathan Aky

► **To cite this version:**

Nathan Aky. Apport de l'intelligence artificielle au domaine des villes intelligentes : application à l'assistance des déplacements des personnes à mobilité réduite. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de la Réunion; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2022. Français. NNT : 2022LARE0008 . tel-03689871

HAL Id: tel-03689871

<https://theses.hal.science/tel-03689871v1>

Submitted on 7 Jun 2022

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.

Thèse de Doctorat de l'Université de la Réunion

Spécialité

INFORMATIQUE/MATHEMATIQUES

présentée par

M. Nathan AKY

Thèse présentée au Département d'informatique
en vue de l'obtention du grade de **philosophiæ doctor (Ph.D.)**
de l'Université de Sherbrooke
et du grade de
Docteur de l'Université de la Réunion

**Apport de l'intelligence artificielle au domaine des villes intelligentes :
Application à l'assistance des déplacements des personnes à mobilité réduite**

Soutenue publiquement le 6 mai 2022 devant le jury composé de

Pr. Flavien Balbo

Pr. Kévin Bouchard

Pr. Hélène Pigot

Dr. Valérie Camps

Pr. Etienne Payet

Pr. Rémy Courdier

Pr. Sylvain Giroux

Dr. Denis Payet

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examinatrice

Président du jury

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse

Co-encadrant de thèse

Cette thèse a reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne
(Fonds Européen de Développement Régional – FEDER) dans le cadre du
Programme Opérationnel de Coopération Territoriale

Remerciements

Au-delà de son aspect scientifique, cette thèse a été une aventure humaine qui m'a amené à réfléchir sur notre monde, notre société et nos valeurs. Je souhaite donc remercier tous ceux qui m'ont amené à me poser ces questions.

Tout d'abord, je remercie Rémy Courdier de m'avoir donné l'occasion de me lancer dans cette aventure et d'avoir dirigé dans cette thèse. Je remercie également Denis Payet pour son encadrement. Je vous suis reconnaissant de m'avoir fait découvrir le monde des systèmes multi-agents.

Je remercie également Sylvain Giroux, qui m'a fait confiance et m'a apporté son soutien alors que nous ne nous connaissions pas avant cette thèse, et malgré les milliers de kilomètres qui nous séparent.

Je voudrais également remercier chaleureusement les membres de mon comité de suivi de thèse, qui m'a prodigué les meilleurs conseils et m'ont donné un regard extérieur précieux sur mes travaux.

Merci à vous Flavien Balbo, Kévin Bouchard, Etienne Payet, Hélène Pigot et Valérie Camps d'avoir accepté de participer en qualité de jury de cette thèse. Je vous suis reconnaissant pour l'intérêt et le regard critique que vous apportez à cette thèse.

Je tiens également à remercier chaleureusement François Racicot-Lanoue pour la coopération que l'on a pu mettre en place malgré la distance. Merci pour le regard nouveau que tu m'as permis d'apporter à mes travaux.

Je ne pourrai pas tous vous citer, mais merci à David Grosser pour sa bienveillance et ses conseils, merci également à Etienne Payet, Régis Girard, Pascal Anelli, Dominique Gay, Pierre-Ugo Tournoux, Christian Delhommé, Magalie Clain et tous les autres membres du LIM, qui m'ont accueilli et m'ont permis d'effectuer mes travaux de recherche dans de bonnes conditions. J'en profite également pour remercier tous mes camarades avec qui j'ai partagé les bureaux et avec qui j'ai pu avoir des bons moments et des discussions riches : Richard Fontaine, Kévin Hoarau, Tahina Ralitera et Irène Velontrasina.

Je vous remercie également tous, vous qui avez contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. J'en profite donc pour remercier Raphaël, ainsi que Fabien et Florian.

Enfin, je veux exprimer toute ma gratitude à ma Famille. Emile et Gaëlle, qui m'ont permis de rester fort pendant les épreuves difficiles. Merci à vous, Papa et Maman, de m'avoir ouvert sur ce monde et de continuer à croire en moi. Merci à Fiona de m'avoir épaulé inconditionnellement pendant cette épreuve.

Ce travail est le nôtre.

*A ceux d'avant.
Pour ceux d'après.*

Résumé

La transformation des villes en « villes intelligentes » est un des objectifs que les gouvernements visent depuis une dizaine d'années. Cette transformation touche à plusieurs aspects de la ville, dont l'éco-citoyenneté, la gouvernance durable ou encore la mobilité intelligente. C'est sur cet aspect que nos travaux se focalisent. En effet, malgré une certaine progression depuis quelques années, les personnes à mobilité réduite sont souvent oubliées dans la question de l'amélioration des déplacements urbains grâce aux technologies de l'information et de la communication.

Parmi ces technologies, l'intelligence artificielle englobe plusieurs domaines et est en plein essor. Un de ces derniers, l'intelligence ambiante vise à la conception de services interconnectés interagissant avec l'environnement physique réel pour offrir des services visant à supporter les activités humaines. C'est dans ce contexte que se placent nos travaux : l'étude et la construction d'un système ambiant dédié à l'assistance des personnes à mobilité réduite en milieu urbain.

Or, plusieurs verrous contraignent la conception d'un tel système. Tout d'abord, dans ces domaines, nous avons remarqué que le vocabulaire des termes issus de ces domaines était inconstant, et que toute la communauté scientifique n'est pas unanime sur la définition de certains concepts. Notre première contribution consiste en une ontologie, décrite en OWL, qui recouvre l'ensemble des éléments et concepts nécessaires à la conception de ce type de systèmes.

Ensuite, plusieurs études scientifiques actuelles soulignent le manque de modèle d'architecture générique pour de tels systèmes. Ce faisant, la myriade de solutions proposées dans ce domaine souffre de limites fortes sur le plan de l'interopérabilité et de la réutilisabilité des travaux. C'est pourquoi notre deuxième contribution se traduit en un modèle générique facilitant la conception de tout type de système ambiant dédié à l'assistance. Ce modèle s'appuie sur l'ontologie proposée, tout en gardant les utilisateurs au centre du modèle.

Enfin, il a été remarqué que les systèmes ambiants dédiés à l'assistance sont déployés de manière ad-hoc. Soit en simulation, en évaluant statistiquement les sorties du système. Soit en milieu réel, où l'évaluation du système se fait par la même observation statistique des sorties, ou par un questionnaire d'évaluation soumis aux utilisateurs.

Nous proposons une approche originale de mise en œuvre de tels systèmes. D'une part, cette dernière se base sur une mise en opération du système par simulation hybride, sur laquelle les éléments réels sont ajoutés progressivement, jusqu'à un déploiement en milieu réel complet. D'autre part, dans le but d'évaluer l'impact direct du système, nous proposons l'analyse de son impact par les outils issus du domaine de l'analyse du réseau social des utilisateurs.

Mots-clés :

Systèmes collectifs adaptatifs, Modélisation multi-agents, Simulation Hardware-in-the-Loop, Informatique ubiquitaire, Ville intelligente, Assistance à la personne

Abstract

The transformation of cities into "smart cities" is one of the goals that governments have been aiming at for the last ten years. This transformation affects several aspects of the city, including eco-citizenship, sustainable governance, and smart mobility. It is on this aspect that our work focuses. Indeed, despite a certain progress in the last few years, people with reduced mobility are often forgotten when it comes to improving urban travel thanks to information and communication technologies.

Among these technologies, artificial intelligence is booming and encompasses several fields. Among them, ambient intelligence aims at the design of interconnected services interacting with the real physical environment to provide services to support human activities. It is in this context that our work is placed: the study and construction of an ambient system dedicated to the assistance of people with reduced mobility in an urban environment.

However, the design of such a system is constrained by several obstacles. First, we noticed that the vocabulary of the terms coming from these domains was inconstant, and that the whole scientific community is not unanimous on the definition of certain concepts. Our first contribution consists in an ontology, described in OWL, which covers all the elements and concepts necessary for the design of this type of system.

Secondly, several current scientific studies underline the lack of a generic architecture model for such systems. As a result, the myriad of solutions proposed in this field suffer from strong limitations in terms of interoperability and reusability of the works. Therefore, our second contribution translates into a generic model facilitating the design of any type of ambient system dedicated to assistance. This model is based on the proposed ontology, while keeping the users at the center of the model.

Finally, it has been noticed that ambient systems dedicated to assistance are deployed in an ad-hoc way, either in simulation or in real environment, with an evaluation limited to a statistical analysis of the outputs, or by an evaluation questionnaire submitted to users. We propose an original approach to the implementation of such systems. On the one hand, this approach is based on a simulation-based implementation of the system, on which real elements are progressively added, until a complete deployment in real environment. On the other hand, to evaluate the direct impact of the system, we introduce the analysis of its impact by tools coming from the field of user social network analysis.

Keywords:

Adaptative collective systems, Multi-agent modeling, Hardware-in-the-Loop Simulation, Ubiquitous computing, Smart Cities , Assistive systems

Table des matières

Remerciements.....	1
Résumé.....	3
Abstract	4
Table des matières.....	5
Liste des abréviations.....	8
Liste des figures	9
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1. Contexte.....	1
1.1.1. Contexte général	1
1.1.2. Contexte applicatif	2
1.1.3. Démarche	3
1.2. Problématique	3
1.2.1. Limitation de la prise en compte des critères de conception de SAA	4
1.2.2. Nécessité de clarifier et d’approfondir la modélisation des interactions au sein d’un SAA 5	
1.2.3. Absence d’une méthodologie générique de mise en opération de SAA	6
1.3. Contributions	7
1.3.1. Modèle réutilisable pour les SAA (NEXUS).....	8
1.3.2. Ontologie générique pour les SAA (OfASCIA)	9
1.3.3. Implémentation du modèle dans le cadre de l’assistance des PMR	9
1.4. Structure du document.....	10
Chapitre 2 - Etat de l’art : apport de l’intelligence artificielle au domaine des villes intelligentes	12
2.1. Notions préliminaires.....	12
2.1.1. Intelligence artificielle	12
2.1.2. Systèmes multi-agents	13
2.1.3. Intelligence ambiante.....	16
2.1.4. Représentation des connaissances	18

2.1.5. Ontologies	18
2.2. Systèmes ambiants dédiés à l'assistance (SAA).....	20
2.2.1. Définition	20
2.2.2. Critères de conception pour un SAA	21
2.2.3. Analyse des SAA existants	24
2.2.4. Analyse de l'existant pour assister les PMR.....	27
2.2.5. Synthèse sur les solutions actuelles.....	28
2.3. Modèles d'architecture pour les SAA	30
2.3.1. Modèles et architectures de SAA.....	30
2.3.2. Ontologies pour les SAA.....	35
2.3.3. Synthèse et positionnement des contributions.....	37
2.4. Mise en opération des SAA.....	38
2.4.1. Déploiement et expérimentation en milieu réel	38
2.4.2. Expérimentations en simulation des SAA	39
2.4.3. Limites de ces approches	40
2.4.4. Simulations hybrides	41
2.4.5. Synthèse et positionnement des contributions.....	42
2.5. Synthèse.....	44
Chapitre 3 - Contributions.....	46
3.1. OfASCIA : Ontologie de système ambiant dédié à l'assistance dans les villes intelligentes.....	47
3.1.1. Introduction.....	47
3.1.2. Méthodologie et objectifs.....	48
3.1.3. Concepts liés à l'environnement.....	52
3.1.4. Concepts liés aux acteurs	56
3.1.5. Concepts liés aux connaissances du système	59
3.1.6. Synthèse	64
3.2. NEXUS : Modèle d'architecture générique de système ambiant dédié à l'assistance et basé sur le paradigme multi-agents.....	66
3.2.1. Introduction.....	66
3.2.2. Présentation générale du modèle et critères de conception	67
3.2.3. Modèles de connaissances.....	69
3.2.4. Modèle d'environnement ambiant.....	73
3.2.5. Modèle Agent.....	75
3.2.6. Position des acteurs humains dans le système.....	78
3.2.7. Synthèse	82

3.3. Mise en œuvre de NEXUS dans le cadre d'une simulation pour l'assistance des PMR	83
3.3.1. Introduction.....	83
3.3.2. Scénario et paramètres d'expérimentation.....	84
3.3.3. Prérequis pour l'implémentation en simulation.....	86
3.3.4. Implémentation en simulation.....	89
3.3.5. Approche de conception par simulation hybride.....	98
3.3.6. Évaluation par les méthodes du SNA.....	100
3.3.7. Résultats et discussion.....	105
3.3.8. Synthèse.....	110
Chapitre 4 - Conclusion.....	113
Bibliographie.....	116

Liste des abréviations

AA	Agent Avatar
IoT	Internet of Things (Internet des Objets [IdO] en français)
LIM	Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques (Univ. de la Réunion)
NEXUS	Networked Entities X Users Society
OfASCIA	Ontology for Agents in Smart Cities and Ambient Intelligence context
OS	Operating System (Système d'exploitation en français)
PMR	Personne à Mobilité Réduite
SAA	Système Ambient dédié à l'Assistance (équivalent français de AAL)
SAPR	Skwad Assist system for Person with Reduced mobility
SimSAPR	Simulated Skwad Assist system for Person with Reduced mobility
SMA	Système Multi-Agents (MAS en anglais)
SNA	Social Network Analysis (ou Analyse des Réseaux Sociaux en français)
UdeS	Université de Sherbrooke

Liste des figures

Figure 1	Critères pour une ville intelligente	1
Figure 2	Schéma de l'ensemble des éléments constituant les SAA	6
Figure 3	Éléments composant un SMA simple	14
Figure 4	Extrait du glossaire sur les termes liés à l'intelligence ambiante	17
Figure 5	Carte des concepts principaux du modèle du projet UniversAAL	34
Figure 6	Représentation partielle des classes principales de l'ontologie CONON	36
Figure 7	Déroulement des phases de la méthodologie par simulation hybride	41
Figure 8	Représentation partielle des concepts principaux de l'ontologie OfASCIA	48
Figure 9	Vue partielle de l'ontologie OfASCIA dans Protégé	52
Figure 10	Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept "Hardware"	54
Figure 11	Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept "Location"	55
Figure 12	Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept "Actor"	57
Figure 13	Classes principales de l'ontologie pouvant être rattachées au concept "Context"	60

Figure 14	Schéma de représentation d'une activité selon le modèle de Rabardel	61
Figure 15	Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept "Activity"	62
Figure 16	Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept "Action"	63
Figure 17	Représentation de l'ontologie OfASCIA et des ontologies de référence sur lesquelles elle s'appuie	65
Figure 18	Schéma des sous-modèles constituant le modèle générique NEXUS	68
Figure 19	Schéma de la structure d'une communication	71
Figure 20	Exemple du mécanisme de décomposition/recomposition d'un smartphone	75
Figure 21	Schéma de l'architecture BDI	76
Figure 22	Schéma de catégorisation des buts dans le modèle	77
Figure 23	Représentation de personnes en interaction avec des agents d'assistance par le biais de leurs agents avatars	80
Figure 24	Représentation des espaces de communication formés par les échanges de la figure précédente	81
Figure 25	Diagramme des composants de la mise en œuvre du modèle NEXUS	87
Figure 26	Diagramme d'architecture de SKUAD	88
Figure 27	Diagramme des types d'assistance de SAPR	90
Figure 28	Diagramme des sous-buts à atteindre pour la prise en charge en cas de chute	91

Figure 29	Diagramme des équipements définis dans SAPR	91
Figure 30	Diagramme partiel du service de surveillance de chute	93
Figure 31	Diagramme du but et de l'opportunité de l'agent, pour l'exemple de la détection de chute	94
Figure 32	Capture d'écran de SimSAPR	96
Figure 33	Capture d'écran des boutons de la fenêtre "Map" de SimSAPR	97
Figure 34	Capture d'écran de la fenêtre "Control" de SimSAPR	97
Figure 35	Capture d'écran de la fenêtre "Parameters" de SimSAPR	98
Figure 36	Schématisation de l'interaction entre la simulation et l'application développée	99
Figure 37	Schéma du fonctionnement de la base de connaissances des conversations exploitées par le logiciel d'analyse développé	103
Figure 38	Capture d'écran des panneaux de graphe et statistique, de l'application web développée	104
Figure 39	Capture d'écran du panneau des conversations, de l'application web développée	105
Figure 40	Graphique de l'évolution de la centralité de degré, en fonction du degré d'assistance	107
Figure 41	Graphique de l'évolution de la centralité de proximité, en fonction du degré d'assistance	108
Figure 42	Graphique de l'évolution de la centralité d'intermédiarité, en fonction du degré d'assistance	109

Chapitre 1

Introduction

1. Contexte

1. Contexte général

La plupart des régions du monde sont à un niveau d'urbanisation sans précédent et les villes du XXIème siècle doivent faire face à de nombreux défis sociaux, économiques, culturels et environnementaux. Pour relever ces défis, il est possible d'appliquer les dernières avancées des technologies de l'information et de la communication, ce qui nous amène au concept de ville intelligente [1]. Parmi les différents critères évalués pour définir « l'intelligence » d'une ville [2] (cf. figure 1), la mobilité intelligente (ou « Smart Mobility » en anglais) vise à optimiser les déplacements urbains grâce à de nouveaux moyens informatiques et techniques.

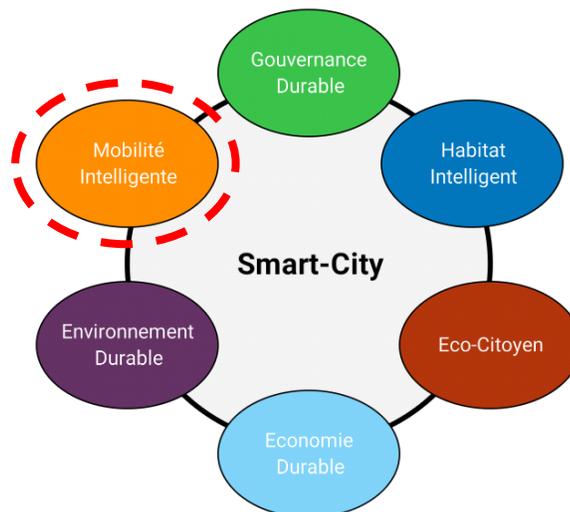


Figure 1 – Critères pour une ville intelligente, d'après [2]

Ainsi, dans ce contexte de mobilité intelligente, certains usagers peuvent nécessiter des structures plus adaptées. En France, d'après G. Lévy [3], 91% des personnes à mobilité réduite, ou handicapées, ont défini leurs conditions de vie et de déplacement comme étant « Difficiles ». Bien que des solutions aient émergé, celles-ci présentent encore des limites, et le soutien des personnes à mobilité réduite reste un problème important à résoudre.

2. Contexte applicatif

Dans ce travail de recherche, nous étudierons l'apport de l'intelligence artificielle aux systèmes ambiants dédiés à l'assistance des déplacements. Bien que lorsque l'on parle « d'intelligence artificielle » la première branche qui nous vient en tête concerne les réseaux de neurones, mais il existe de nombreuses branches de l'intelligence artificielle. Chaque branche peut contribuer à différents niveaux de la conception des systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Par exemple, les techniques liées à l'apprentissage automatique présentent un intérêt certain pour traiter un grand nombre de données dont il faut faire émerger des connaissances. Ils sont donc adaptés à des systèmes de reconnaissances d'activités, ou à la construction des services [4], [5]. Cependant, dans ce travail de recherche, nous nous placerons en amont et traiterons de la conception des systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Ainsi, notre proposition ne traitera pas directement des algorithmes d'apprentissage automatique ou profond.

En revanche, les systèmes multi-agents constituent une autre des branches du large domaine de l'intelligence artificielle. Ces systèmes composés d'agents logiciels autonomes capables d'agir et de coopérer dans un environnement donné pour atteindre leur objectif [6]. Cette approche de résolution des problèmes distribuée en fait un paradigme de choix pour la conception de systèmes distribués, tels que la simulation de phénomènes complexes [6] et la construction de services interconnectés, opérants dans l'environnement réel et destinés à assister les activités humaines : on parle alors d'intelligence ambiante [7].

Parmi les usages possibles de ces systèmes ambiants, l'assistance à la personne est celui qui nous intéressera dans la suite de ces travaux. Ces outils destinés à prévenir, soigner ou améliorer le bien-être et l'état de santé d'une population, sont appelés Systèmes Ambiants dédiés à l'Assistance (SAA) ou « Ambient Assisted Living (AAL) systems » [5], [8].

C'est dans ce contexte que se placent nos travaux : la conception d'un système ambiant dédié à l'assistance des personnes à mobilité réduite en milieu urbain. Nous avons choisi une

approche reposant sur la présence grandissante des objets connectés parmi le mobilier urbain, pour développer un système opérant à l'échelle de la ville qui fournit des services d'assistance aux PMR.

Cependant, ce type de système, du fait de leur nature hétérogène et adaptative, nécessite de construire et manipuler un certain nombre de connaissances. Afin de pouvoir exploiter ces dernières, il devient vital d'en décrire la structure. C'est pourquoi dans le cadre de cette thèse, nous abordons également la question de la représentation des connaissances (et donc du raisonnement à partir de ces dernières), qui est une autre des branches de l'intelligence artificielle.

3. Démarche

Pour construire une solution destinée à soutenir ces personnes à mobilité réduite, il est possible de s'appuyer sur un environnement urbain de plus en plus « augmenté » par la présence d'objets connectés. La question consiste donc à trouver comment orchestrer au mieux cette flotte d'appareils, pour offrir des services d'assistance pertinents et efficaces. Pour autant, nous viserons à limiter l'introduction de nouveaux dispositifs et à préférer la réutilisation des appareils déjà présents dans l'environnement. Ceci permettant de réduire l'intrusivité (et donc d'augmenter l'acceptabilité [9], [10]) du système pour ces personnes, en évitant de les perturber avec l'ajout perpétuel de nouveaux dispositifs.

Par la même occasion, limiter l'ajout de nouveaux appareils constitue un pas vers l'éco-conception de tels systèmes. Cela permet de rendre les systèmes produits plus efficaces et écologiques, en réduisant le nombre de dispositifs à utiliser.

Enfin, notre démarche s'inscrit dans une vision « edge-computing ». En ce sens, nous favoriserons un fonctionnement local du système, en limitant la remontée des données vers les serveurs. Ceci présente des avantages selon plusieurs aspects [11] : réduction de la bande passante utilisée vers l'Internet, amélioration de la fiabilité et des performances et une meilleure maîtrise du respect de la vie privée.

2. Problématique

Nous avons spécifié les contextes généraux et applicatifs de cette thèse, ainsi que la démarche dans laquelle nous nous positionnons. Il existe un certain nombre de travaux

tentant de répondre à la question de la conception de systèmes ambiants dédiés à l'assistance des PMR. Cependant, ces derniers présentent des verrous que nous tentons de solutionner.

1. Limitation de la prise en compte des critères de conception de SAA

Les SAA (parfois aussi appelés outils ambiants d'assistance à la vie) se destinent à exploiter un environnement instrumenté afin d'offrir des services destinés à faciliter l'autonomie et le confort dans les tâches de la vie quotidienne de ses utilisateurs. Ces systèmes devraient s'inscrire dans l'objectif d'agir comme un « liant » entre toutes les entités présentes dans l'environnement réel : les utilisateurs aidés, les utilisateurs aidants, les services délivrés et les objets connectés.

À partir des travaux de [10], [12], [5], [13], nous avons dressé un certain nombre de critères qu'il est nécessaire de respecter pour concevoir un tel système :

- **Adaptation** : le système doit évoluer relativement aux dynamiques des utilisateurs et des ressources disponibles.
- **Décentralisation** : chaque élément du système doit pouvoir fonctionner de manière indépendante, dans le but de renforcer d'autres critères.
- **Personnalisation** : en complément de l'adaptation, le système doit adapter les services en fonction des préférences et des profils utilisateurs.
- **Transparence** : le fonctionnement du système doit être suffisamment clair pour que l'utilisateur puisse délibérément décider des limites et du degré de soutien que le système lui apporte.
- **Flexibilité** : la conception du système doit être suffisamment souple pour être réutilisable lorsque la problématique à résoudre ou l'environnement change.
- **Efficience** : vis-à-vis de l'état écologique actuel, il est nécessaire de considérer l'impact engendré par le déploiement du système, sur notre environnement. Nous essaierons de réduire cet impact autant que possible, sans pour autant diminuer la qualité des services.
- **Approche centrée sur l'utilisateur** : le facteur humain est le point central du système. Il est alors nécessaire de prendre en compte l'ensemble des personnes impliquées au travers de la solution dans l'étape de modélisation, tout en adoptant une approche de conception de système socio-technique ambiant.

Or, les solutions existantes sont souvent limitées par rapport aux critères de conception que nous avons listés avant. En effet, du fait de leur conception ad-hoc, la plupart des

systèmes manquent de **flexibilité** et d'**adaptabilité** et ne sont pas **décentralisés**. Du fait de ce manque de **décentralisation**, l'**efficience** peut s'avérer limitée, puisque les calculs se font sur un serveur distant, via un grand nombre de requêtes qui transitent par le réseau Internet. De plus, en fonctionnant de manière décentralisée, nous pensons qu'il est plus facile de gérer les questions du respect de la vie privée, en gérant les données en local.

Cela nous amène à repréciser le dernier critère qui demeure perfectible pour ces systèmes la prise en compte du **facteur humain**.

2. Nécessité de clarifier et d'approfondir la modélisation des interactions au sein d'un SAA

Dans ce contexte particulier de l'assistance des déplacements urbains, la mise en place d'un système d'assistance des personnes à mobilité réduite relève de plusieurs critères importants :

- L'environnement urbain est un environnement complexe et ouvert, en ce sens, le système doit pouvoir s'adapter à des situations nombreuses, différentes et inattendues ;
- Les ressources et les dispositifs techniques sont distribués, dynamiques et hétérogènes, c'est pourquoi le système doit pouvoir adapter les services en conséquence ;
- Le système doit faire fonctionner en synergie les différentes entités engagées : les dispositifs, les agents et les utilisateurs du système.

Comme nous l'avons esquissé, l'implication de l'utilisateur dans la conception des modèles est finalement assez limitée dans les propositions actuelles, comme l'ont signalé plusieurs auteurs [5], [10]. En effet, l'utilisateur est parfois consulté lors de l'étape de conception et inclus lors des phases de tests. Pourtant, il est loin d'être trivial que l'utilisateur soit pleinement représenté au sein des modèles de ces systèmes.

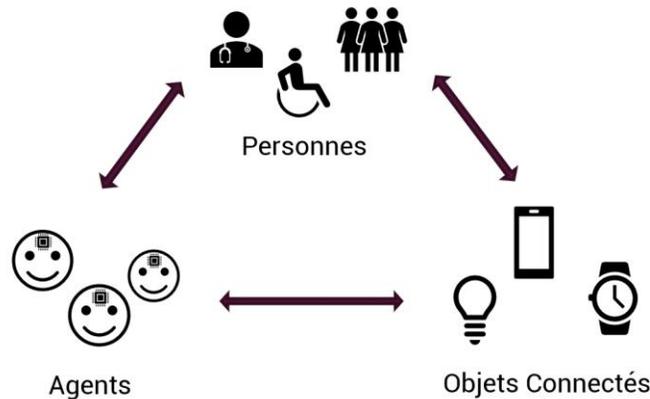


Figure 2 – Schéma de l'ensemble des éléments constituant un SAA

Également, tout comme les objets connectés ne sont pas exploités à plein potentiel, nous pensons que le réseau aidant déjà existant n'est pas suffisamment pris en compte dans la conception de SAA. Enfin, bien que le paradigme Agent soit déjà utilisé pour l'intelligence ambiante, il est rarement mis à profit pour les SAA et il n'y a pas de modèle d'architecture de SAA qui l'intègre pleinement.

Finalement, la plupart des solutions actuelles manquent d'interopérabilité du fait de l'absence d'un socle logique et sémantique commun [5], [10]. En outre, comme l'ont signalé plusieurs chercheurs du domaine, nous avons souligné le fait que la prise en compte des utilisateurs (aidés et aidants) demeurerait perfectible [5], [9]. Enfin, nous avons noté la formalisation encore limitée du paradigme agent dans les SAA. En conséquence, le manque d'un modèle générique formalisant l'ensemble du système socio-technique formé par l'environnement connecté, l'ensemble des utilisateurs humains et les agents apparaît pour la construction de tels systèmes dans l'environnement ouvert et complexe qu'est l'environnement urbain.

3. Absence d'une méthodologie générique de mise en opération de SAA

Dans une majorité des cas, les solutions construites pour mettre en place des systèmes ambiants sont faites sur mesure (approche ad-hoc), et déployées dans des expérimentations en milieu réel pour la validation. C'est le cas de projets tels que [14], [15]. Le déploiement en

milieu réel permet évidemment de confronter le système à la réalité du terrain, en offrant des conditions qui, par exemple, auraient pu ne pas être prévues par les concepteurs. Cependant, cette phase de test en environnement réel peut s'avérer coûteuse, surtout dans le cas où le prototype venait à être refait plusieurs fois [9], [16].

Par ailleurs, un autre moyen d'expérimenter son modèle consiste à simuler son fonctionnement entier, comme le proposent certains travaux [4], [16]. Cette solution permet de réduire les coûts des tests, tout en offrant la possibilité de réaliser des essais dans des conditions extrêmes, sans faire courir de risque ni à l'infrastructure, ni aux sujets des expérimentations. De cette façon, nous pouvons passer d'une phase de tests en simulation, à une phase de tests en milieu réel. Cependant, cette démarche peut s'avérer limitée, du fait de la dissociation entre ces deux phases. Par exemple, des éléments critiques qui n'auraient pas été prévus dans la simulation et remarqués seulement lors des tests en milieu réels remettraient en cause la validité de la simulation.

En outre, comme nous l'avons énoncé précédemment, les solutions actuelles sont souvent implémentées sur mesure et ce manque de standardisation bride l'interopérabilité des systèmes et la réutilisation des données qui en découlent [5], [10]. Plusieurs chercheurs s'accordent aussi sur le fait que le facteur humain reste en retrait dans les solutions proposées actuellement [5], [10], [17]. Par ailleurs, dans la plupart de ces solutions, le fonctionnement des systèmes demeure centralisé et trop peu souvent distribué. Cela est limitant vis-à-vis du terrain de déploiement que nous visons qui est la ville intelligente.

Enfin, dans la littérature scientifique, l'évaluation de ce type de ce système se fait généralement de deux façons. Soit elle se fait sur des critères quantitatifs, où vont être calculées des unités de mesure sur le fonctionnement du système (comme le nombre d'interventions du système, ou encore le temps de réponse). Soit l'évaluation se fait de manière qualitative, où un questionnaire de satisfaction est soumis aux utilisateurs qui ont testé le système. Ainsi, nous pouvons remarquer que l'évaluation quantitative de l'impact du système sur les utilisateurs est limitée à l'observation de la technologie plutôt qu'à celle des utilisateurs.

3. Contributions

Compte tenu des problématiques qui ont été énoncées précédemment, il devient nécessaire de pouvoir proposer un modèle suffisamment générique, ainsi qu'une

méthodologie associée pour faciliter le développement de SAA. Du fait de la construction à partir d'un socle commun, l'interopérabilité des systèmes basés sur ce socle est facilitée. Les trois principales contributions abordées dans le manuscrit sont donc : un modèle réutilisable pour la conception de SAA (NEXUS) ; une ontologie qui formalise ce modèle à un niveau sémantique (OfASCIA) ; et la proposition d'une méthodologie de mise en opération de SAA qui passe par l'implémentation d'une simulation hybride et l'évaluation du système par l'analyse de son impact sur le réseau social des personnes aidées.

1. Modèle réutilisable pour les SAA (NEXUS)

La première contribution proposée consiste en un modèle réutilisable pour le développement de SAA : *Networked Entities X Users Society* (NEXUS). Ce modèle vise à formaliser les différents éléments composant un SAA, et leurs relations. De cette façon, le système résultant de ce modèle doit jouer le rôle de chef d'orchestre entre les différentes entités pour assurer la cohérence entre :

- D'une part, les *acteurs humains* qui peuvent être des personnes aidées ou aidantes et qui possèdent leurs profils et préférences propres ;
- D'autre part les *objets connectés*, qui instrumentent l'environnement physique réel des utilisateurs et présentent différentes fonctionnalités et spécificités ;
- Et enfin les *agents* qui, malgré leur hétérogénéité, sont dotés d'objectifs propres, devant conduire à l'offre de services collectifs d'assistance.

Ce modèle permet ainsi de faciliter le développement d'un SAA, en statuant sur les différentes « briques » qu'il faut instancier. En outre, en proposant cette structure, cela facilite l'interopérabilité des systèmes construits sur ce même modèle. Ce modèle se veut plus inclusif vis-à-vis : du **facteur humain**, en offrant une modélisation, non seulement des personnes aidées, mais également des personnes aidantes qui sont déjà autour de la population aidée ; des **agents**, en proposant une modélisation qui supporte le paradigme multi-agents intégré au sein d'un système ambiant dédié à l'assistance. Ce modèle dépasse donc la vision d'un système informatique simplement dédié à l'assistance, mais propose de l'envisager comme un tout : un système socio-informatique intégrant à la fois les composants informatiques logiciel et physique, et l'ensemble des usagers humains des utilisateurs, tous situés dans l'environnement physique réel.

2. Ontologie générique pour les SAA (OfASCIA)

En continuité du modèle proposé (NEXUS), nous avons noté la nécessité de formaliser les concepts de ce modèle au sein d'une ontologie, que nous appelons : *Ontology for Agents in Smart Cities and Ambient intelligence context* (OfASCIA). Si le modèle fournit déjà un premier socle logique, l'ontologie que nous proposons formalise ce modèle jusqu'au niveau sémantique. Cela permet une exploitation à plusieurs niveaux :

D'une part, le modèle étant formalisé dans une ontologie, cela permet d'en vérifier la cohérence logique (par exemple par l'utilisation de moteurs d'inférences) et facilite le partage des connaissances sur ce modèle [18], notamment en proposant une sémantique pour les données résultantes du système. Ces avantages poussent le modèle dans le sens de l'extensibilité et de l'interopérabilité des systèmes.

D'autre part, en n'étant pas intriquée à une plateforme multi-agents spécifique, elle constitue un socle sémantique générique pour structurer l'enregistrement et le partage des connaissances des agents à propos du système.

Enfin, l'approche adoptée pour représenter les appareils composants le système permet la décomposition et la recombinaison de ces derniers. Ce mécanisme constitue une solution permettant la mutualisation des composants informatiques. Cette mutualisation permet la redondance intelligente des éléments physiques nécessaires au système. Cela constitue un pas vers la robustesse et l'efficacité des SAA [19].

3. Implémentation du modèle dans le cadre de l'assistance des PMR

Finalement, notre dernière contribution concerne la mise en opération d'un SAA basé sur le modèle proposé et constitue, en ce sens, une preuve de concept de ce dernier.

D'une part, en plus des tests en simulation et avant de passer à la phase de tests en milieu réel, il est possible d'intercaler des étapes de simulation hybride, aussi appelée "Hardware-in-the-Loop" [20], [21]. Cette étape de simulation hybride consiste à connecter un ou des prototypes réels, non pas au monde réel, mais directement à la simulation. Le prototype n'a donc pas connaissance du fait qu'il est exécuté dans un environnement contrôlé, mais cela permet d'expérimenter le comportement du système avec des paramètres choisis par le modélisateur de la simulation. C'est une étape qui permet de réduire le nombre d'itérations

à la phase suivante, et donc qui est moins coûteuse, tout en permettant plus de tests et donc plus de fiabilité du système.

D'autre part, nous souhaitons proposer une méthode originale de validation de tels SAA, qui repose sur l'observation de l'impact du système sur les connexions sociales de la personne assistée. En effet, comme le soulignent les auteurs de [22] et d'autres chercheurs, le bien-être et la santé d'une personne dépend de la qualité de ses relations sociales et du fait qu'elle se sente « socialement connectée » avec les autres. Il est intéressant de montrer que ce type de système permet de favoriser les connexions sociales, tout en répartissant intelligemment la charge des aidants proches, sans chercher à les remplacer notamment lorsqu'une accroche émotionnelle est nécessaire. Cette mesure sur le graphe social des personnes supportées peut être effectuée avec des indices issus du domaine de l'analyse des réseaux sociaux [23], comme la « centralité » ou la « proximité ».

4. Structure du document

Ce document vise donc à présenter l'état de l'art, et l'analyse bibliographique scientifique aux contributions portées dans ce travail de recherche.

Ainsi, le deuxième chapitre traite de l'état de l'art, avec une première section (2.1) présentant les notions scientifiques et informatiques permettant de contextualiser la suite de la bibliographie. La section suivante (2.2) traite des solutions proposées actuellement dans la littérature pour l'assistance ambiante. Les limites des solutions présentées nous amènent à présenter les modèles et architectures de références pour la conception de SAA, dans la section (2.3). Finalement, la section (2.4) a pour objet l'étude des méthodes pour la mise en opération des SAA. Le document se poursuit avec le chapitre exposant les contributions mises en avant dans cette thèse.

La section (3.1) concerne la présentation de l'ontologie de domaine *OfASCIA*, tandis que la section suivante (3.2) traite du modèle d'architecture générique de SAA, appelé *NEXUS*. Enfin, la dernière section des contributions (3.3) rend compte de la mise en œuvre du modèle que nous avons proposé. Nous y présentons l'implémentation du SAA dédié aux déplacements des PMR en simulation hybride, ainsi que l'évaluation par les méthodes de l'analyse des réseaux sociaux que nous proposons.

Le dernier chapitre est une synthèse des précédents chapitres, où nous résumons les contributions proposées et où nous proposons des ouvertures vers des travaux futurs en continuité de ce qui a été exposé.

Chapitre 2

État de l'art : apport de l'intelligence artificielle au domaine des villes intelligentes

Cet état de l'art vise à présenter les différents concepts qui seront discutés au cours de ce manuscrit. Dans la mesure où ce projet touche à plusieurs domaines, allant de l'intelligence artificielle à l'assistance à la personne, en passant par l'intelligence ambiante et par le paradigme agent, il paraît nécessaire de présenter les notions préliminaires, indépendantes et nécessaires à la construction de la section suivante.

Deuxièmement, nous exposerons comment ces notions peuvent être assemblées et articulées dans l'optique de construire des systèmes informatiques ambiants, dédiés à l'assistance à la personne.

1. Notions préliminaires

1. Intelligence artificielle

À de nombreuses reprises, nous parlerons d'intelligence (en anglais, « smart » ou « intelligence ») dans ce document. C'est un terme qui, en plus d'être en vogue dans les discours scientifiques et commerciaux depuis quelques années, peut représenter plusieurs facettes. Et au-delà de son usage dans le domaine du marketing, il est difficile de le définir correctement dans notre contexte. C'est pourquoi nous proposons de choisir une définition sur laquelle nous nous appuierons pour le reste du document.

La définition que nous avons retenue, largement adoptée dans le domaine, est donnée par Russel et Novig [24] : L'intelligence est définie comme le fait d'effectuer des actions rationnelles. Cela peut se traduire par le fait qu'un agent intelligent effectue l'action qui offre le plus de bénéfices pour le moindre mal. Ce choix de la meilleure action possible sera déterminé en fonction de ses perceptions d'une situation donnée.

Bien que simple, cette définition englobe un certain nombre de systèmes mimant des mécanismes que l'on attribue généralement à l'Homme, comme l'apprentissage ou le raisonnement à partir des perceptions.

L'intelligence artificielle est un domaine qui concerne la compréhension de l'intelligence et la construction de systèmes cherchant à la reproduire [24], [25]. Ce domaine regroupe un certain nombre de sous-domaines rattachés, dont la représentation des connaissances, ou les algorithmes d'intelligence artificielle distribuée. Dans ce sous-domaine, il existe plusieurs catégories [26] dont : *l'intelligence artificielle parallèle*, *la résolution de problème distribuée* et les *systèmes multi-agents*, qui seront l'objet d'étude de notre prochaine section.

2. Systèmes multi-agents

Dans cette section, nous aborderons la question des systèmes multi-agents, nous parlerons d'ailleurs du « paradigme agent » ou « paradigme multi-agents ». C'est pourquoi nous commencerons par définir ce qu'est un agent, avant de préciser ce qu'est un système multi-agents.

Si nous nous référons de nouveau au livre de Russel et Norvig [24], les auteurs définissent simplement que : "Un agent peut être vu comme une chose qui perçoit son environnement au travers de capteurs et agit sur ce dernier au travers d'actuateurs".

En France, Ferber [6] dresse une définition de référence de l'agent qu'il estime comme "minimale et commune". Cette définition se compose de plusieurs critères permettant de caractériser un agent. Ainsi un agent est une entité "physique ou virtuelle" :

- Qui est capable de percevoir son environnement,
- Qui est capable d'agir dans un environnement,
- Qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- Qui est mue par un ensemble de tendances,
- Qui possède des ressources propres,
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement,
- Qui possède des compétences et offre des services

Dans cette caractérisation de l'agent, on retrouve bien l'idée d'une entité capable d'agir et de percevoir son environnement, mais on constate que Ferber raffine la définition de l'agent en y ajoutant des capacités de communication, tout en montrant que l'agent s'exécute dans un objectif précis. Ferber propose cette caractérisation de l'agent en exposant le fait que le terme est "utilisé de manière assez vague" dans les domaines porteurs.

Ce même constat est fait par les auteurs de [27], qui soulignent le caractère fluctuant de la définition du terme "agent". D'après ces derniers, l'agent peut être défini comme suit : "un composant logiciel spécifique qui est autonome et qui fournit une interface interopérable à un système arbitraire et/ou qui agit comme un agent humain, travaillant au service de clients en poursuivant son propre agenda".

De l'ensemble de ces travaux portant sur le paradigme Agent, en ressortent les caractéristiques communes de l'agent :

1. **Autonomie** : il opère sans intervention directe de l'Homme et contrôle ses actions et son état interne.
2. **Social** : il coopère avec les autres agents.
3. **Réactif** : il perçoit l'environnement et agit sur ce dernier en temps réel.
4. **Proactif** : il est capable d'exposer un comportement axé sur l'objectif en prenant des initiatives en fonction de ses perceptions de l'environnement.

Bien qu'un agent puisse exister de manière solitaire, ils sont généralement plusieurs à s'exécuter. Dans ce cas, ils interagissent directement ou indirectement, la plupart du temps selon la modélisation d'un système complexe. Ce qui nous amène à la définition d'un système multi-agents.

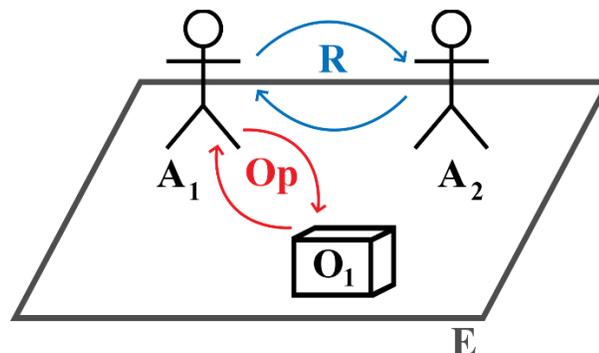


Figure 3 – Éléments constituant un SMA simple

Intuitivement, nous pouvons donc en déduire la définition d'un Système Multi-Agents (SMA), qui serait un système composé d'un ensemble d'agents en interaction. Cette intuition est confirmée par les nombreux travaux portant sur les SMA (comme [26], [28]–[30], dont les auteurs de [31], qui définissent un SMA comme étant "un ensemble d'agents qui interagissent entre eux afin de coordonner leurs comportements et, la plupart du temps, pour coopérer dans un but commun". Dans son livre [6], Ferber décrit formellement un SMA par le tuple suivant, schématisé sur la figure 3 :

$$\text{SMA} = (\mathbf{E}), (\mathbf{O}), (\mathbf{A}), (\mathbf{R}), (\mathbf{Op})$$

Avec **E** l'environnement spatial, **O** l'ensemble des objets situés dans **E** et pouvant être perçus, créés, détruits ou modifiés par les agents. **A** est l'ensemble des agents (entités actives) appartenant à **O**, **R** l'ensemble des relations qui lit les objets **O** entre eux et **Op** l'ensemble des opérations de **A**, leur permettant de percevoir, produire, modifier et manipuler les objets **O**.

Ainsi, la résolution d'un problème résulte des interactions entre ces entités autonomes mais plus d'un programme monolithique, comme l'a souligné l'auteur de [32].

Le paradigme multi-agents possède des champs d'application variés, mais il est possible de dénoter 4 domaines d'application majeurs [6] :

- **Résolution de problème** : Les SMA constituent une alternative intéressante pour la résolution de problèmes complexes, notamment dans des cas où il y a une nécessité de flexibilité, d'adaptation, de distribution [33], [34].
- **Robotique collective** : Dans le domaine de la robotique, la participation d'une flotte d'entités autonomes peut être nécessaire à la résolution d'un objectif commun. Le paradigme multi-agents apporte un certain nombre de mécanismes pour la coordination et la coopération de ces robots. [35], [36]
- **Simulation** : Les SMA offrent la possibilité de créer des univers artificiels dans un but d'expérimentation. Cela permet de créer des connaissances dans de multiples domaines, tels la biologie, l'étude des mouvements de foules, etc. [37], [38]
- **Construction de mondes artificiels** : Ces univers artificiels peuvent être utilisés de manière à "augmenter" un environnement réel, comme dans le contexte de la convergence virtuel/réel. Des travaux comme [39], [40], exploitent des systèmes

multi-agents pour la mise en place de systèmes d'intelligence ambiante, prolongeant l'autonomie des personnes âgées à domicile.

Il est possible d'esquisser le double usage que nous ferons du paradigme multi-agents dans cette thèse. D'une part, nous souhaitons mettre en place un système ambiant dédié à l'assistance. Il est donc question de la construction d'un monde artificiel, un système lié à la convergence cyber-physique, ou « Cyber-Physical-System » (CPS) en anglais. D'autre part, les systèmes multi-agents sont adaptés à la simulation, notamment dans le cas d'expérimentations de systèmes complexes et hétérogènes, comme le sont les systèmes ambiants. L'étude de ces derniers sera l'objet de la section suivante.

3. Intelligence ambiante

Le domaine de l'intelligence ambiante puise ses origines dans « l'informatique ubiquitaire », décrit par Mark Weiser en 1991 [41]. Il y décrit un monde où les utilisateurs interagissent avec une multitude d'ordinateurs interconnectés, de manière invisible, car cachés dans nos objets du quotidien. L'ère de l'informatique ubiquitaire est donc l'ère dans laquelle nous nous trouvons depuis une dizaine d'années, et qui n'en est qu'à ses débuts.

Plus tard, d'après N.Olson et al. [42], le concept d'intelligence ambiante a été initié lors d'une conférence organisée par les chercheurs de l'entreprise Phillips, qui l'avaient décrit comme un enrichissement de l'environnement réel par la technologie, où un système de captation et traitement de la donnée devrait prendre des décisions au bénéfice des utilisateurs.

En effet, l'intelligence ambiante est souvent présentée comme la suite logique de l'informatique ubiquitaire, où des services se servent de cet environnement connecté pour interagir de manière naturelle avec les utilisateurs, en prenant en compte des informations relatives au contexte [5], [43], [44].

Le contraste entre ces deux termes (d'intelligence ambiante et d'informatique ubiquitaire) peut sembler faible. En outre, l'émergence de l'Internet des Objets (IoT) a renforcé le flou entre ces différents concepts. Comme certains chercheurs le définissent [42], l'IoT comme un « réseau dynamique global où les objets physiques et virtuels ont des identités, des attributs, intégrés dans un réseau d'information » et plusieurs équipes

s'accordent sur la dimension de l'IoT, qui se porte sur les couches physique et réseau, même si un flou peut encore exister [45].

Finalement, nous avons constaté que ces trois concepts pouvaient se chevaucher. Il nous a donc paru nécessaire de proposer un éclaircissement lexicographique entre ces termes, ce qui a fait l'objet d'un article à la conférence PRIMA 2019 [46]. La figure 4 représente les termes principaux de ce glossaire, et leurs liens.

Dans cet article, nous avons construit un glossaire portant sur ces termes, en agrégeant plusieurs définitions issues de l'étude bibliographique et en évitant le chevauchement entre ces termes. Ainsi, comme montré sur la figure 4, nous définirons l'informatique ubiquitaire comme une vision et une ère, tandis que nous proposons de définir l'informatique ambiante comme étant le domaine qui vise à produire de l'intelligence ambiante (c.a.d. un ensemble de services qui exploitent un environnement connecté pour améliorer la vie quotidienne des utilisateurs). L'Internet des objets fait donc référence à une forme d'environnement connecté, où un ensemble d'objets connectés sont reliés au réseau Internet.

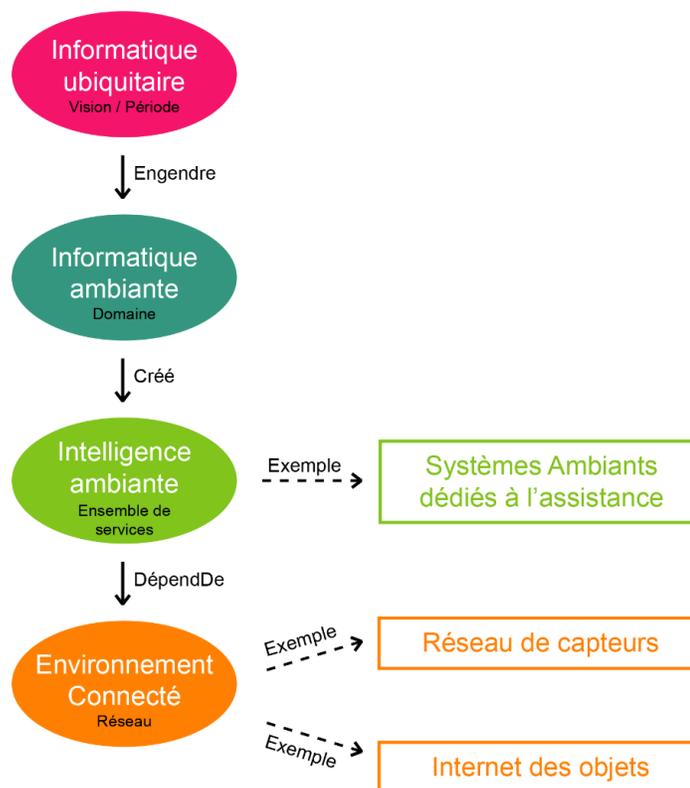


Figure 4 – Extrait du glossaire sur les termes liés à l'intelligence ambiante décrit dans [46]

4. Représentation des connaissances

Comme cela a été discuté plus haut, dans le cadre de ce travail de recherche, nous souhaitons animer un système socio-technique complexe, composé d'éléments fortement hétérogènes, tels que des objets connectés et des agents logiciels, chargés de délivrer des services. De plus, ces services doivent s'adapter aux profils, préférences et états des utilisateurs. Il se révèle donc nécessaire de construire une structure sémantique pour modéliser l'ensemble de ces éléments et les relations qui les lient [47], ce qui soulève la question de la représentation des connaissances au sein du système.

Ainsi, d'après [48], la représentation des connaissances est un champ de l'intelligence artificielle qui pose la question de « comment représenter les connaissances symboliquement et les faire exploiter automatiquement par des programmes de raisonnement ? ». Ce champ est donc centré sur deux mécanismes que sont les *représentations* et les *raisonnements* sur les connaissances.

La représentation formelle de connaissances peut prendre plusieurs modèles (thésaurus, graphe, etc.). Ce formalisme permet l'automatisation des traitements sur ces connaissances par divers traitements informatiques. Ces traitements sont des raisonnements, pour la plupart, basés sur la logique propositionnelle.

Dans la section suivante, nous aborderons un modèle spécifique de représentation des connaissances : les ontologies.

5. Ontologies

En 1995, T. Gruber [49] a défini une ontologie comme étant une « spécification explicite formelle d'une conceptualisation partagée ». Depuis, plusieurs auteurs ont débattu sur la portée réaliste du concept spécifié. D'ailleurs, les auteurs de [50] ont proposé de rectifier la définition précédente en précisant qu'une ontologie est bien un artéfact représentationnel décrivant des entités réelles et leurs relations.

Plus tard, les auteurs des articles [18], [51] présentent une ontologie comme un ensemble de concepts et de relations qui les lient, permettant d'organiser et structurer des connaissances sur un aspect du monde réel. Dans le même courant de pensée, les auteurs de [50] spécifient qu'une ontologie se pose dans la recherche d'une généralisation d'une entité de la réalité et est créée dans le but de capturer et d'encoder le contenu de théories générales scientifiques établies.

En synthétisant la définition de Arp et al. [50], une ontologie est un artéfact, composé de concepts et de relations dont le but est de décrire un aspect du monde réel à partir des connaissances scientifiques établies sur cet aspect.

Dans la littérature, la plupart des auteurs s'accordent sur trois types d'ontologies, qui correspondent à trois niveaux d'abstraction de connaissance à représenter [50], [52]–[54] :

- **Formelle (ou « Top-Level ontology »)** : permet de décrire des concepts généraux indépendants de tout domaine particulier, comme l'espace, le temps, les évènements, etc.
- **De Domaine (ou « Domain ontology »)** : décrivant le vocabulaire rattaché à un domaine, à une tâche ou à une activité générique. En spécifiant les termes introduits par une ontologie formelle.
- **D'application (ou « Application ontology »)** : permettant de décrire les concepts d'un domaine particulier, en spécifiant une ou plusieurs ontologies de référence de plus haut niveau desquelles elle dépend.

Mais pour aller plus loin, il est légitime de s'interroger sur quel objectif ultérieur cet artéfact peut-il être exploité. Une ontologie offre une structure sémantique permettant de structurer des données [18], [55], [51]. En ajoutant de l'information structurante aux données, une ontologie permet donc de construire une base de connaissance.

Ces dernières permettent de faciliter le partage des connaissances entre humains et avec les machines, grâce à la structuration formelle offerte par les langages formels.

En outre, il devient possible de faire des inférences logiques à partir de cette base de connaissance afin de faire apparaître d'autres connaissances.

Nous avons abordé la question de l'intelligence artificielle au travers de quelques un de ses sous-domaines, que nous avons explorés pour cette thèse : les systèmes multi-agents, l'intelligence ambiante et la représentation des connaissances.

Dans le chapitre suivant, nous verrons comment chacun de ces domaines apporte une partie de la solution que nous visons, et qui concerne la conception d'un SAA.

En effet, l'intelligence ambiante est la thématique principalement abordée, puisque nous visons le déploiement d'un système dédié à l'assistance qui repose sur la délivrance de services résultant d'opérations établies sur un environnement augmenté par la présence d'objets connectés.

Le paradigme multi-agents est également prépondérant, puisque ce dernier permet d'aborder la question de la conception de SAA par la construction des services sous la forme d'agents. Ces agents devant accomplir leurs objectifs en agissant principalement avec les objets connectés de l'environnement réel. En outre, les systèmes multi-agents permettent la simulation de systèmes complexes, dont notre SAA. Ce paradigme nous offre donc un moyen d'assurer une continuité de représentation des systèmes ambiants. Pour les expérimentations, les SMA permettent la simulation de systèmes complexes, tels que ceux qui sont ambiants et distribués. Pour la phase de conception, les SMA proposent de décrire les entités de manière atomique, ce qui facilite le travail des modélisateurs.

Enfin les ontologies constituent également une pierre angulaire de la solution, et ce à plusieurs niveaux : d'une part, elles permettent de structurer le modèle, afin d'en vérifier sa cohérence logique et sémantique. D'autre part, l'ontologie permet également de structurer les connaissances et les communications mises en place par les agents.

2. Systèmes ambiants dédiés à l'assistance (SAA)

1. Définition

Comme nous l'avons présenté dans la section (2.1.3), le domaine de l'informatique ambiante vise à produire des services qui accompagnent les activités des utilisateurs, en exploitant un environnement instrumentalisé par des objets connectés.

Parmi les systèmes résultants de ce domaine, certains sont dédiés à l'assistance à la personne et visent à « prévenir, guérir et améliorer le bien-être et la santé » [5] de ses utilisateurs. La plupart du temps, ces systèmes se spécialisent vers des services particuliers orientés vers une population spécifique, pour qui l'environnement n'est pas suffisamment adapté pour permettre une complète autonomie.

Dans la majorité des cas, ces systèmes ambiants dédiés à l'assistance (ou système d'assistance à l'autonomie) vont viser l'accompagnement des personnes âgées en vue de

prolonger leur autonomie, pour contrebalancer des troubles cognitifs ou moteurs qu'elles pourraient subir. Cela peut passer par l'accompagnement sur la prise des médicaments, les rappels de mémoires en général, ou encore la détection de situations à risque.

Ces systèmes ambiants dédiés à l'assistance peuvent donc être qualifiés de complexes, car ils demandent une coopération pluridisciplinaire, tout en mettant en jeu un grand nombre d'entités fortement hétérogènes, ayant des interactions désordonnées, et dans un environnement pas, ou peu contrôlé [56].

2. Critères de conception pour un SAA

Puisque les systèmes ambiants dédiés à l'assistance sont des systèmes complexes, leur conception demeure donc non-triviale [57], [58]. À partir des travaux de [13], [5], [12], [10], nous avons dressé un certain nombre de critères qualitatifs qu'il faudrait prendre en considération, lors de la conception de ce type de système :

- **Adaptation** : le système doit être en mesure d'évoluer dynamiquement en fonction des besoins et des ressources disponibles. Pour être adaptatif, un SAA ne devrait pas être fortement intriqué à la configuration (environnement, objets connectés, utilisateurs) dans laquelle il est déployé. L'adaptation fait donc écho à la notion d'évolution automatique du système, tant sur le plan du passage à l'échelle, de la robustesse, mais aussi de la qualité des services qui sont rendus. Dans notre contexte informatique, l'adaptation est apportée par la conception du modèle, ainsi que la mise en place d'agents eux-mêmes adaptatifs. Cela sous-tend donc la question de la perception de ces agents, ce qui nous mène à la question de la représentation des connaissances sur le système.
- **Décentralisation** : par conception, le fonctionnement du système doit être conçu de sorte que chaque élément composant le système soit indépendant. En optant pour un fonctionnement complètement distribué (et donc décentralisé), on évite le problème du « single-point-of-failure », ce qui permet de renforcer la robustesse. Ce fonctionnement soulève donc la question d'autonomie pour chaque élément du système, ce qui est une raison d'adopter le paradigme multi-agents. En outre, la décentralisation apporte un élément de réponse à la question de la gouvernance des données et donc du respect de la vie privée. En fonctionnant de manière distribuée il devient plus facile d'éviter qu'une entité soit

omnisciente, il devient alors possible de réguler de manière plus fine *quelles* et à *qui* les données sont partagées. Enfin, une approche décentralisée et basée sur « l'edge-computing » permet de réduire la bande passante utilisée, tout en améliorant la rapidité et la fluidité du système. Ceci en favorisant le traitement en local prioritairement.

- **Personnalisation** : complétant le critère d'*adaptation*, le système doit offrir les services les plus opportuns en fonction des préférences et des besoins des utilisateurs. Ce critère fait donc appel à la notion de sensibilité au contexte. Ainsi, lorsqu'un service d'assistance doit être délivré, le système devra adapter ce service en se basant sur ses connaissances à propos de l'utilisateur et de la situation dans laquelle ce service va opérer.
- **Transparence** : le fonctionnement du système ambiant dédié à l'assistance devrait être suffisamment clair par conception et en explications pour que les utilisateurs puissent consciemment décider du degré de soutien que le système leur apporte, et de la façon dont il partage des informations au sein du système. Ce qui rejoint le critère d'approche centrée sur l'utilisateur,
- **Flexibilité** : par sa conception, le système devrait être suffisamment souple pour qu'un changement de l'environnement dans lequel il opère ou du problème spécifiquement traité ne nécessite pas de devoir reconstruire l'entièreté de ce dernier. Proche de la question d'adaptation, le critère de flexibilité se situe au niveau de la conception et permet la réutilisabilité ainsi que l'interopérabilité des SAA.
- **Efficience** : À la vue de l'état environnemental de notre planète, nous pensons qu'il est nécessaire de considérer cette dimension lors de la conception du système. Ainsi, lors de la conception et du déploiement de SAA, il nous paraît important d'adopter une approche qui vise à la réduction du nombre de périphériques nécessaires, en proposant des mécanismes permettant la réutilisation de ces derniers. En outre, bien que cela ne soit pas la préoccupation principale de cette thèse, la réduction de nombre de périphériques utilisés constitue un élément de réponse pour la réduction des composants utilisés, ainsi que de la consommation énergétique de la globalité du système.

- **Approche centrée sur l'utilisateur** : Finalement, le facteur humain devrait être un point central pour ce type de système. En adoptant une approche de conception de système sociotechnique ambient, l'utilisateur est vu comme un acteur à part entière, plutôt qu'une cible subissant le système. Ce critère vient compléter plusieurs autres critères de conception, dans le but de clarifier la place et l'implication de l'utilisateur au sein du système. Ainsi, il est nécessaire que l'utilisateur soit représenté dans le modèle, pour que la prise en compte de ce dernier puisse se faire lors de la personnalisation des services à délivrer. En complément du volet de personnalisation, la transparence permet à l'utilisateur de devenir un acteur au sein du système, plutôt qu'il le subisse. Cela rejoint le respect de la vie privée, qui devrait être un des facteurs majeurs à prendre en compte. Enfin, en plus des personnes assistées par le système, il paraît également important que le système n'ignore pas l'ensemble des acteurs humains déjà impliqués pour soutenir les personnes aidées. Ainsi, il est nécessaire de mettre en ligne de compte le réseau d'aidants associés aux utilisateurs aidés.

Par ailleurs, notre cadre applicatif désigne la ville intelligente comme environnement dans lequel notre système doit opérer. Cela nous amène à mettre en lumière certains critères, vis-à-vis de ce cadre applicatif spécifique.

Puisque la ville intelligente compte un grand nombre d'entités, le système doit passer à l'échelle, ce qui fait écho aux critères de *décentralisation* et *d'adaptation*. Cette dernière est d'ailleurs cruciale dans un environnement ouvert, tel que l'environnement urbain. Cela est dû au fait de la forte dynamique inhérente à la foultitude de situations qui peut émerger et provoquer des imprévus.

Enfin, dans le cadre d'un SAA déployé à l'échelle de la ville, un certain nombre d'acteurs de différentes natures peut être impliqué. Les aidants proches de la personne aidée peuvent participer activement au système, au même titre que des aidants formels, comme le personnel médical, ou les décideurs des collectivités. C'est pourquoi il est important que les utilisateurs puissent avoir un contrôle sur l'usage et les données du système. Cela fait écho aux critères de la *transparence* et de la *centration sur l'utilisateur*, pour le respect de sa vie privée.

3. Analyse des SAA existants

Il existe des projets de systèmes ambiants dédiés à l'assistance, présentés dans la littérature scientifique. La majorité de ces projets proposent une assistance à domicile.

Le projet **OutCare** [40] propose un SAA pour le support des personnes touchées par la maladie d'Alzheimer. Ce système exploite l'usage d'un téléphone portable pour construire des informations de localisation. Ces informations permettent ensuite de fournir des services de supervision d'itinéraires et de rappels de mémoire. Ces informations sont récupérées sur un serveur, sur lequel des agents aux rôles distincts (collecte des informations GPS, détermination des situations inhabituelles, enregistrement des alertes, etc.) effectuent des traitements de synthèse. Les informations résultant de ces traitements sont ensuite transférées aux aidants compétents.

Ce projet fournit donc un soutien certain aux personnes souffrant de la maladie d'Alzheimer, en évitant d'être trop invasif, en se servant de données uniquement collectées sur le téléphone portable des utilisateurs. En outre, les données récupérées sont traitées pour fournir des alertes aux proches aidant, ce qui dénote que ce projet n'ignore pas la communauté d'aidants rassemblée autour de l'utilisateur central.

En revanche, le système ne fait usage d'aucun autre objet connecté, imposant donc ce téléphone comme point de communication, et donc de défaillance, unique. En outre, les données sont traitées sur un serveur central distant qui prend les décisions liées à l'accompagnement du sujet. La validité des critères de décentralisation et d'interopérabilité s'avère donc limitée, bien que le projet avance un intérêt certain pour les personnes touchées par la maladie d'Alzheimer et consiste en une des formes de soutien que peuvent apporter les SAA à l'extérieur du domicile.

KopAI [15] est un projet qui propose des services similaires d'assistance à l'orientation, de rappels de mémoire ainsi que de gestion de situations dangereuses. Il propose également une infrastructure similaire, avec un serveur central qui redistribue les informations acquises par le dispositif mobile de la personne aidée aux aidants.

Ce projet propose de délivrer une assistance à toute personne souffrant de démence, et qui peut bénéficier du soutien d'aide-mémoire et d'alertes. Il se veut donc plus générique que le projet *Outcare*.

Deuxièmement, rien n'indique le caractère distribué des prises de décision pour le lancement des alertes. Puisque les décisions sont prises sur un serveur central, la remise en

question de la conformité avec le critère de décentralisation demeure pertinente pour ce projet.

Enfin, au lieu de reposer sur un téléphone portable, ce projet propose l'utilisation d'un appareil mobile échangeant avec le serveur par une connexion sans-fil. Cela permet de déterminer la localisation de l'appareil dans des secteurs en déterminant à quel routeur il s'est connecté. Seulement cet usage réduit les chances que le système puisse fonctionner dans un cadre plus grand que celui d'une habitation ou d'un bâtiment.

Finalement, le projet est limité par rapport aux critères de conception que nous avons énoncés dans la section (2.2.2). Sur le plan de la *flexibilité* tout d'abord, puis le système repose sur le fait de localiser le secteur des utilisateurs par rapport à des serveurs de connexion sans-fil. La *décentralisation* de ce système est également limitée, du fait de la centralisation des données sur un serveur unique. Rien ne renseigne un modèle de référence utilisé pour la conception de ce système.

ROSETTA [59] est un projet européen qui résulte de la combinaison de trois projets, issus de l'informatique ambiante dédiée au domaine de l'assistance [60] : **CDN** [61], **EMERGE** [62] et **UAS** [63]. Le système proposé vise aussi à fournir un soutien aux personnes atteintes de démences. Les fonctionnalités couvertes comprennent la découverte des comportements routiniers, la détection des comportements déviants et dangereux, ainsi que l'affichage de rappels mémoires. Pour arriver à cet objectif, l'environnement des utilisateurs est augmenté par un certain nombre de capteurs, qui vont récolter des informations pertinentes pour fournir les services d'assistance. L'utilisateur peut interagir avec le système via une tablette, un modèle qui est fixe et disposé dans le domicile, tandis qu'un modèle portable permet de fournir quelques rappels à l'extérieur.

Notons que lors des différentes phases de développement du projet, un point d'honneur a été mis à la participation de différents utilisateurs : des personnes recevant le soutien ont pu donner leur avis lors de réunions, tandis que différents aidants professionnels ou non ont pu participer. L'expérimentation s'est faite sur deux sites différents : un en Allemagne et l'autre aux Pays-Bas.

En revanche, il est possible de constater que l'aspect décentralisé reste en retrait, avec les données récoltées sur une centrale domotique qui fait transiter les informations sur un serveur central. Ensuite, c'est à partir de ce serveur que les informations permettent de construire des tableaux de bord et des alertes, qui sont à destination des organisations aidantes.

En outre, la prise en compte des aidants informels semble encore limitée, tandis que l'assistance offerte se limite majoritairement au périmètre du domicile, ce qui laisse penser à une *flexibilité* limitée.

Le projet **CASAS** [64] propose des services liés à la reconnaissance d'activité et à la découverte d'activité. À partir de ces informations sur les activités des personnes à assister, des alertes et des rappels préventifs peuvent être envoyés. Ces rappels visent essentiellement la prévention pour la santé (ex : alerte de prise de médicaments, rappel de prise de rendez-vous médical, etc.), mais les auteurs ont profité du système pour proposer une assistance à la réduction de la consommation électrique (ex : rappel de fermeture de la porte du réfrigérateur, ou d'extinction d'une lampe).

Ce projet se distingue par la simplicité de mise en place des objets connectés, avec un kit peu coûteux et facile à installer. En outre, des essais ont été conduits en milieu réel, avec la mise en place du kit chez une vingtaine participants. Une validation a été faite par des questionnaires pour valider l'intérêt et l'utilisabilité du système.

Néanmoins, il y a peu d'informations relatives à l'aspect décentralisé du système. Et bien que les auteurs décrivent leur kit comme étant facilement extensible et évolutif (passage à l'échelle), le critère de flexibilité n'est pas clairement traité. Dans cette même lignée, le fonctionnement du système est destiné à un usage cantonné au domicile de l'utilisateur.

Les auteurs de l'article [65] ont proposé la conception d'un système visant la surveillance des données de santé mentale et physique, en montrant l'efficacité de ce système dans le cadre du soutien de personnes ayant un trouble psychotique. Pour arriver à cet objectif, le système offre un canal de communication entre la personne aidée et les aidants professionnels, tout en mettant à disposition un certain nombre d'informations à l'aidant, concernant d'éventuels symptômes, des rappels liés au profil de la personne, etc. Ce système a été testé dans le cadre d'une implémentation dans un centre hospitalier.

Un point d'honneur a été mis sur l'aspect de la confidentialité du système, en veillant à la sécurisation des données qui transitent entre les appareils de collecte, jusqu'à l'affichage aux aidants. En outre, le système se veut relativement flexible relativement à l'appareil qui est utilisé pour l'interaction entre la personne aidée et ses aidants.

Cependant dans ce cas, le système est limité à un soutien dans le cadre d'un environnement particulier : les chambres d'un hôpital. L'aspect « flexible », du système semble donc être limité. De même, les données sont centralisées sur une base de données,

et le système emploie une infrastructure taillée sur mesure pour l'assistance de cette population.

Il existe également des projets, comme [14], [66], qui proposent la conception d'appareils portatifs particuliers pour une assistance spécifique, par exemple une canne connectée pour le support des personnes à mobilité réduite, ou bien un appareil de type « Assistant personnel » (*PDA*, en anglais) pour la surveillance du bon déroulement des activités de personnes souffrantes de problème de mémoire. Mais ces solutions sont faites sur mesure, ce qui est limitant pour la flexibilité (et donc la généricité). De même, ne pas faire usage des environnements connectés limite le champ des possibles et nous ramène au problème du point de défaillance unique (« single-point-of-failure », en anglais).

Après avoir fait un tour des systèmes ambiants dédiés à l'assistance en général, nous allons considérer l'avancée de ce type de solutions à destination des PMR.

4. Analyse de l'existant pour assister les PMR

Comme l'a décrit [3], une grande majorité des personnes à mobilités réduites ou victimes de handicap ont défini leurs conditions de déplacement comme étant "Difficiles". Ces conditions de déplacements difficiles signifient que leurs conditions de vie sont également difficiles. En revanche, il existe quelques projets visant à améliorer ces conditions de déplacement.

D'un côté, plusieurs études concernent le développement d'un fauteuil roulant « intelligent », qui assisterait le déplacement des personnes en bénéficiant. C'est le cas du projet **WAD** [67], qui exploite des capteurs infrarouges et un codeur odométrique pour assister les déplacements du fauteuil roulant, en ce sens : les rendre plus « naturels ». Dans le même ordre d'idée, le système présenté dans [68] vise à offrir une assistance à la navigation en fauteuil roulant pour les déplacements des PMR à l'intérieur de leurs domiciles. Ce dernier repose d'ailleurs sur un ensemble d'agents qui exploitent les capteurs du fauteuil intelligent et coopèrent pour faire émerger la meilleure navigation possible.

Mais encore, d'autres projets visent à se passer du fauteuil roulant, en optant pour des orthèses pour le déplacement. C'est par exemple le cas du système **Mina** [69], qui consiste en un exosquelette accompagné de capteurs pour faciliter les déplacements des personnes ayant un handicap. En revanche, ces trois projets, typiques du domaine, restent limités par rapport aux critères de conception que nous avons énoncés. En effet, ces derniers ne

considèrent qu'un seul objet connecté bien qu'il puisse être doté de plusieurs capteurs. Ces systèmes se concentrent uniquement sur l'aide physique à la mobilité de la personne et sont donc peu adaptatifs, centralisés et peu flexibles. En outre, la connexion avec le cercle d'aidants n'est pas explicitée. En revanche, ces dispositifs devraient faire partie du paysage à considérer pour la conception d'une solution telle que celle que nous souhaitons faire émerger. Il conviendra de les intégrer au système ambiant lorsque ces dispositifs seront adoptés par les usagers.

De l'autre côté, plusieurs chercheurs ont oeuvré pour développer des applications de guidage des personnes à mobilité réduite. Les projets **Handimap** [70], **MobiliSIG** [71], [72] sont donc des logiciels qui recommandent les itinéraires plus adaptés, en prenant en compte des facteurs spécifiques comme la hauteur des trottoirs ou la présence d'obstacles. Les données nécessaires à la déduction de ces obstacles étant souvent fournies par les collectivités. Dans le même ordre d'idée, **WheelMap** [73] et **WE-MAP** [74] proposent des fonctionnalités similaires en optant pour une récupération des informations par une approche de production participative. Bien qu'appartenant au domaine de l'assistance, ces projets ne font pas usage d'un environnement instrumentalisé par des objets connectés pour fournir leurs services. En outre, bien que certains aient une approche participative, les utilisateurs occupent une place très réduite au sein du système en étant, au mieux une simple source d'information, au pire non représentés. En outre, ces systèmes sur-mesure sont très limités vis-à-vis des critères de flexibilité, d'adaptation et de personnalisation.

Enfin, parmi les systèmes visant à assister les déplacements PMR, nous pouvons citer les travaux portant sur la détection des chutes, comme les travaux de [75], [76]. Ces derniers sont spécifiques, mais présentent un intérêt à être intégrés à un système ambiant complet. Nous nous baserons sur ces derniers lors de nos expérimentations de simulation de cas de chute.

5. Synthèse sur les solutions actuelles

Les projets qui ont été présentés dans la section précédente sont destinés à accompagner une population donnée dans ses activités de la vie quotidienne.

Au regard des critères de conception que nous avons spécifiés dans la section (2.2.2), les systèmes proposés dans la littérature ne remplissent pas l'ensemble de ces conditions. L'*adaptation* et la *décentralisation*, pour ces systèmes, sont encore limitées, puisque la

majorité dépend d'un/de dispositifs spécifiques. Cela s'explique par l'approche « ad-hoc » qui a été adoptée dans ces projets.

En outre, le critère de *personnalisation* n'est pas toujours respecté, puisque certains des systèmes proposés, notamment ceux qui sont à destination des PMR, ne traitent quasiment pas des données liées aux profils des utilisateurs. Ne pas prendre en compte ces profils empêche donc de personnaliser les services rendus.

En termes de *transparence*, beaucoup de projets ont mobilisé des efforts sur ce critère. Tous les projets, qui ont été cités, mettent clairement à disposition leur fonctionnement, cependant, certains ne prévoient pas que le degré de soutien puisse être choisi par l'utilisateur.

De plus, comme nous l'avons dit, ces projets sont faits « sur-mesure », ce qui implique que leur *flexibilité* est fortement limitée, de même que leur interopérabilité. En outre, la majorité de ces systèmes ne reposent pas sur une base sémantique commune qui permettrait de spécifier les données produites en sortie.

L'*efficacité* est un critère qui a été mis de côté par ces projets. Presqu'aucun d'eux n'a explicitement visé une réduction de la consommation en énergie, ou en ressource matérielle. En outre, sans interopérabilité des systèmes, ou à minima des données, la réutilisabilité de ces systèmes demeure limitée. Tandis qu'en adoptant des modèles interopérables et réutilisables, les concepteurs n'ont pas à recommencer le travail de zéro.

La prise en compte du *facteur humain* est centrale pour ce type de système, et il serait faux de dire que ces systèmes ne l'ont pas pris en compte. En revanche, nous pensons que cette prise en compte a été partielle. En effet, la plupart des projets présentés n'offraient qu'une vision limitée de la prise en compte du cercle d'aidants (par exemple en ne les voyant que comme des destinataires des données de sortie), ou bien cela s'est fait au détriment des personnes aidées, qui ne se retrouvent plus au centre du système. De plus, du fait de leur approche limitée sur le plan des environnements intelligents et des objets connectés, nous pensons qu'il est possible de rendre ces systèmes plus performants en termes de robustesse et d'adaptation, tout en étant moins intrusifs.

Pour synthétiser, nous avons constaté que le paysage des systèmes ambiants dédiés à l'assistance est épars. Puisque ces projets présentent une approche « ad-hoc »,

l'interopérabilité de ces systèmes, et de leurs données, peut être perfectionnée. En outre, nous pensons que les utilisateurs du système, personnes aidées ou aidantes, devraient avoir une place et une implication plus prépondérantes.

Cela nous amène à nous questionner sur le fait qu'il manque un socle commun pour pallier ces problèmes. Ce socle commun, prenant la forme d'un modèle d'architecture dans notre cas, pourrait solutionner plusieurs des limites évoquées. À condition, par ailleurs, que ce dernier respecte, lui-même, les critères de conception énoncés.

3. Modèles d'architecture pour les SAA

1. Modèles et architectures de SAA

Comme nous venons de l'aborder, les projets qui viennent d'être présentés, ont été construits selon une architecture conçue sur-mesure, ce qui révèle le manque d'un modèle clairement établi sur lequel ces architectures seraient construites.

Un modèle est une structure de concepts interconnectés, pour un domaine donné [10]. Cette structure permet de définir, de manière abstraite, l'organisation des différents éléments constituant le type de système que l'on souhaite concevoir. Plus le modèle est abstrait, détaché des éléments spécifiques et concrets, plus il sera générique et pourra être utilisé comme base commune à plusieurs modèles d'architecture spécifiques. Une architecture consiste à la mise en correspondance d'un modèle avec des éléments logiciels et physiques concrets, pour une mise en application réelle. La nécessité de partir d'un modèle tenant compte de l'ensemble des critères énoncés, et couvrant les concepts des domaines impliqués, est d'autant plus vrai dans le contexte du développement d'un SAA. Comme nous l'avons écrit précédemment, un SAA doit créer une cohésion entre un ensemble d'éléments fortement hétérogènes, que sont les utilisateurs aidés, le cercle d'aidants, les services à délivrer ainsi que les objets connectés [10], [77]. Un modèle unifié, permettant la conception d'une architecture standardisée, indépendante de l'implémentation et des technologies utilisées, devient une nécessité pour éviter l'éparpillement et la divergence entre les systèmes d'assistance ambiants proposés actuellement [10]. Ainsi, certains chercheurs ont proposé des modèles et architectures plus génériques pour la conception et la mise en opération des systèmes ambiants dédiées à l'assistance.

Les auteurs de l'article [78] ont proposé une architecture de système ambiant dédié à l'assistance, basé sur un ensemble de micro-services modulaires et indépendants. Deux modules gèrent l'accès réseau aux objets connectés, qui peuvent être connectés, sans-fils, sous la forme d'un réseau maillé, ainsi que l'accès aux données produites par ces objets. Un autre module est chargé de mettre à disposition les informations collectées via une API RESTful, avec un accès géré et sécurisé par un autre module. Les applications clients peuvent être construites en reposant sur cet accès à l'API REST.

L'architecture proposée a pour avantage de proposer une modularité, organisée en micro-services. Cette approche décentralisée permet de rendre indépendants les différents composants de l'architecture. Cela renforce, en outre, le caractère adaptatif de l'architecture. Les auteurs ont également impliqué l'utilisateur dans la conception de l'architecture, en testant le système en milieu réel, avec cinq personnes âgées volontaires. En outre, l'approche de traitement local (c.a.d. sans passer par des serveurs de traitements coûteux financièrement et écologiquement [79]) est un avantage pour les critères d'efficacité et de respect de la vie privée. Cette approche s'apparente aux approches de types « edge-computing », qui favorisent les traitements locaux, avant l'envoi des données pertinentes uniquement aux services. C'est un cheminement hybride pertinent, puisqu'il offre les avantages du « tout local » en termes de sécurité, d'efficacité et de respect de la vie privée. Tout en autorisant un usage restreint des serveurs lorsqu'une forte puissance de traitement est nécessaire.

En revanche, dans cet article, l'architecture proposée n'est pas mise en relation avec un modèle sur lequel elle repose. C'est pourquoi cette proposition ne rend compte que de l'environnement intelligent et des objets connectés qui le composent. Cette architecture offre donc une façon de faire remonter les données à des services, cependant, elle ne propose pas de cadre établie pour concevoir un service intégré. De plus, les utilisateurs ne sont pas non plus intégrés dans cette architecture. Cela empêche l'existence d'un « fil rouge » qui permette de faire une conception « complète ». En ce sens, qui explicite la construction des services avec les appareils de l'environnement et le lien avec les acteurs humains.

SOPRANO (pour « *Service-Oriented Programmable Smart Environments for Older Europeans* ») [80] est un projet européen qui vise le développement d'un système ambiant dédié à l'assistance des personnes âgées à domicile. Pour la conception de ce projet, les concepteurs ont fait plusieurs choix particuliers. Tout d'abord, la conception du projet SOPRANO se veut être centrée sur l'utilisateur. Pour cela, la conception a débuté par une

phase de récolte d'informations sur les besoins des personnes âgées qui pourraient être supportées par un système technologique [81]. Ces premiers jalons ont amené les équipes de ce projet à développer un modèle basé sur la représentation des connaissances et la sensibilité au contexte, représenté au travers d'une ontologie [82].

Le modèle de SOPRANO est basé sur un cœur logiciel appelé « SAM ». Ce dernier est composé de trois briques qui doivent respectivement collecter des informations contextuelles et faire remonter ces changements d'état sous forme « d'évènements ». Ces évènements sont traités par un gestionnaire procédural, qui doit décider des objectifs à atteindre pour ramener le système dans un état plus « favorable ». Ces objectifs sont répercutés à la dernière brique logicielle, qui doit effectuer les actions relatives à l'accomplissement des objectifs statués par la brique précédente. Les informations traitées pour cette délibération des actions à entreprendre sont donc structurées par l'ontologie qui modélise l'architecture.

Le modèle du projet SOPRANO présente pour avantage de représenter les composants de l'environnement connectés, ainsi que les utilisateurs et leurs préférences. En outre, cette ontologie permet d'assurer la cohérence des échanges entre les différents composants du système. De plus, la conception du projet a été participative, en prenant l'avis de 90 personnes consultées et le cercle d'aidants possède une représentation explicite dans le modèle.

Cependant, l'environnement dans lequel le système peut être déployé est cantonné à celui du domicile, ce qui est limitant pour le déploiement du système dans un environnement urbain extérieur. En outre, même si le modèle permet de construire la base de connaissances permettant la construction des services, ce dernier semble restreint sur l'aspect de la description et la construction de ces services. C'est un aspect qui pourrait être amélioré pour faciliter le développement et la mise en application de services associés à ce modèle. Enfin, la sémantisation des données transitant au travers de l'architecture est un aspect manquant du modèle proposé. Ceci constitue un frein à la réutilisabilité des données, ce qui bride l'aspect flexible et l'interopérabilité.

Le projet SOPRANO reste tout de même un modèle de référence, sur lequel plusieurs projets se sont basés. C'est le cas du projet **OpenAAL** [83]. Il s'agit d'un modèle d'architecture « open-source », décrit dans une syntaxe proche de RDFS.

Adoptant une approche basée sur une ontologie, ce modèle facilite la description de services composites, en s'appuyant sur le framework OSGi. OpenAAL vient donc compléter le modèle du projet SOPRANO, en s'axant sur la description des services.

Pourtant, **OpenAAL** ne résout pas certains défauts tels que le cadre environnemental, qui reste limité au domicile. En outre, le critère *d'adaptation* demeure limité, par exemple par le

cadre de construction des services, qui ne prévoit pas de mécanismes d'adaptation en cas de panne. Enfin, d'après l'article de A. El Murabet et al. [10], ces deux modèles manquent de standardisation, ce qui bride l'interopérabilité des systèmes basés sur ces modèles.

Les auteurs de **CoCaMAAL** [84] proposent un modèle de SAA basé sur le paradigme de l'informatique en nuage (« Cloud computing »). D'après ces auteurs, la masse grandissante d'objets connectés implique une grande quantité de données créées, dont le traitement ne pourrait être fait qu'au travers de serveurs cloud. Leur modèle s'appuie également sur une ontologie pour modéliser les informations contextuelles que le système doit prendre en compte pour adapter les services.

Ce modèle a pour avantage d'adopter une approche où il n'y aurait pas de limitation de puissance pour le traitement des données issues du SAA. Il suffirait d'ajouter un serveur pour ajouter de la puissance de calcul. Le passage à l'échelle est donc le critère premier, que le modèle valide. De plus, ce modèle met en avant une meilleure flexibilité, du fait de deux avantages :

- Premièrement, la puissance de calcul permet l'ajout d'autant d'objets connectés que l'on souhaite en mettre ;
- Deuxièmement, du fait de l'intrication forte avec le réseau Internet et le Web, l'ajout de service se veut plus simple, en ayant qu'à ajouter le Webservice dans la liste des services gérés par la flotte de serveurs.

En revanche, cette approche nous semble très limitée pour le contexte spécifique des SAA, notamment du fait de son intrication forte avec l'Internet et le Web. Justement, si une coupure du système avec Internet venait à arriver, cela le rendrait totalement inopérant. En outre, cette approche ne considère pas l'impact écologique, et donc l'efficacité d'un tel système. Ainsi, l'approche choisie propose de résoudre les nouveaux problèmes rencontrés par l'ajout de dispositifs, et d'utiliser une flotte de serveurs pour gérer ces nouveaux appareils. Cela implique de continuer à saturer le réseau Internet avec un grand nombre de requêtes. Cette approche ne nous paraît donc pas viable du point de vue de l'efficacité. Une gestion des données complètement délocalisée sur Internet pose également la question de la gouvernance des données, et donc du respect de la vie privée.

Finalement, le projet **UniversAAL** [85] est une plateforme qui englobe à la fois : un modèle de référence de haut-niveau d'abstraction permettant l'intégration d'autres systèmes du domaine de l'assistance ambiante ; et une architecture de référence facilitant la conception d'applications dédiées à l'assistance ambiante, et basées sur ce même modèle.

Sa généralité en fait une des plateformes les plus complètes pour la conception de SAA. **UniversAAL** intègre des mécanismes permettant l'interopérabilité avec d'autres plateformes de SAA, ce qui en fait un modèle très *flexible*. Pour le volet *adaptatif* de la solution, le modèle propose, également, l'intégration d'ontologies en RDF ou OWL pour apporter une dimension sémantique aux données issues du système, mais également des ontologies d'autres plateformes pour l'intégration.

Cependant, cette grande ouverture n'empêche pas un manque de représentation des organisations des utilisateurs (aidés et aidants). De manière générale, nous observons que l'humain n'occupe pas une place centrale dans ce modèle, comme le montre la figure 5. En outre, les auteurs de [10], [58] soulignent l'absence de la prise en compte de certains concepts importants, comme le risque ou de notions de domaines spécifiques. Et enfin, ce projet est né de l'agrégation de plusieurs autres projets du domaine (dont le projet OpenAAL). Il en résulte un modèle complexe, ce qui en fait un obstacle à son application.

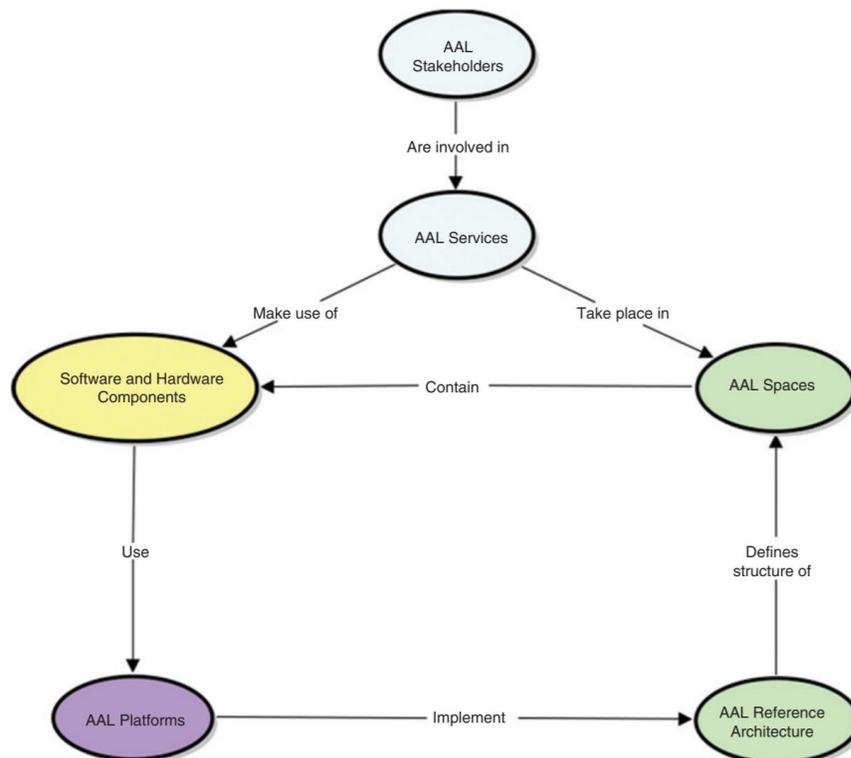


Figure 5 – Carte des concepts principaux du modèle du projet UniversAAL [85]

2. Ontologies pour les SAA

Bien qu'un certain nombre de systèmes, modèles et architectures que nous avons présentés exploite une ontologie [82], [84], [85], [78]. Ces dernières, pour la plupart, ont été conçues spécifiquement pour un modèle dédié. En d'autres termes, ces ontologies ne sont pas, elles-mêmes, le résultat d'une intégration d'ontologies existantes et traitant de domaines indirectement reliés à l'assistance à domicile. Dans les paragraphes suivants, nous proposons d'étudier des ontologies connexes au domaine de l'assistance ambiante, mais qui ne décrivent pas directement des modèles de systèmes ambiants à l'assistance.

Il existe, en plus des ontologies qui traitent de modèle de SAA, des ontologies formalisant des concepts de domaines plus spécifiques dans le domaine de l'assistance. C'est par exemple le cas de l'ontologie proposée dans [86], qui traite de la modélisation et de la reconnaissance des activités effectuées par les utilisateurs, au sein d'une maison intelligente.

Par ailleurs, plusieurs ontologies existantes visent à la description d'environnement intelligent et de l'informatique ambiante.

Dans [54], les auteurs présentent une ontologie formelle permettant la construction d'ontologies plus spécifiques, portant sur la modélisation de systèmes ambiants. Dans cette ontologie formelle sont décrits des concepts importants du domaine, comme le *contexte*, les *activités*, les *personnes* ou encore la *localisation* et les *objets*. Ces concepts y sont décrits avec un haut-niveau d'abstraction (par exemple, en offrant la relation de *granularité*) pour faciliter le développement d'ontologies plus précises, et le raisonnement sur ces dernières.

Un autre concept important à définir pour l'informatique ambiante, et qui est intrinsèquement lié à notre critère d'*adaptation*, est le concept de *contexte*. Dans la littérature scientifique de ce domaine, le *contexte* pourrait être vu comme une « situation », c'est-à-dire un ensemble d'informations portant sur des entités, des localisations, des activités, ou des personnes. Plusieurs travaux sont centrés sur ce concept de *contexte* dont [18], [87], [88]. Les ontologies CONON [18] (présentée sur la figure 6) et SOUPA, présentée dans [89], sont d'ailleurs des ontologies de référence dans ces domaines.

Cependant, les ontologies que nous venons d'aborder traitent généralement de l'informatique ambiante à domicile. Certaines ontologies visent à résoudre des problèmes plus spécifiques au domaine des villes intelligentes.

Les travaux présentés dans [90] proposent l'usage d'une ontologie spécifique pour structurer et unifier les données issues d'un ensemble de bases de données hétérogènes, afin de pouvoir construire des services applicatifs plus variés pour les villes intelligentes. Dans [91], les auteurs présentent une ontologie permettant de structurer l'ensemble des services logistiques qui pourrait être déployé dans une ville. Ces deux articles sont plutôt centrés sur les décideurs et organismes publics de la ville. Plus proche de la vision centrée sur l'utilisateur que nous adoptons, l'ontologie présentée dans [92] propose la description des concepts de l'informatique ambiante, appliquée au contexte de la construction de bâtiments intelligents.

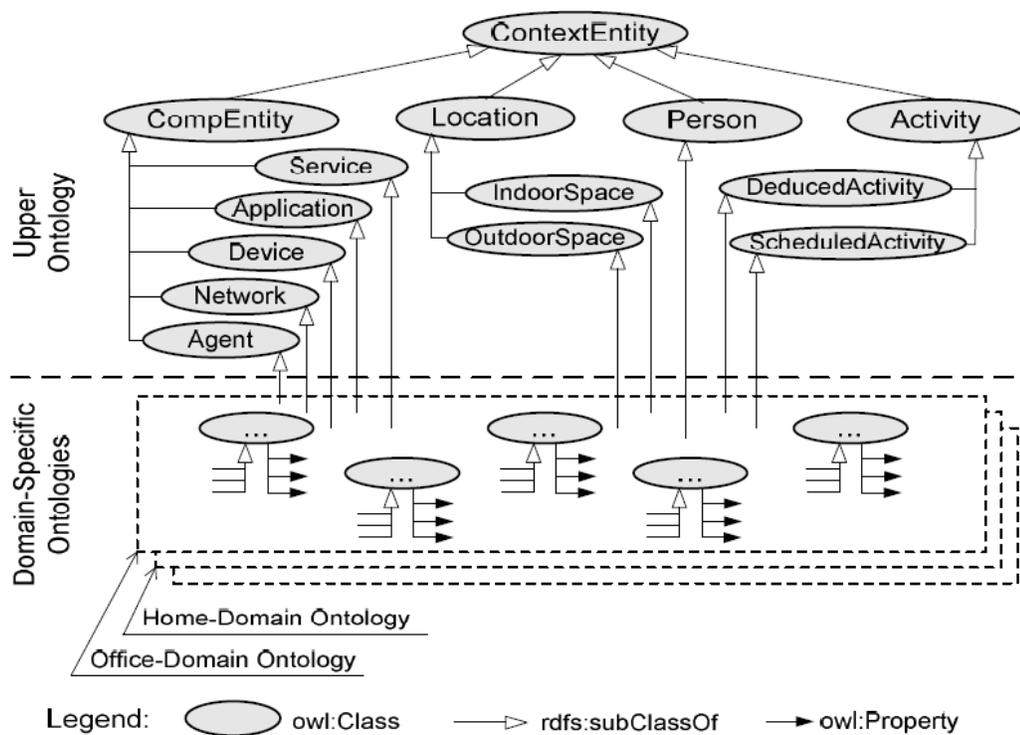


Figure 6 – Représentation partielle des classes principales de l'ontologie CONON [18]

Enfin, il est possible d'identifier des travaux portants sur le domaine de l'assistance ambiante, qui sont basés sur le paradigme multi-agents, et qui font usage d'ontologies pour structurer le modèle.

En effet, les ontologies sont une structure de choix pour formaliser les échanges entre les entités d'un système multi-agents. Dans l'article [93], les auteurs proposent de gérer des mécanismes de délégation de tâches inter-agents par la négociation argumentée, appuyée sur l'échange de connaissances structurées selon une ontologie.

Encore plus proche de nos travaux, le projet présenté dans [94] vise la construction de services visant la gestion des appareils connectés liés au confort dans un domicile. Traitant également d'un système ambiant, le système proposé repose sur un système multi-agents pour le contrôle de l'infrastructure des objets IoT, au travers d'un environnement partageant les connaissances sur cette infrastructure. Cet environnement d'échange des connaissances est donc structuré suivant une ontologie.

Nous pouvons conclure cette section sur l'affirmation qu'il existe un certain nombre d'ontologies couvrant partiellement l'ensemble des domaines en jeu pour la conception d'un SAA. Nous pensons que ces ontologies foisonnantes ont tout de même un intérêt certain pour la conception d'un SAA. Nous nous appuyerons sur ces dernières pour l'élaboration de notre ontologie.

3. Synthèse et positionnement des contributions

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, il existe un nombre conséquent de propositions de systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Nous avons montré que ces dernières, en plus d'être disjointes, ne rendent pas compte de l'ensemble des critères de conception que nous avons extrait de la littérature sur le domaine.

Pour répondre à cette problématique d'éparpillement, certains projets ont proposé des modèles et architectures plus génériques. Pourtant, les articles faisant l'état de l'art de ces solutions ont montré que ces modèles ne validaient pas l'ensemble des critères nécessaires.

C'est pourquoi notre première contribution consiste en un modèle réutilisable pour le développement de SAA. Ce modèle (*NEXUS*) permet la prise en compte de l'ensemble des éléments du système (Objets connectés, utilisateurs, services, agents). Ce modèle repose sur le paradigme multi-agents pour la construction des agents chargés de délivrer les services, et des *agents-avatars*, qui jouent le rôle de médiateurs entre le système et les personnes. Cette contribution a été portée à la communauté dans un article accepté pour la conférence des *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents* [95].

Nous avons également remarqué l'intérêt des ontologies pour la conception des SAA. Et bien qu'une bonne partie des solutions proposées actuellement utilisent une ontologie, cette dernière se révèle parfois limitée, et la majorité des ontologies proposées ne reposent pas sur des ontologies connexes faisant référence dans le domaine. Enfin, bien qu'intrinsèquement lié au domaine de l'intelligence ambiante, nous avons noté que le

paradigme agent reste encore sous représenté dans les modèles traitants des SAA. Et lorsqu'il est formalisé, sa représentation nous parait limitée et partielle par rapport au lien qu'il peut avoir entre les objectifs d'un agent, la représentation de l'environnement instrumenté, et la délivrance des services.

Notre deuxième contribution complète le modèle présenté, formalisant ses concepts et en apportant la sémantique nécessaire aux concepteurs ainsi qu'aux agents du système. Il s'agit d'une ontologie (*OfASCIA*) qui s'appuie sur une agrégation et un enrichissement d'ontologies de références dans les différents domaines en jeu (ontologie pour la notion de contexte, d'activité, de localisation, etc.). Cette dernière offre un cadre sémantique qui relie les différents concepts de l'ensemble des thématiques abordées pour la conception de SAA. Elle a été présentée dans un article proposé à la conférence TOTH2020 [96].

4. Mise en opération des SAA

1. Déploiement et expérimentation en milieu réel

Après avoir discuté la phase de modélisation de la conception d'un SAA, nous allons aborder la phase d'implémentation. Plus précisément, nous allons étudier comment ces systèmes sont généralement déployés pour leur expérimentation.

Dans plusieurs cas, après avoir conçu le système, et avant son déploiement final, les concepteurs entament une phase d'expérimentations en milieu réel. Cette phase consiste à déployer le système dans un environnement contrôlé afin de vérifier que le fonctionnement valide les spécifications attendues.

Dans le cadre des SAA, puisque ces systèmes sont limités à l'environnement domiciliaire, le système est installé chez un nombre limité de personnes concernées. On fait fonctionner le système avec ces personnes sur une durée également limitée, pour à la fin valider ou non, que le système a respecté le cahier des charges établi. Pour effectuer cette validation, il existe deux moyens principalement utilisés dans les solutions actuelles. Premièrement, il est possible, pendant ou après la phase d'expérimentation, de soumettre un questionnaire (écrit, numérique ou oral) aux utilisateurs qui ont testé le système. Ce questionnaire doit être compréhensible et correctement structuré pour recueillir les retours des utilisateurs, sur ce qui a été positif, ce qui a fonctionné de la manière attendue, mais également sur les limites présentes. Les articles [97], [98], [74], [78], [65] sont des exemples de travaux exploitants cette technique. La deuxième technique consiste à récolter et analyser l'ensemble des

données produites par le système, pour vérifier que celles-ci sont bien cohérentes avec nos attentes. Cette technique est, notamment, utilisée dans les travaux suivants : [99], [14], [68], [64], [65]. Les deux techniques présentées peuvent être combinées pour valider les résultats attendus, tant sur le plan quantitatif que qualitatif [65], [98].

Des expérimentations en milieu réel ont pour avantage de pouvoir expérimenter le système dans des conditions qui auraient pu ne pas être prévues par les concepteurs. C'est par exemple le cas lorsque le modèle sur lequel repose le système n'est pas suffisamment réaliste, notamment dans le cadre de systèmes ouverts. Cela est d'autant plus vrai pour la conception de systèmes complexes et impliquant des acteurs humains et d'autres éléments fortement hétérogènes, comme un SAA. En outre, ce type d'expérimentations permet de confronter le système aux véritables utilisateurs du système.

En revanche, des expérimentations en milieu réel peuvent s'avérer très coûteuses financièrement, notamment lorsqu'il est nécessaire de faire un grand nombre d'itérations des expérimentations. De plus, ce type d'expérimentation nécessite plus de moyens humains, en requérant des personnes prêtes à expérimenter le système. Ces deux limitations posent donc la question de la limite de la durée pendant laquelle on peut tester le système.

2. Expérimentations en simulation des SAA

Une autre façon d'aborder la phase d'expérimentation du système consiste à le tester dans un contexte de simulation. Cette simulation permet alors d'éprouver le système dans des conditions contrôlées par les concepteurs.

Les données en sortie du simulateur sont contrôlées en rapport à ce qui est attendu en réel, par exemple avec d'autres données « issues du réel » selon un intervalle de confiance. C'est pourquoi la validation ne peut être que quantitative, dans ce cas.

Dans la littérature portant sur les solutions de SAA existantes, un certain nombre de travaux ont exposé le fait d'expérimenter les systèmes en simulation. C'est le cas des projets suivant : [39], [100], [16], [84], [4], [101]. Dans la plupart des cas, la simulation consiste à imiter des comportements humains dans un environnement instrumenté virtuellement. Les données de sortie du système sont analysées pour étudier leur réalisme et vérifier que le système se comporte comme attendu.

Le choix de pratiquer des expérimentations en milieu simulé procure des avantages en termes de facilitation de mise en place. Effectivement, il est beaucoup moins coûteux financièrement et humainement de simuler les appareils et les utilisateurs du système [4]. En outre, la simulation offre un environnement complètement contrôlé aux concepteurs. Cela permet de pratiquer des expérimentations dans des conditions spécifiques et/ou extrêmes, qu'il serait impossible ou dangereux d'obtenir en milieu réel. Finalement, la simulation étant par essence détachée de notre déroulement du temps, cette dernière permet de représenter des phénomènes sur des échelles de temps très différentes. Cet avantage permet de pratiquer des expérimentations sur des périodes virtuellement très longues, ce qu'il aurait été difficile de faire en milieu réel.

En revanche, une simulation repose sur un modèle. En ce sens, il n'est possible de fabriquer des imitations du monde réel qu'à partir des connaissances que nous avons de celui-ci. Ainsi, si nous n'avons pas assez de connaissances sur le système réel, a priori, il est possible que notre simulation offre des résultats très éloignés du monde réel. Ce qui n'aurait que peu d'intérêt.

3. Limites de ces approches

Comme nous venons de le constater, il est possible d'adopter deux approches pour l'expérimentation de notre système : les tests en milieu réel ; ou bien en environnement simulé.

D'un côté, pratiquer les expérimentations en milieu réel est plus coûteux financièrement, en temps, ainsi qu'en moyen humain [21], [39]. En outre, le système pourrait ne pas être testé dans certaines conditions exceptionnelles.

D'un autre côté, tester le système dans un environnement simulé pourrait s'avérer limité, notamment pour des situations qui n'auraient pas été prévues par les concepteurs, et qui pourtant arriveraient dans le milieu réel.

Finalement, comme nous l'avons montré dans les sections précédentes, dans la majorité des cas, les expérimentations se font soit en milieu réel, soit en simulation. Ce qui bride les bénéfices apportés par ces approches. Pourtant, certains travaux considèrent ces deux approches et procèdent donc à des expérimentations en deux phases : une première en simulation ; puis un test en milieu réel. Pourtant, ces phases restent hermétiques et

distinctes. Dans la section suivante, nous présenterons une approche qui permet de combler l'ensemble de ces limitations.

4. Simulations hybrides

Les simulations hybrides constituent une méthodologie nouvelle de la phase d'expérimentation. Elle consiste à commencer les tests dans des environnements simulés dans lesquels seront ajoutés, progressivement, des éléments réels. Le réalisme du modèle simulé est donc ajusté, au moyen de boucle de rétroaction, après chaque ajout d'un élément, comme montré sur la figure 7.

Ce processus d'expérimentations permet donc de tirer le meilleur parti des deux mondes. En commençant les expérimentations par une phase de simulation, cela permet de commencer cette phase plus tôt, du fait des coûts en temps, financier et humains plus bas.

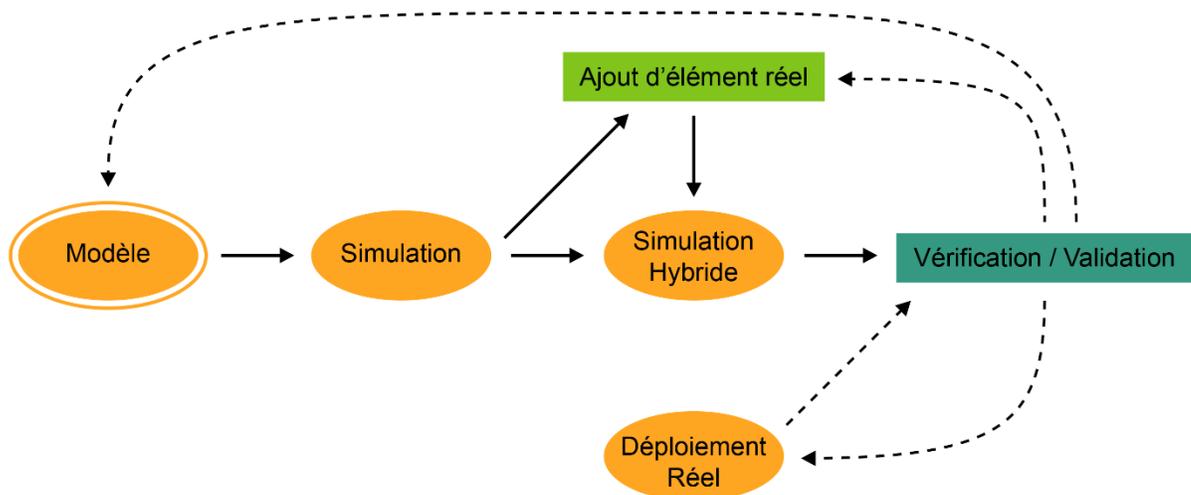


Figure 7 – Déroulement des phases de la méthodologie par simulation hybride
(les flèches en pointillées indiquent que le chemin prit est l'un ou l'autre, suivant le niveau de validation par rapport au modèle)

Dans le cadre d'un projet dont le développement est distribué entre plusieurs équipes, chaque groupe d'expert peut travailler sur une partie de la solution (par exemple un dispositif, ou un agent chargé de délivrer un service particulier), de manière tout à fait asynchrone, en simulant les parties qui ne sont pas encore disponibles [4]. Le fait de procéder par simulation

permet de pouvoir tester un plus grand nombre de scénarii, ainsi que dans des conditions particulières.

L'ajout progressif d'éléments réels (on parle de « Hardware-in-the-Loop » pour l'ajout de dispositifs), permet de pallier les limites du modèle, en ajoutant des données réalistes qui auraient pu ne pas être prévues par les concepteurs. Cette progression vers le réel permet d'enrichir le modèle en le confrontant à des situations réalistes, ce qui peut apporter des bénéfices sur les connaissances que nous avons à propos de ce modèle [21]. De plus cela permet au système d'être testé dans un plus grand nombre de configurations différentes.

En plus de créer un pont cohérent entre le passage du monde simulé au monde réel, en amont du déploiement réel, l'approche par simulation hybride permet d'étudier comment le système va se comporter dans de nouvelles conditions (changement des ressources, ou du nombre d'utilisateurs par exemple). Ces nouvelles conditions pouvant être simulées, et confrontées avec tout ou une partie déjà déployée du système [102]–[104].

Enfin, en plus d'apporter au modèle et au système, une approche par simulation hybride peut offrir aux dispositifs qui sont développés. En effet, dans l'autre sens, il est possible de se servir de la simulation pour tester de nouveaux dispositifs dans un environnement contrôlé, et malgré tout réaliste, car déjà éprouvé sur le terrain.

5. Synthèse et positionnement des contributions

Comme nous venons de le montrer, dans l'état de l'art actuel, la phase d'expérimentation est souvent limitée à un milieu réel ou à un milieu simulé. Il existe des exceptions parmi ces travaux, où des équipes ont pratiqué ces deux phases de manière cloisonnée.

Pour résoudre ce verrou, nous avons montré qu'une approche par simulation hybride permet de bénéficier des avantages des deux méthodes, en pouvant démarrer plus tôt la phase d'expérimentation, en ayant une réduction des coûts en temps, humains et financier de cette phase et en faisant converger notre modèle vers le réalisme plus rapidement.

Les travaux portant sur le domaine des SAA, et faisant usage de technique de simulation hybride sont rares. Seulement quelques travaux [4], exploitent la plateforme OSGi pour intégrer des données issues de capteurs réels dans leurs simulations. Subsiste la question de

trouver la méthode la plus adaptée pour développer la simulation d'un tel système, tant sur le plan du réalisme que des coûts.

C'est pourquoi, dans la droite lignée du reste de nos contributions, nous pensons qu'il est nécessaire d'avoir une plateforme cohérente qui permette d'unifier l'ensemble des étapes du processus et éléments du système que l'on souhaite mettre en place. Or, un système ambiant dédié à l'assistance partage les caractéristiques substantielles d'autonomie et d'hétérogénéité propres à l'informatique ambiante et à l'Internet des Objets. En plus de cette infrastructure d'objets connectés, les systèmes ambiants dédiés à l'assistance comptent une dimension humaine qu'il est nécessaire de prendre en compte. En outre, les simulations à base de système multi-agents sont adaptées pour reproduire des interactions sociales et des comportements humains [4], [12].

Ainsi, une simulation multi-agents hybride permet de modéliser, l'ensemble des composants en jeu : les objets connectés (qui peuvent être envisagés comme des agents à part entière ou comme des outils à disposition des agents) ; les agents logiciels chargés de délivrer les services d'assistance ; et enfin les personnes, utilisateurs qui bénéficient de ces services ou qui participent au fonctionnement de ces derniers. Donc, au niveau macro, le paradigme multi-agents permet d'observer le système ambiant dédié à l'assistance en tant que système distribué et coopératif où objets connectés, agents logiciels et utilisateurs humains coopèrent pour améliorer la qualité de vie des personnes en besoin d'assistance. Au niveau micro, l'approche Agent permet d'envisager chaque élément en tant qu'entité autonome. Cela facilite la mise en œuvre des services ainsi que celle des interactions entre les différentes entités. En effet, le développement des services à cette échelle « micro » est facilité pour les personnes expertes du domaine de l'assistance, qui n'ont pas à se préoccuper du fonctionnement du système informatique.

C'est en ce sens que notre dernière contribution consiste en la proposition d'une méthodologie de mise en opération d'un système ambiant dédié à l'assistance basée sur l'approche de simulation hybride.

5. Synthèse

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté l'état de l'art construit à partir de l'étude bibliographique nécessaire à la conception d'un système ambiant dédié à l'assistance des personnes à mobilité réduite.

Par sa nature pluridisciplinaire, cette conception nous a amené à faire une étude bibliographique à propos de champs de l'intelligence artificielle, plus précisément des systèmes multi-agents, de l'intelligence ambiante, ou encore de la représentation des connaissances. Comme nous l'avons montré, ces domaines de l'IA présentent un intérêt certain pour l'étape de modélisation des systèmes distribués. Il a été également abordé ces questions sous le prisme du champ de l'assistance à la personne.

Nous avons notamment identifié, associé et exposé les critères de conception jugés pertinents dans la littérature, pour des systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Nous avons fait un tour d'horizon de ce type de système dans la littérature scientifique, et à partir de ces critères, nous en avons proposé une évaluation. Il en résulte que les solutions qui étaient actuellement proposées adoptaient pour la plupart une approche « ad-hoc ». Ce type d'approche sur-mesure bridant l'interopérabilité, et la réutilisabilité de ces projets, nous avons constaté la nécessité de partir d'un modèle suffisamment générique pour la conception des systèmes ambiants dédiés à l'assistance.

Par la suite, nous avons montré que quelques modèles ont été proposés pour pallier le problème précédent. Cependant, ces derniers présentent des limites les empêchant de servir de référence et validant l'ensemble des critères mis en lumière, pour la conception de ce type de système. En réponse à ces limites, nous faisons la proposition d'un modèle réutilisable pour la conception de système socio-informatique ambiant à destination de l'assistance des personnes. La conception de ce modèle reposant sur la validation de ces critères, tout en intégrant l'ensemble des facettes nécessaires à ce type de système. Nous avons également intégré le paradigme multi-agents dans ce modèle, en tant que pierre angulaire pour la conception des services et l'utilisation des ressources de l'environnement intelligent.

Nous remarquons par ailleurs qu'en raison de la complexité induite par l'hétérogénéité des entités en jeu dans les systèmes ambiants, les ontologies occupent une part importante dans la conception de tels systèmes. Malgré cela, nous avons aussi observé qu'un grand nombre des ontologies employées pour la conception des SAA ne reposaient pas

sur des ontologies connexes de référence, par exemple les ontologies de références qui traitent de la notion de contexte. Notre contribution repose également sur une ontologie qui permet : de formaliser le modèle d'appui ; de s'assurer de la cohérence logique et sémantique de ce modèle grâce aux outils d'inférences ; de structurer sémantiquement deux niveaux de connaissances qui sont les données produites par le système, et également les connaissances permettant la communication entre les agents du système. L'ontologie que nous proposons s'appuie également sur l'agrégation de plusieurs ontologies de références dans les différents domaines qui contribuent à la conception d'un SAA. Notre modèle et l'ontologie associée sont centrés sur la validation des critères énoncés, une simplicité facilitant sa réutilisation pour la conception d'autres systèmes, ainsi que la place de l'humain dans le système. Ce dernier possède son entière représentation intégrée avec le reste des entités en jeu dans le système. Ceci le différencie des approches traditionnelles plus centrées sur l'aspect informatique et le rapproche de notre approche de conception socio-technique.

Enfin, nous avons dressé un bilan des approches proposées pour la mise en opération et les expérimentations des systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Nous avons montré les deux grandes approches distinctes qui consistent : soit à tester le système en milieu réel, soit à l'expérimenter dans un environnement simulé. Nous avons discuté des limites de ces approches et présentons l'approche par simulation hybride comme solution pour bénéficier de l'ensemble des avantages apportés par ces deux techniques. C'est l'objet de notre contribution, qui vise à montrer l'intérêt de cette approche hybride en expérimentant notre système dans le cadre d'une simulation hybride.

Chapitre 3

Contributions

Pour rappel, l'objectif de cette thèse concerne la mise en place d'un système ambiant dédié à l'assistance aux personnes à mobilité réduite, dans un environnement de type ville-intelligente. Cette mise en place est développée sur une approche de l'intelligence artificielle. Plus précisément, nous avons déterminé que l'étude des domaines des systèmes multi-agents, ainsi que de la représentation des connaissances (qui sont tous deux des sous-domaines de l'intelligence artificielle) ont à apporter pour la question.

À partir du constat émergeant des solutions actuelles et dressé dans le chapitre précédent, nous avons conclu de la nécessité de mettre en place une base générique qui permette d'accélérer le développement de systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Il apparaît que cette généricité est la solution permettant de pallier aux limites d'interopérabilité des solutions actuelles, qui reposent la plupart du temps sur une approche ad-hoc. Enfin, il a été souligné que l'ensemble des personnes impliquées dans ce type de système n'était, souvent, pas représenté. Cela amène à la mise de côté de certains acteurs humains, pourtant essentiels dans de tels systèmes d'assistance.

Dans le présent chapitre, nous abordons les contributions qui ont été mises en place dans ce travail de thèse, pour apporter des solutions aux verrous que nous avons mis en lumière précédemment.

La première section (**3.1.**) décrit l'ontologie qui a été construite, comme première brique, pour la mise en place des autres éléments de la solution proposée. À partir de cette ontologie, le modèle d'architecture, permettant de répondre aux problématiques énoncées, est dépeint dans la section suivante (**3.2.**). Finalement, la section (**3.3.**) traite de la question de la mise en place d'un système établi sur ce modèle, ainsi que sa validation à partir d'expérimentations en simulation hybride. Pour l'évaluation du modèle, nous proposons une approche originale centrée sur l'utilisateur : analyser l'impact du système sur les relations sociales des personnes bénéficiant du système.

1. OfASCIA : Ontologie de système ambiant dédié à l'assistance dans les villes intelligentes

1. Introduction

Comme nous l'avons noté dans le chapitre présentant l'état de l'art, la question du vocabulaire et de la définition des concepts liés aux domaines de l'intelligence artificielle et de l'informatique ubiquitaire reste en suspens. En effet, bien que la communauté scientifique soit en accord sur les mots utilisés, leurs définitions peuvent varier. Certains peuvent considérer l'IoT comme un ensemble d'objets connectés et de services, tandis que d'autres détachent les services de ce concept, et d'autres encore considèrent plutôt l'aspect réseau [46]. Ainsi, établir une ontologie couvrant les concepts abordés dans les domaines étudiés découle de la volonté de construire un système inscrit dans ces domaines. En clarifiant les concepts en jeu, « l'idiosyncrasie » peut être atténuée et la progression devient plus uniforme dans ces domaines [50].

En outre, le système que nous souhaitons mettre en place est transversal et s'appuie sur plusieurs domaines de recherche, dont : les villes-intelligentes, les systèmes multi-agents, l'informatique ubiquitaire, l'informatique ambiante, l'assistance à la personne. En conséquence de la multiplicité des domaines en jeu, et de la terminologie propre à chacun de ces domaines, une clarification lexicale est d'autant plus nécessaire pour éviter les « idiosyncrasies humaines et technologiques » [50]. En ce sens, la construction de cette ontologie permet la réutilisabilité et l'interopérabilité des connaissances humaines. Avec le modèle présenté dans le chapitre suivant, cette ré-utilisabilité et cette interopérabilité sont étendues aux agents et autres systèmes informatiques faisant usage de ces connaissances.

L'ontologie *OfASCIA* (pour *Ontology for Assistive agents in Smart Cities In Ambient intelligence context*) permet de décrire les connaissances à propos d'un ensemble de personnes (aidées ou aidantes), d'agents et de dispositifs (Hardware) inscrits dans certaines localisations (voir figure 8). Ces connaissances permettent de caractériser des contextes, rattachés aux activités produites par les acteurs. Et, si un service doit être délivré, le système peut prendre en compte ses connaissances pour adapter et personnaliser le service.

Ainsi, pour en préciser la nature par rapport aux types d'ontologies décrits dans la section (2.1.5), *OfASCIA* est une ontologie de domaine. Afin de concevoir un SAA à partir d'*OfASCIA*, il conviendra de l'étendre avec une ontologie d'application spécifiant les concepts liés au cadre applicatif envisagé.

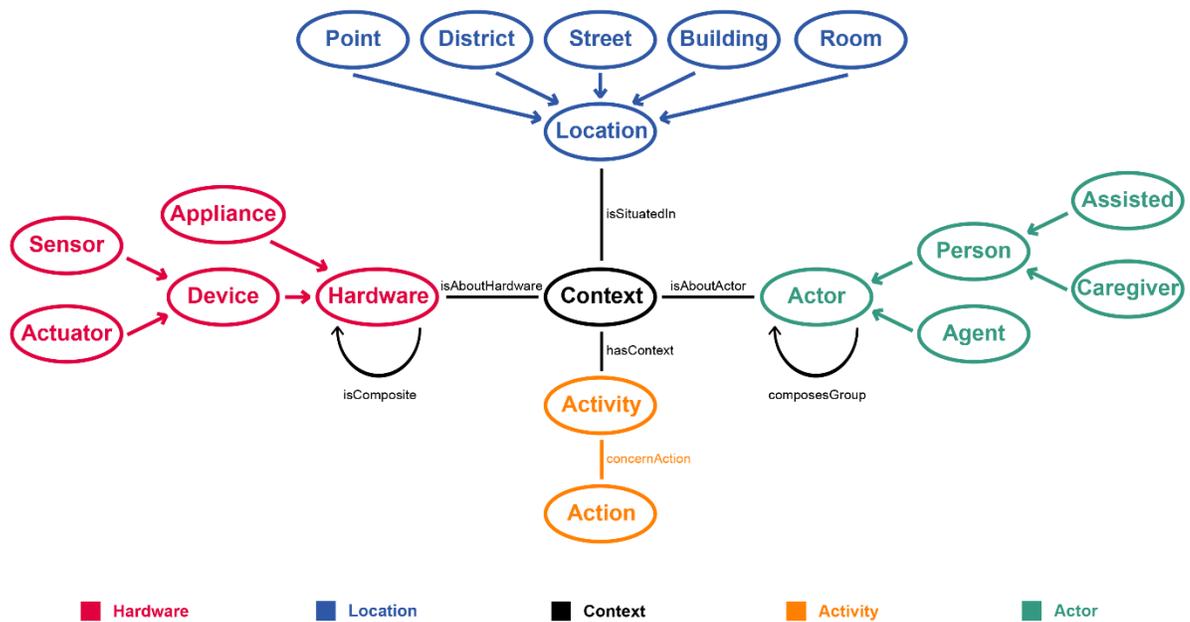


Figure 8 – Représentation partielle des concepts principaux de l’ontologie OfASCIA (les flèches indiquent une relation de type « ISA », les autres relations sont typées)

Dans la première sous-section (3.1.2) nous présentons les objectifs particuliers qui ont motivé cette construction de l’ontologie et nous donnerons la méthodologie employée. Dans les sous-sections suivantes (3.1.3 à 3.1.5), nous étayerons la composition des concepts principaux, tels que l’environnement, les acteurs et les connaissances. Finalement, la section (3.1.6) résume les objectifs et l’implémentation de l’ontologie présentée.

2. Méthodologie et objectifs

Pour rappel, la construction de cette ontologie vise la mise en place d’un socle sémantique permettant [50] :

D’une part, le partage de connaissances entre scientifiques et experts de chaque domaine impliqué, ce qui facilite la communication et favorise la ré-utilisabilité et l’interopérabilité des connaissances. D’autre part, cette structure sémantique permet la communication entre les éléments logiciels constituant le système mis en place.

Ce sont ces éléments essentiels que nous avons identifiés comme nécessaires pour permettre de construire le modèle d'architecture générique, que nous proposons. Aussi, les intérêts de la construction de cette ontologie sont multiples : en effet, il devient plus facile de construire un modèle sur un lexique clairement structuré. La formalisation de ce lexique permet donc d'appuyer le modèle sur un socle logique et sémantique solide et facilite la communication sur celui-ci. Du fait de cette approche, son extensibilité se voit également améliorée.

En outre, à l'extérieur du système, l'ontologie facilite l'interopérabilité des données avec d'autres systèmes, par exemple en précisant la nature et l'unité des données en sortie du système.

Enfin, pour le système lui-même, à un premier niveau, l'ontologie fournit le socle sémantique nécessaire à la création des bases de connaissances pour chaque agent du système. Cela permet également la mise en place de mécanismes d'inférences. À un deuxième niveau, l'ontologie dote les agents d'un « langage » commun qui leur permet de communiquer à propos leurs connaissances, comme le propose la norme FIPA-ACL [105], [106].

Par rapport aux autres ontologies proches en termes de domaine d'application, nous avons dénoté un certain morcellement dans le chapitre de l'état-de-l'art. En effet, de par l'approche ad-hoc, souvent adoptée, les ontologies proposées ne couvrent que partiellement les concepts en jeu dans les solutions telles que celle que nous souhaitons mettre en place. C'est pourquoi notre proposition diffère de l'existant, en englobant l'ensemble des concepts en jeu, malgré la transversalité impliquée dans ce projet. Précisons qu'en étant suffisamment générique, l'ontologie n'est intriquée à aucune plateforme logicielle ou système informatique particulier.

Aussi, l'ontologie présente une autre singularité sur l'éclairage que nous proposons sur la modélisation des acteurs du système. En effet, nous avons remarqué que la place de l'humain dans ce type de système était paradoxalement assez restreinte, notamment quand il est question des personnes autres que la personne qui est aidée. De plus, les agents logiciels ont également rarement droit à une modélisation complète. C'est pourquoi notre modélisation des acteurs du système ambitionne une vision uniforme et cohérente de l'ensemble des entités actives du système, ce qui englobe à la fois tous les acteurs humains, mais également les agents. Par exemple, si le système a connaissance que la lumière d'un

bâtiment a été allumée, cette action pourra être modélisée de la même façon, qu'elle ait été effectuée par un agent ou une personne. En plus de rendre plus facile la sauvegarde des informations sur la dynamique du système, cette représentation des activités peut être mise en synergie avec une représentation des buts et des actions portés par les agents. Cela a pour conséquence de rendre plus intuitive la modélisation par les experts de chaque domaine. De plus, cela simplifie la modélisation des comportements agents [107], en vue que ces comportements servent à l'assistance des utilisateurs.

La construction de cette ontologie a suivi un déroulé classique, similaire à la méthodologie décrite dans l'article d'Uschold et King [108]. Il est possible d'abstraire ce processus en trois phases, bien que du fait de son caractère intrinsèque à l'évolution, les phases ne se parcourent pas que de manière séquentielle :

- **Capture de l'ontologie** : Est une phase où les termes principaux, et leurs liens, sont désignés et définis dans un langage naturel. Cela prend souvent la forme d'un « brainstorming », où à partir des mots-clés de notre projet, nous essayons de définir les contours du vocabulaire dont on peut avoir besoin. Dans notre cas, nous savons que nous allons manipuler des concepts liés aux systèmes ambiants, aux systèmes multi-agents, à l'assistance à la personne et à l'environnement urbain. Toujours en langage naturel, nous définirons simplement chaque concept et donnerons intuitivement les relations entre ces termes. À l'issue de cette phase, il est possible que tous les concepts utiles n'aient pas encore été cernés, mais du fait de son cycle de vie, souvent en spirale, l'élaboration de l'ontologie nous amènera à affiner le vocabulaire à chaque itération.
- **Intégration avec les ontologies existantes** : Consiste à comparer les concepts, extraits de la phase précédente, avec les définitions issues d'autres travaux : ontologies connexes, articles scientifiques définissant les mêmes concepts, etc. Ce travail permet de confronter les premières définitions obtenues avec l'existant pour ajuster, modifier ses propres définitions ou en trouver qui soient cohérentes avec les travaux existants. En outre, il est également possible de remarquer des concepts clés que l'on aurait oubliés lors de la phase de capture. Ainsi, dans le cadre de notre ontologie, après la phase de capture, nous nous sommes intéressés au travail de [78], qui traite de l'assistance à domicile des personnes en perte d'autonomie. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre d'état-de-l'art, nous avons étudié un certain nombre d'ontologies traitant de l'assistance à domicile [54], [109], des villes intelligentes [92],

[110], de l'loT [87], [94] ou encore des SMA [93], [94]. C'est donc lors de cette phase que nous avons élaboré des définitions qui soient cohérentes avec les ontologies de référence de leur domaine respectif, tout en décrivant les liens qui permettent de rendre cohérent l'ensemble des définitions pluridisciplinaires obtenues.

- **Implémentation de l'ontologie** : constitue la dernière phase du processus itératif de mise en œuvre de l'ontologie. Cette phase consiste en la mise en place des classes, des attributs et propriétés. Il est possible de résumer cela en la transcription de l'ontologie, établie dans les phases précédentes, dans un langage de formalisation de ces connaissances. Une fois les connaissances encodées dans ce langage, il sera plus facile de les partager. Et l'utilisation de mécanismes d'inférences pourra même permettre d'en vérifier la véracité. Dans le cadre de notre travail, nous avons fait le choix d'écrire l'ontologie avec le langage « OWL ».

Pour implémenter l'ontologie, nous avons donc choisi d'utiliser le langage « OWL » pour plusieurs raisons : il présente l'avantage d'être très largement utilisé à la fois par les chercheurs ayant travaillé sur les ontologies connexes sur lesquelles nous nous basons, à la fois par d'autres chercheurs qui ont été en interaction avec le projet de thèse, et plus globalement par une grande communauté d'utilisateurs. Cela facilite l'interopérabilité avec les ontologies connexes évoquées, qui sont écrites dans ce même langage et facilite le travail d'implémentation en ayant un grand nombre de ressources et de support à disposition. En outre, « OWL » est un langage pour lequel plusieurs bibliothèques Java ont été développées. Puisque le système que nous souhaitons développer repose sur une plateforme nécessitant la programmation en Java, ce que nous verrons dans le chapitre suivant, l'intégration d'ontologies écrites en « OWL » est rendue plus rapide. Enfin, nous avons utilisé l'outil open-source « Protégé » pour implémenter l'ontologie en langage OWL. C'est un outil qui permet l'écriture de l'ontologie par une interface graphique, ce qui nous paraît indispensable lors de l'écriture d'ontologie dépassant le cadre d'exercices d'apprentissage.

Par ailleurs, ce travail de construction d'une ontologie pour les systèmes ambiants dédiés à l'assistance a été valorisé à la conférence « *TOTh 2020: Terminology & Ontology: Theories and applications* ».

Nous y avons présenté l'article « *Une Ontologie pour les systèmes multi-agents ambiants dans les villes intelligentes* », qui expose les originalités de l'ontologie, à savoir sa transversalité et sa généricité, ainsi que sa représentation uniforme des acteurs et activités au sein du système.

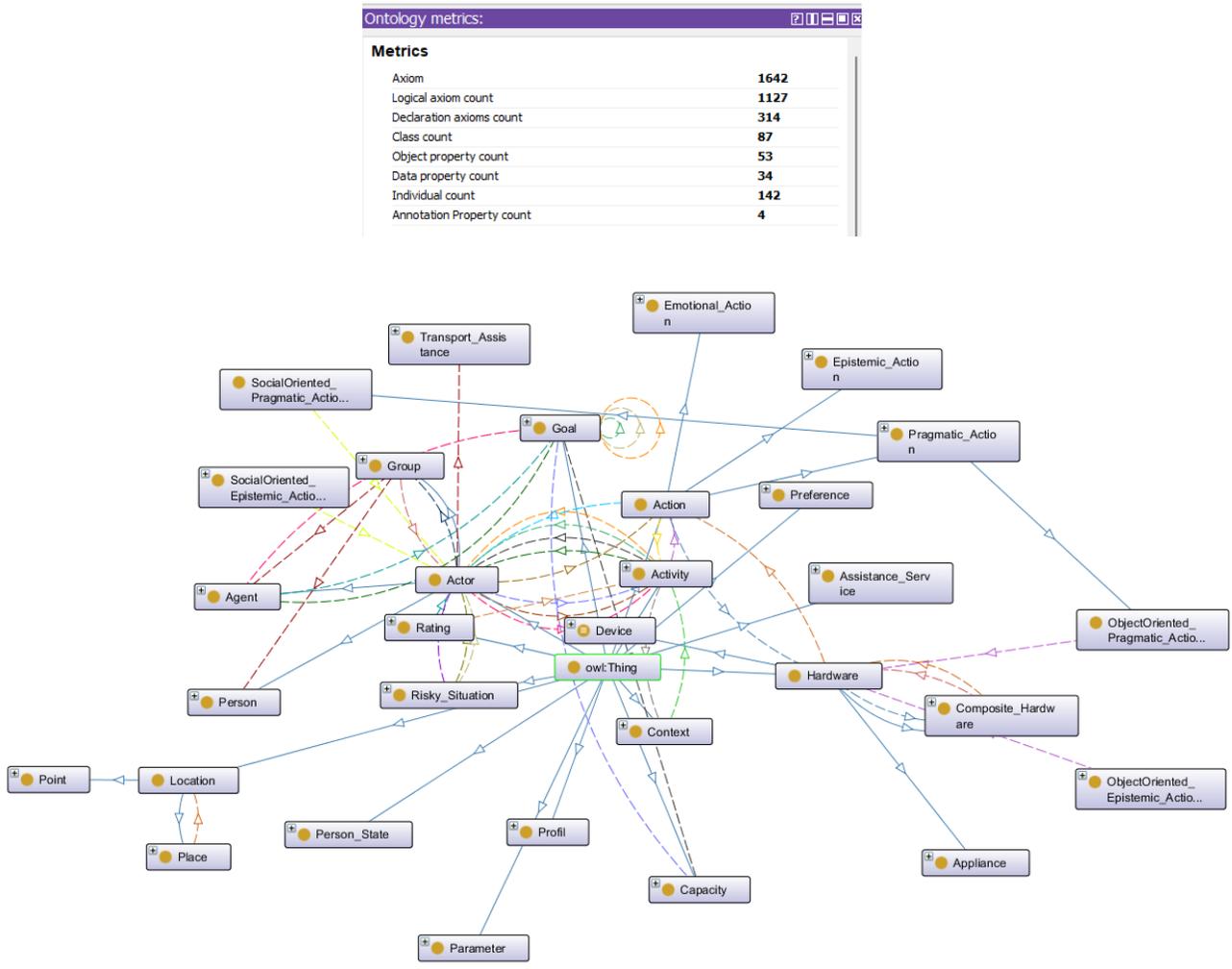


Figure 9 – Vue partielle de l’ontologie OfASCIA dans Protégé
L’ontologie complète est présente en Annexe

3. Concepts liés à l’environnement

La pertinence des services délivrés tient de la capacité du système à personnaliser ses services. Dans le cadre de l’assistance à la personne, il est nécessaire que le système considère des perceptions sur la situation et sur les personnes en jeu. Et puisque ces situations se produisent dans notre environnement physique réel, il devient nécessaire de pouvoir le

décrire pour en formaliser les connaissances au niveau du système. En outre, du fait de sa nature ambiante, notre système intègre un certain nombre de dispositifs installés dans cet environnement qu'il est nécessaire de prendre en compte. C'est pourquoi, au sein de ce cadre, il est possible de discerner deux concepts clés :

D'une part les *équipements*, qui regroupent tous les objets connectés ou autres appareils qui permettent au système d'entrer en interaction avec l'environnement physique réel ; Et d'autre part les *localisations* (ou lieux) qui permettent de situer géographiquement la dynamique des *équipements* ou des *acteurs* du système.

Dans le cadre de l'assistance à la personne, et a fortiori dans le contexte des villes intelligentes, le système doit être en mesure de s'adapter face à un possible grand nombre de changements dynamiques. Puisqu'il serait trop complexe de prévoir l'ensemble des configurations spatiales possibles, il devient impératif de produire des inférences sur les situations spatiales pour façonner la personnalisation des services à partir d'informations atomiques. C'est pourquoi l'ontologie intègre la description de ces deux concepts, avec différents niveaux de granularité.

Hardware : est la classe qui regroupe l'ensemble des dispositifs qui composent l'environnement dans lequel le système opère. Un *équipement* correspond simplement à un objet de l'environnement. Il se différencie des « *acteurs* » de par son inertie : Il ne produit aucune action, mais les subit. Précisons également que bien que connaître la localisation d'un objet puisse être un outil puissant pour inférer, il n'en demeure pas moins la possibilité de le décrire sans connaissance de sa situation. Comme la plupart des autres ontologies du domaine [18], [92], [87], [78], nous choisissons de diviser les *équipements* en deux groupes distincts, comme le montre la figure 10.

D'une part, les « *Devices* » correspondent aux appareils connectés qui se distinguent par leur capacité à influencer ou capter un phénomène physique. D'un côté, cette classe regroupe les *capteurs* (*Sensor*). Ces derniers se caractérisent par le fait de pouvoir collecter de l'information sur un phénomène physique de l'environnement réel. Un bouton ou un capteur de température sont des exemples de *capteurs*. D'un autre côté, un *effecteur* (*Actuator*) est un équipement qui peut influencer un phénomène physique réel. Les lampes, écrans ou haut-parleurs sont des exemples d'*effecteurs*.

D'autre part, les « *Appliances* » réunissent les autres équipements composant le système : ceux qui ne peuvent être directement associés à un phénomène physique. Cette catégorie permet, entre autres, de décrire des équipements informatiques (comme les micro-

ordinateurs, les smartphones) ou encore les équipements qui fournissent une source énergétique (comme les batteries).

En addition à cette catégorisation, l'avantage de la représentation que nous proposons s'inscrit dans sa capacité à décrire des *équipements composites*, comme le montre la figure 10. En ce sens, il est possible d'encapsuler un équipement dans des équipements autres que lui-même. En résulte la possibilité de décrire des équipements avec autant de niveaux de granularité que le modélisateur le désire. De ce fait, les objets peuvent donc être décrits sous la forme d'arbres de décomposition. Nous verrons ainsi dans le chapitre suivant, traitant du modèle, comment tirer parti de ce mécanisme.

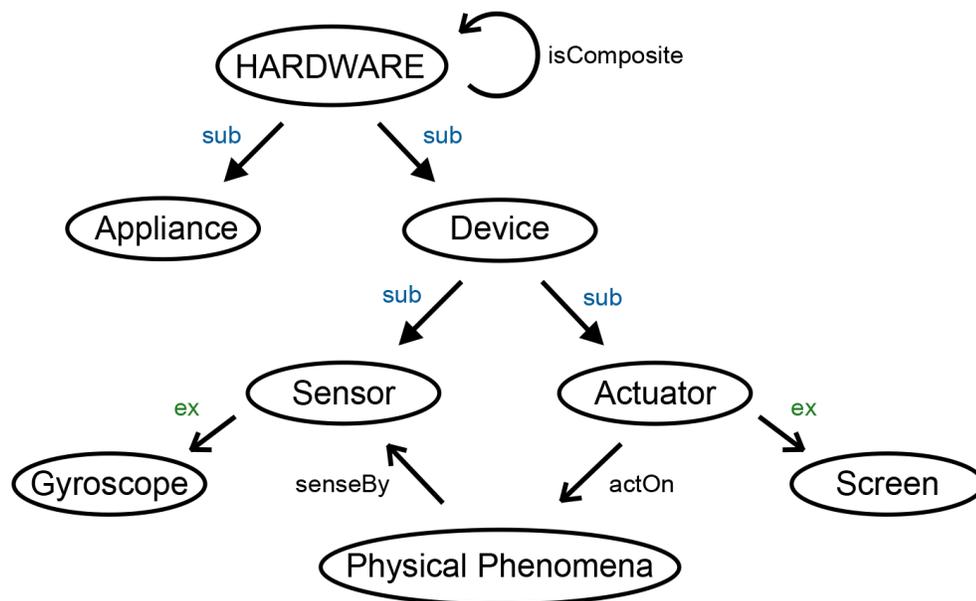


Figure 10 – Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept « Hardware »

L'autre concept qui concerne la description de l'environnement permet de caractériser la position spatiale des actions, des objets ou des acteurs, etc. Dans l'ontologie que nous proposons, deux façons de décrire un lieu (ou une *localisation*) sont possibles, comme le montre la figure 11.

Premièrement, il est possible d'indiquer des coordonnées géographiques en passant par la classe « *Point* ». Pour créer une information sur ce « *Point* », les coordonnées de latitude et de longitude sont nécessaires : il s'agit donc de décrire les coordonnées de « l'épicentre » de la situation que l'on souhaite caractériser.

Deuxièmement, dans d'autres cas, il sera plus naturel de rattacher une information à un lieu nommé. La classe « *Place* » offre cette possibilité, en proposant plusieurs niveaux de granularité. À l'échelle de la ville, il est possible de désigner un quartier (« *District* »), une rue (« *Street* ») ou un bâtiment (« *Building* »). Il est également possible de désigner un ensemble de bâtiments, par la classe « *Building Complex* ». En outre, dans certains cas, il peut être nécessaire de descendre à plus petite échelle pour décrire des lieux. Les classes « *Floor* » et « *Room* » permettent de situer, respectivement, au niveau d'un étage et d'une salle.

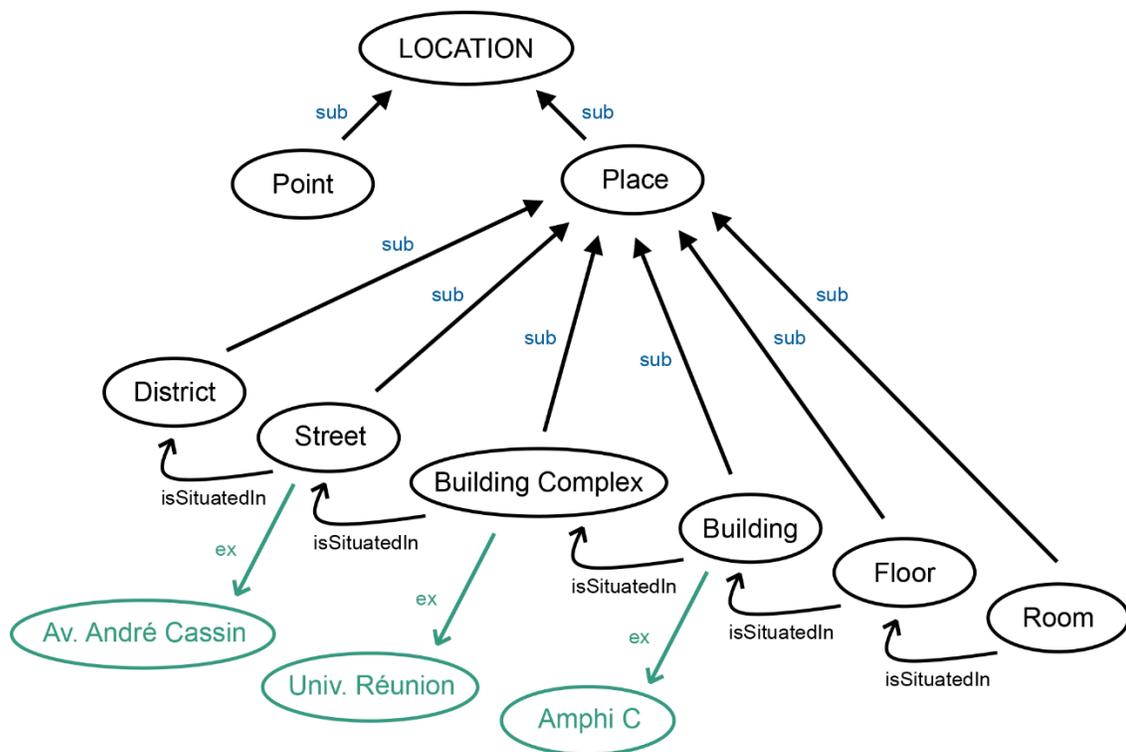


Figure 11 – Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept « Location »

L'ensemble de ces classes sont liées par une relation transitive de type « *isSituatdIn* », qui permet d'assurer une cohérence de l'information selon le niveau de granularité choisi. C'est également cette relation qui peut faciliter l'inférence de la localisation d'un objet ou d'un acteur.

Pour en donner exemple, considérons le cas suivant : Nous voulons savoir si Alice est sur l'avenue « René Cassin ». Si ce n'est pas le cas, nous voulons l'alerter sur le fait qu'elle doit s'y rendre afin d'aller en cours. Par un capteur de présence de l'université de la Réunion, nous obtenons l'information suivante : « **Alice est dans l'université de La Réunion** ». En amont, nous savons que « **L'université de La Réunion se situe dans : 'Avenue René Cassin'** ». Il est alors possible d'en déduire que : « **Alice est dans : 'Avenue René Cassin'** ». Nous concluons que nous n'avons pas besoin de lui rappeler d'aller en cours.

Par ailleurs, bien que les deux concepts de description de lieux proposés (« *Point* » et « *Place* ») soient indépendants et suffisants, il est envisageable d'en construire des correspondances. En associant des coordonnées à un lieu, il est possible d'en déduire des coordonnées approximatives de lieux de granularité inférieure. Ce type de mécanisme pourrait être délégué à un logiciel (par exemple un agent), chargé d'établir ces rapprochements en cas de besoin.

Cette approche du concept de « *Localisation* » est inspirée de plusieurs travaux connexes ([92], [78]), qui présentent une vision similaire de ce concept. Limitée au domicile ou au bâtiment, nous l'avons étendue à l'échelle de la ville, en ajoutant la possibilité d'associer des coordonnées géographiques.

4. Concepts liés aux acteurs

Dans la section précédente, nous présentions les concepts permettant de décrire l'environnement et les équipements qui y sont disposés, dans le cadre d'un système ambiant dédié à l'assistance. En opposition avec les *équipements*, il est possiblement nécessaire de vouloir décrire des entités qui ont la capacité d'agir sur cet environnement, c'est-à-dire pouvant entreprendre des actions dans ce dernier. Nous nommons ces entités les « *acteurs* ». Cette classe permet donc la description des utilisateurs.

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 2, la place des utilisateurs dans les modèles, et donc dans les systèmes ambiants, est relativement limitée [10], [111]. D'un côté, les utilisateurs aidés ne sont pas toujours représentés dans les modèles. De l'autre côté, les utilisateurs aidants ne sont quasiment pas modélisés, de ce fait leur prise en compte par les systèmes est encore plus rare. Aussi, nous avons remarqué que les agents logiciels ne sont souvent pas modélisés.

Pourtant, toutes ces entités peuvent exister au sein de tels systèmes, s'influencer entre elles. C'est pourquoi, comme le montre la figure 12, les *acteurs* regroupent deux types d'entités : les *personnes* et les *agents*.

Dans un premier temps, il est possible de décrire un acteur humain en utilisant la classe « *Person* ». Ces derniers possèdent plusieurs propriétés spécifiques, dont le fait de posséder un profil (renseignant les informations utiles sur l'identité de la personne), des statuts (qui précisent l'état actuel de la personne) ainsi que des préférences (renseignées par la personne, elles permettent l'ajustement des services délivrés).

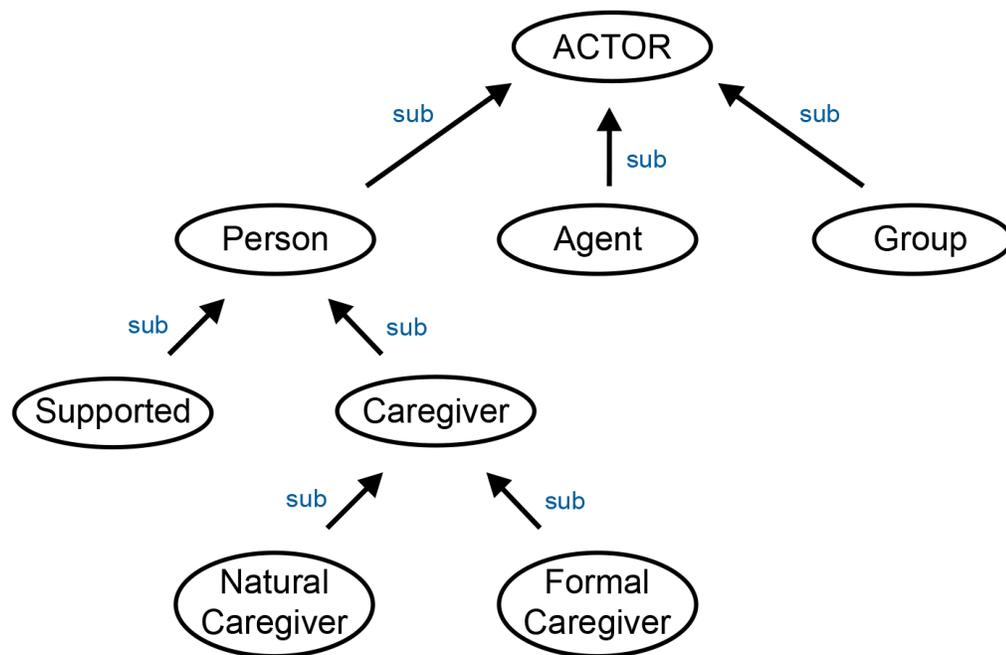


Figure 12 – Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept « Actor »

En plus de ces attributs sur l'individu, l'ontologie permet de rendre compte des relations sociales qui lient ces personnes entre elles. Ces relations peuvent être qualifiées, tant sur le plan de la qualité (satisfaisant, ou non, ou ambivalent, etc.), que sur le plan fonctionnel (informationnelle, instrumentale et/ou émotionnelle).

Du fait du cadre applicatif, il peut être nécessaire de préciser le rôle de la personne dans le système. Ainsi, il est possible de décrire les personnes supportées, en utilisant la classe « *Assisted* ». Autrement, les aidants possèdent également un moyen de représentation, par le concept de « *Caregiver* ». De plus, il est possible de préciser le type d'assistant, par deux classes : l'aidant institutionnel (« *Formal Caregiver* »), par exemple un médecin ; l'aidant informel (« *Natural Caregiver* »), par exemple un membre de la famille. Il est permis de déduire le type d'aidant à partir des relations que la personne aidante entretient avec la personne aidée.

La caractérisation de la relation entre les utilisateurs donne les moyens de mieux cerner la place du système dans le soutien de la personne, notamment par la prise en compte de la nécessité de l'implication émotionnelle des acteurs. Ainsi, des agents logiciels dédiés à l'assistance peuvent être efficaces sur un plan instrumental, en soulageant la charge de certains aidants [112], notamment les proches. Pour autant, lorsqu'une implication émotionnelle est nécessaire, le système peut très bien prendre en compte cette dimension pour adapter les services, grâce à cette formalisation.

Dans un deuxième temps, le concept « *Agent* » regroupe les autres entités pro-actives du système, qui sont de nature logicielle. Donc, les agents sont les logiciels autonomes ayant pour objectif d'assister les utilisateurs du système. Cette assistance peut être directe, c'est-à-dire que le service est orienté vers les acteurs humains. Ou bien elle peut être indirecte, si par exemple le service délivré est nécessaire au fonctionnement d'autres services.

De manière similaire aux *personnes*, les *agents* vont pouvoir interagir sur l'environnement physique réel en agissant sur les *équipements*. Cela justifie leur catégorisation parmi les *acteurs*, et non parmi les équipements. En opposition avec les *personnes*, l'ontologie offre la possibilité d'encoder les objectifs des *agents*. Ce sont ces objectifs qui motivent la délivrance de services dédiés à l'assistance.

Par ailleurs, il est possible pour l'ensemble de ces *acteurs* de former des *groupes*. Comme nous le constatons sur la figure 12, les *groupes* peuvent être représentés comme des espaces sociaux qui permettent de compartimenter quelles sont les informations partagées, et avec qui. Ces dits *groupes* pourraient être formés en fonction des intérêts. Par exemple, il est envisageable de former un groupe avec tous les acteurs intéressés par le partage d'informations sur les obstacles.

Enfin, au premier abord, il peut être surprenant de voir des agents logiciels placés au « même niveau » que les acteurs humains du système. Pour autant, cette construction des concepts relatifs aux entités actives du système permet, justement, de ne laisser aucun « flou » entre ces entités, leur accordant une modélisation individuelle et explicitant ce qui les fait se ressembler de ce qui les dissocie. Cela constitue une des particularités de l'ontologie *OfASCIA*, qui permet de faire un pas de plus vers l'approche centrée sur l'utilisateur et donc un pas vers l'utilisabilité de l'ontologie dans le contexte particulier de l'assistance à la personne.

5. Concepts liés aux connaissances du système

L'ontologie constitue en elle-même une base de connaissances, portant sur la formalisation des concepts en jeux. Ces connaissances ancrent des informations sur les états des éléments présents dans le système ou sur des situations. Par exemple, nous pouvons décrire ce type d'information à propos de Charles : « **Charles est une personne assistée** » ou « **Charles est le frère de Eva** ». Ces états sont donc décrits par des informations qui restent vraies tant qu'elles ne sont pas démenties.

Pourtant, pour être en adéquation avec le critère d'*adaptation*, il est nécessaire que le système ne se limite plus aux informations persistantes, mais à toute la dynamique de l'environnement et des utilisateurs. C'est pourquoi nous définissons deux concepts permettant de représenter une information structurée selon les autres concepts de l'ontologie : les *contextes* et les *activités*. Ceci consent à l'utilisation de différents outils de logique et d'inférence offerts par le langage utilisé, afin que le système ait la capacité d'employer ces informations pour adapter les services délivrés.

La notion de *contexte* (« *Context* ») est centrale dans cette ontologie, car elle permet de caractériser une situation, en répondant aux questions : qui, quoi, où, comme le montre la figure 13. Le contexte est une information qui reste vraie tant qu'il n'est pas remplacé par un nouveau contexte plus récent, qui rentrerait en conflit avec le précédent.

Pour finir, la prise en compte du contexte par le système sert à l'adaptation de ce dernier, face à la dynamique des utilisateurs et de leur environnement. La classe « *context* » se définit comme étant un agrégat d'informations classées selon leur nature (portant sur la localisation, l'utilisateur, ou l'objet). Cet agrégat peut être exploité seul, ou bien pour contextualiser une *activité*.

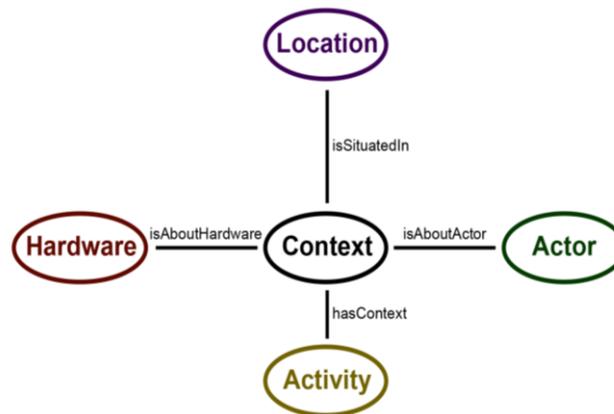


Figure 13 – Classes principales de l’ontologie pouvant être rattachées au concept « Context »

Pour illustrer son usage, prenons l’exemple du smartphone de Charlie. Nous voulons construire une information sur le fait que ce smartphone se situe dans l’hôtel de ville, dans le bureau 12. Grâce aux classes que nous avons décrites, nous pouvons encoder cette information de la manière suivante :

```

Context = exempleDeCharile {
    Hardware = "Smartphone de Charlie"
    Location.building = "Hôtel de ville"
    Location.room = "Bureau 12"
}
  
```

Cette approche du concept de *contexte* a été construite en phase avec les travaux portant sur la sensibilité au contexte ([113], [114]), qui est un des piliers de l’informatique ambiante. En outre, cette approche demeure cohérente avec les autres ontologies traitant de cette notion de contexte ([18], [54]).

Comme nous venons de le voir, le *contexte* ne permet pas de concevoir une information inscrite ponctuellement dans le temps. Pourtant, les *acteurs* du système suivent leur propre dynamique, qui devrait avoir la faculté d’être encodée dans l’ontologie. Pour ce faire, nous définissons le concept d’*activité* (« Activity »).

Cette définition est fondée sur le modèle d'activité présenté par Rabardel et Folcher [115]. Ce modèle est schématisé sur la figure 14. Il représente l'activité au travers de trois pôles, qui sont le *Sujet*, l'*Instrument* et l'*Objet*. Ces trois pôles s'inscrivent dans un environnement d'usage. Nous avons donc adapté ce modèle à notre ontologie, en précisant la nature de chacun de ces pôles et de l'environnement d'usage.

Illustrons cette modélisation avec un exemple. Si nous souhaitons décomposer l'activité « *Etienne s'est déplacé à vélo* » : Le *sujet* est « Etienne ». L'*objet* de cette activité correspond à l'action effectuée, dans notre cas l'action de « se déplacer ». Enfin, l'*instrument* est l'entité qui a permis au sujet d'effectuer l'action, ici le « vélo ».

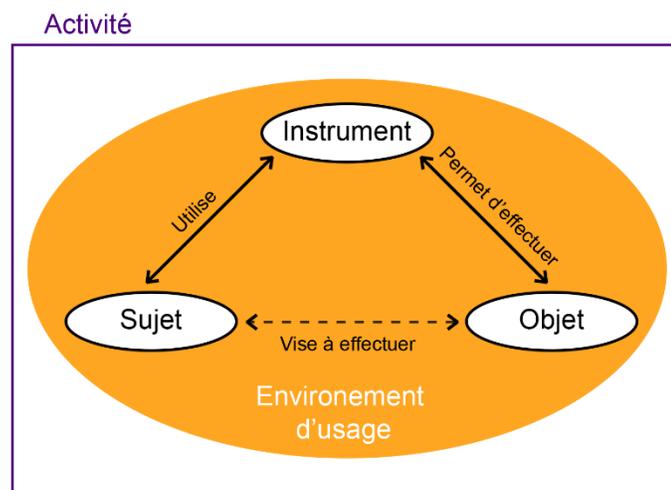


Figure 14 – Schéma de représentation d'une activité selon le modèle de Rabardel [115]

Dans l'ontologie OfASCIA, nous définissons une *activité* comme étant l'occurrence d'une action dans un contexte donné. Cette occurrence est composée du *sujet*, de l'objet de l'activité (c'est-à-dire l'action elle-même) et de l'*instrument* associé s'il y a lieu, comme illustré sur la figure 15. Le *sujet*, moteur de l'action, est forcément une entité de la classe « *Actor* » (ou un groupe d'*acteurs*). L'*instrument* correspond à l'entité qui permet au *sujet* d'effectuer l'action. Il peut s'agir d'un *équipement* ou d'un autre *acteur*. Ainsi, « l'objet » se réfère directement à l'*action* qui a été effectuée. Et la classe « *Time* » permet de renseigner l'instant où l'activité s'est produite. Bien que l'ancrage temporel de l'action le différencie du contexte, il est possible de construire une activité sans renseigner de *temps*, par exemple si on ne sait pas à quel moment s'est produite l'action. Finalement, l'*environnement d'usage* dans le

modèle de Rabardel, correspond au concept « *context* » que nous avons défini précédemment.

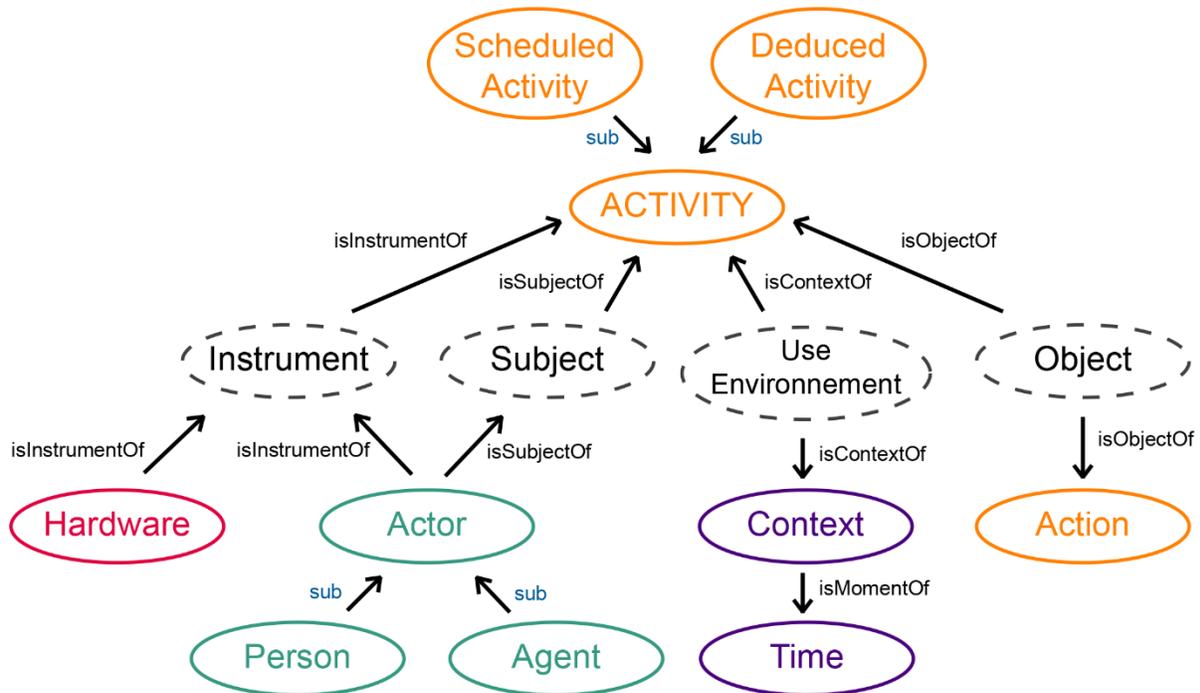


Figure 15 – Représentation partielle de l’ontologie, centrée sur le concept « Activity ». Les classes en tirets sont classes abstraites, qui permettent d’illustrer le modèle de Rabardel. Le code couleur reprend celui emprunté dans la figure 8

L’ontologie permet également de classer les activités selon deux catégories : Premièrement les *activités prévues* (« *Scheduled Activity* »), qui regroupent les *activités* qui ont été enregistrées explicitement par les *acteurs*. Deuxièmement, certaines *activités* peuvent être déduites par inférences sur les informations obtenues, issues de la remontée de certains motifs d’actions par exemple : on parle d’*activités déduites* (« *Deduced Activity* »). Ce type d’activité permet, entre autres, la description d’incidents, comme cela a été proposé par J. Ye et al. dans l’article [116].

Notons que cette différenciation des types d’activités se rapporte également aux différents types d’acteurs. En effet, bien que tout type d’acteur puisse être à l’origine d’activités déduites, seuls les agents peuvent être *sujets* des activités prévues. L’observation

du type d'activité peut servir à inférer le type d'acteur à l'origine de l'activité qui s'est produite.

Pour aller plus loin, le composant central de l'activité est l'action (« Action ») et peut être divisé en deux catégories : Soit *épistémique* (« *Epistemic Action* »), c'est-à-dire que l'action vise la prise de connaissance d'un *équipement* ou d'un *acteur* ; Soit *pragmatique* (« *Pragmatic Action* »), et en ce sens l'action vise la modification de l'état d'un *équipement* ou d'un *acteur*. Ces deux types d'actions peuvent donc avoir deux orientations, comme montré sur la figure 16 : soit *sociale* si l'action porte sur un autre *acteur*, soit *artéfactuelle* si l'action porte sur un *équipement*.

Cette caractérisation de l'action a aussi pour origine les travaux de L. Braubach et al.[113], et Rabardel et Folcher [111], et reste en accord avec les autres modélisations de référence sur les activités [18], [109].

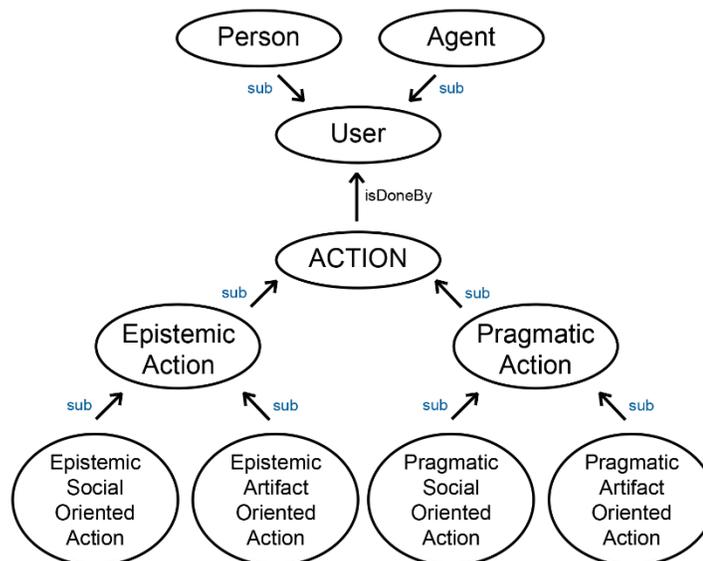


Figure 16 – Représentation partielle de l'ontologie, centrée sur le concept « Action »

Voyons un exemple d'utilisation de la classe *activité*. Imaginons que nous voulions enregistrer l'information suivante : David a utilisé son smartphone pour passer un appel le 27 janvier, lorsqu'il était aux coordonnées (22.1234 ; 15.5678). L'*activité* résultante aurait les attributs suivants :

Subject = Person = « David »

Instrument = Hardware = « Smartphone de David »

Action = « Passer un appel »

Time = Time.Day = « 27 » et Time.Month = « Janvier »

Context = Location.Point = [22.1234 ; 15.5678]

En résumé, nous venons de montrer deux moyens pour construire une information structurée au sein de l'ontologie : le premier concerne une information qui n'est pas ponctuellement inscrite dans le temps et reste vraie tant qu'elle n'est pas remplacée : la classe « *Context* » ; le deuxième entend à formaliser une information portant sur une action ponctuelle ayant eu lieu dans le système, par le biais à la classe « *Activity* ».

6. Synthèse

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les briques principales qui constituent l'ontologie construite. Nous avons commencé par la description de l'environnement avec la définition du concept de *localisation*, qui permet de situer géographiquement les entités du système dans cet environnement. Ensuite, nous avons donné la définition des *équipements* qui composent l'environnement réel. Par ailleurs, nous avons défini les *acteurs* comme étant les entités capables d'agir sur cet environnement. Ces *acteurs* regroupent à la fois les *personnes* et les logiciels autonomes appelés *agents*. Enfin, nous proposons deux structures permettant de représenter des informations sur le système : avec d'une part les *contextes*, qui encapsule des informations persistantes sur les éléments du système ; et d'autre part les *activités*, qui permettent de décrire les actions effectuées par les *acteurs* du système.

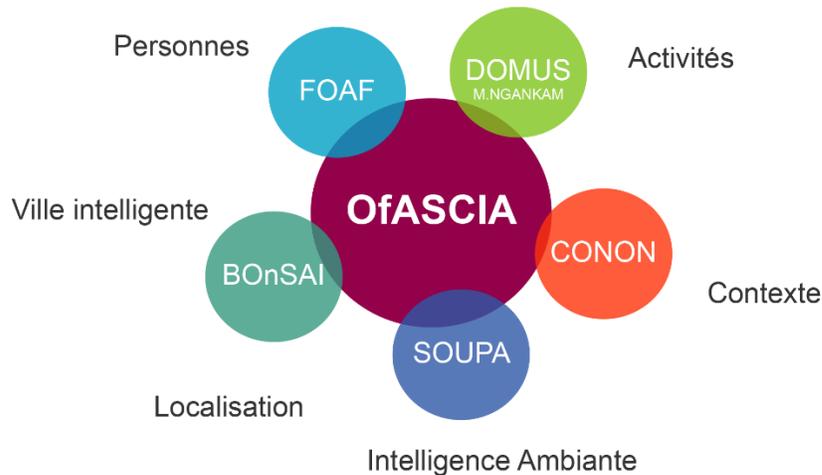


Figure 17 – Représentation de l’ontologie OfASCIA et des ontologies de référence sur lesquelles elle s’appuie, pour chaque domaine associé

L’ontologie OfASCIA présentée a pour avantage de couvrir l’ensemble des concepts clés à la mise en place d’un système ambiant dédié à l’assistance. Par ailleurs, chacune des définitions s’appuie sur d’autres ontologies de référence (comme le schématise la figure 17), dans leur domaine respectif. Cela fait d’OfASCIA une ontologie de domaine intermédiaire entre ces ontologies de référence, couvrant l’ensemble des éléments en jeu. Aussi, nous proposons une définition explicite des *acteurs* regroupant *personnes* et *agents*. Cet éclairage spécifique constitue une avancée en faveur de la clarification de la place de l’humain vis-à-vis du système qui l’assiste. Finalement, l’ontologie se veut être un cadre générique, qui peut être étendu à chaque domaine d’application spécifique par l’ajout de concepts dédiés. Pour cela, les concepteurs peuvent composer une ontologie d’application basée sur *OfASCIA*, servant de base à la conception de l’architecture du système.

Vis-à-vis du projet de cette thèse, cette ontologie a été construite afin d’élaborer un modèle d’architecture de système ambiant dédié à l’assistance, sur la base d’un vocabulaire et de définition structurés sémantiquement et logiquement au travers de l’ontologie.

2. NEXUS : Modèle d'architecture générique de système ambiant dédié à l'assistance et basé sur le paradigme multi-agents

1. Introduction

Dans le chapitre II, nous soulevons, dans le domaine de la conception de systèmes ambiants dédiés à l'assistance, le manque d'un modèle d'architecture de référence. L'ontologie *OfASCIA* organise les fondations sémantiques et logiques pour la mise en place d'un tel modèle, ce qui est l'objet de la présente section.

En effet, bien que les SAA soient des systèmes complexes possédant des caractéristiques et des objectifs qui peuvent différer, le manque de modèle générique constitue un obstacle sur plusieurs dimensions. Premièrement, ce manque de généricité est un frein à l'interopérabilité. Cette interopérabilité concerne : à la fois l'interopérabilité entre les modèles, pouvant ralentir l'évolution de ces derniers ; à la fois l'interopérabilité des systèmes et des données, bridant le champ des possibles. Deuxièmement, le manque de généricité soustrait la conception de composants logiciels distribués, qui auraient comme base un même modèle. Alors que cette approche permet de gérer le développement de manière distribuée et d'en réduire les coûts [10], [77], [111], [118], [119].

À partir des concepts définis dans l'ontologie, nous avons construit un modèle générique et concordant avec l'ensemble des critères de conception que nous avons retenu pour de tels systèmes. D'abord, du fait de la nature complexe et pluridisciplinaire des SAA, le modèle doit offrir une structure accordant la liaison et l'articulation des différentes entités en jeu : l'environnement instrumenté, les agents logiciels chargés de délivrer des services et enfin l'ensemble des personnes participant au système.

De plus, le système doit absolument être générique pour pallier les limites décrites précédemment. Ainsi, il n'est intriqué à aucun type d'assistance particulier, ni à aucune plateforme informatique particulière. Et il vise la distribution et la modularité. En concordance avec le critère de décentralisation, nous considérons une approche complètement distribuée et locale (c.a.d. avec un traitement au plus proche de la source des données). En revanche, cela n'entrave aucunement l'utilisation du modèle pour la conception de systèmes centralisés.

Enfin, le modèle NEXUS répond au verrou concernant le facteur humain, en accordant une place centrale à l'utilisateur et en offrant des mécanismes basés sur un meilleur respect de sa vie privée et de l'utilisabilité du système.

Dans cette section, nous commençons par une vue globale du modèle et des critères (2.2.2). Nous présentons ensuite les différentes briques constituant le modèle : la section suivante sera dédiée à la modélisation des connaissances (2.2.3). Puis, nous présentons les éléments constituant l'environnement ambiant dans la section (2.2.4). Par la suite, nous définirons la brique du modèle qui porte sur les agents (2.2.5). Enfin, dans la section (2.2.6), nous abordons la position des acteurs humains dans le système. Nous terminons la section par une synthèse (2.2.7).

2. Présentation générale du modèle et critères de conception

Pour rappel, lors de l'étude bibliographique, nous en avons extrait des critères de conception, que nous avons jugé impératif de considérer pour concevoir un modèle d'architecture de système ambiant dédié à l'assistance. L'**adaptation**, la **décentralisation**, la **personnalisation** et la **flexibilité** sont indispensables à la conception d'un système ambiant dédié à l'assistance, et donc au modèle d'architecture. Intrinsèquement, un SAA compte aussi une dimension sociale. Afin de permettre son utilisabilité et sa viabilité, le SAA doit prendre en ligne de compte d'autres critères, que sont : l'**efficience**, la **transparence** et l'**approche centrée sur l'utilisateur**. La **décentralisation** et la **personnalisation** sont des critères qui servent à la fois l'aspect technique (en rendant le système plus résilient et efficace) et l'aspect social (en facilitant la gestion des données, de la vie privée et par conséquent en augmentant l'utilisabilité du système).

Le modèle « NEXUS », pour « *Networked Entities X (crossed) Users Society* », est constitué de plusieurs briques, que nous appelons des « sous-modèles ». Ces sous-modèles équivalent à des modèles à part entière, dont la portée est limitée à un des aspects constituant un SAA, comme le montre la figure 18.

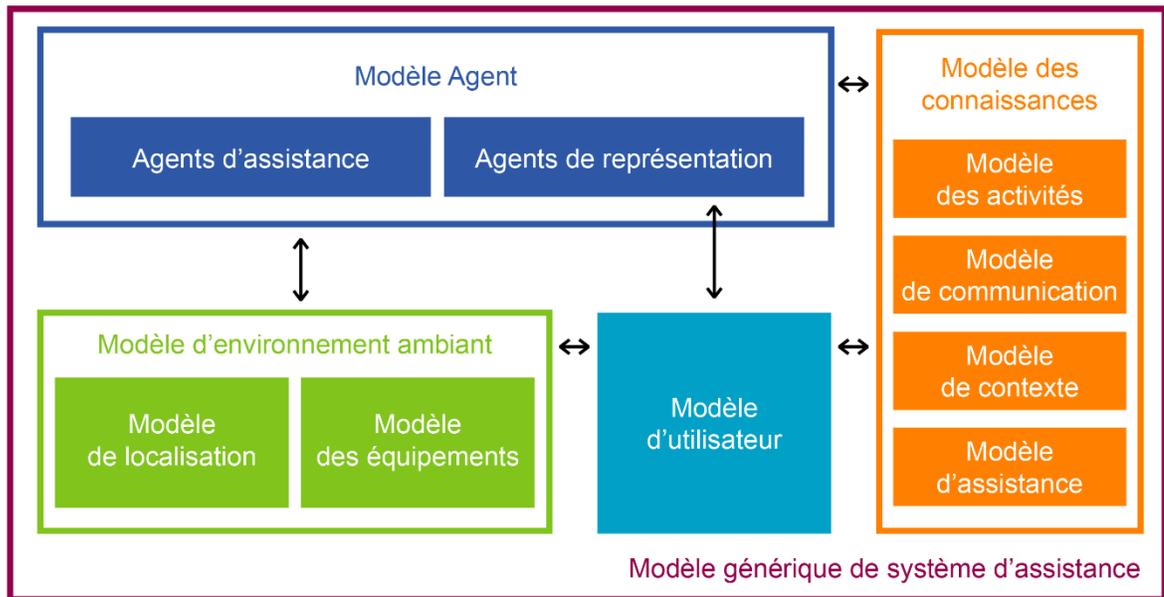


Figure 18 – Schéma des modèles constituant le modèle générique NEXUS

Dans un premier temps, le *modèle des connaissances* reprend les concepts d'activités et de contexte présentés dans l'ontologie. Sur cette base, le modèle formalise la manière dont ces informations peuvent être mémorisées et comment elles peuvent être échangées.

Dans un deuxième temps, le *modèle d'environnement* ambiant développe les concepts de localisation et d'équipements d'OfASCIA, et formalise les mécaniques qui en découlent possiblement.

Ensuite, le *modèle utilisateur* développe les applications de la structure offerte par l'ontologie sur les personnes, et l'articule avec les services à disposition. Il offre également un mécanisme intermédiaire pour les interactions entre ces personnes et le système.

Enfin, le *modèle agent* décrit le « squelette » des agents logiciels chargés de délivrer les services d'assistance, ainsi que celui des agents de représentation (ou avatar), chargés de faire le pont avec les utilisateurs.

Ce modèle vise donc à offrir une structure générique qui facilite la conception d'architectures de systèmes ambiants dédiés à l'assistance. OfASCIA et NEXUS forment un socle sémantique et logique de référence où architecture, connaissances et communications suivent une structure uniforme. Les données en sorties peuvent bénéficier de cette même

sémantique pour être facilement ré-exploitable. Aussi, cela facilite-t-il le développement d'un système ambiant d'assistance en n'ayant plus qu'à produire l'architecture spécifique du système répondant à la problématique ciblée. Enfin, il est possible de préciser que la conception modulaire du modèle, schématisé sur la figure 18, offre une possibilité d'utilisation, même seulement partielle, de certaines briques.

3. Modèles de connaissances

Le modèle des connaissances regroupe l'ensemble des éléments donnant la possibilité de catégoriser et d'exploiter les informations construites dans le système. En ce sens, le modèle reprend les concepts de *contexte* et d'*activités* pour mémoriser les connaissances acquises par le système. Ces connaissances pourront être exploitées pour l'assistance, ou pour être partagées avec d'autres acteurs.

Pour modéliser les changements dynamiques au sein du système, nous nous appuyons sur le modèle d'activité développé dans l'ontologie, et basé sur les travaux de Rabardel [115]. Ainsi, le modèle reprend le quintuple : *Sujet, Objet, Instrument, Contexte, Temps*. En précisant cependant, qu'il est possible de n'avoir qu'une connaissance partielle sur une activité : à ce moment, certains éléments (par exemple, le *contexte* et le *temps*) ne sont pas connus. Notons que cette approche permet l'intégration des recherches issues du domaine de la reconnaissance des activités [5], [120], qui peut ouvrir des portes sur des systèmes d'apprentissage automatique.

MODELE DE CONTEXTE

De façon similaire, pour les connaissances sur les états du système, le modèle est fondé sur le concept de *contexte* défini dans l'ontologie *OfASCI*A. De cette manière, il est possible de former des agrégats d'informations portants sur les états des éléments du système. Ces connaissances peuvent être retransmises à un aidant en cas de besoin, ou bien surveillées (« monitoring ») par un agent logiciel qui réagira en conséquence.

MODELE D'ASSISTANCE

Pour délivrer des services d'assistance aux utilisateurs, les agents vont produire des actions motivées par l'accomplissement de leurs objectifs. Pour mettre en relation les

objectifs des agents avec les services d'assistance, il nous faut formaliser ces deux notions. Nous exposerons les objectifs dans la sous-section traitant de la modélisation des agents. Pour les services d'assistance, nous avons déterminé quatre types d'assistance à partir des travaux suivants : [5], [12], [78].

- *Accompagnement Cognitif* : L'agent adopte des comportements visant à accompagner les décisions d'un utilisateur et/ou pour prolonger son autonomie. Par exemple, en soumettant des rappels ou en guidant implicitement un utilisateur.
- *Détection des situations dangereuses* : L'agent observe l'état d'un utilisateur. Si cet état est jugé dangereux, des comportements appropriés sont exécutés pour revenir à un état plus favorable. Ces comportements peuvent prendre la forme d'appels d'aidants ou de lancement d'alerte, par exemple.
- *Surveillance de la santé* : Pour délivrer ce service, l'agent récupère des données liées au paramètre de santé à observer (le plus souvent via des dispositifs connectés). À la suite de cette collecte, l'agent exploite ces données pour qualifier l'état de la personne. Par la suite, cette information pourra être communiquée à d'autres personnes ou à d'autres agents en fonction des besoins et des préférences de l'utilisateur.
- *Assistance des activités* : Lorsqu'une activité à supporter est déclenchée par un utilisateur, l'agent met en route un ensemble de comportements, jusqu'à l'accomplissement de cette activité. Par exemple, dans le cas où l'utilisateur souhaite se rendre chez son médecin, l'agent peut lui indiquer le meilleur trajet à suivre, ou bien faire appel à un accompagnateur dans le cas où la personne ne trouve pas sa destination.

Au travers de ces divers types de services d'assistance, nous constatons bien l'importance de la prise en compte de différentes connaissances par le système : à la fois les informations statiques sur les états (porté par le concept de *contexte*) et les informations portantes sur la dynamique des acteurs (porté par le concept d'*activité*).

MODELE DE COMMUNICATION

Pour exploiter ces connaissances et mettre en ordre de marche les comportements appropriés, il demeure primordial de formaliser les échanges entre les acteurs du système. Pour cela, nous nous appuyons sur la description des actions effectuées dans la section

(3.1.5). Aussi, la structure d'une communication se décompose en trois objets : l'*émetteur*, qui est le nom de l'acteur qui envoie le message ; le *destinataire*, qui correspond au nom de celui qui le reçoit ; un *identifiant* permettant d'identifier une communication et le *message* en lui-même. Ce *message* est composé d'une *proposition* et d'une *valeur de vérité*, comme le montre la figure 19. La *proposition* correspond à un agrégat d'informations structurées selon l'ontologie. En général, cette proposition concernera soit un *contexte*, soit une *activité*. Cependant, elle peut porter sur n'importe quelle information structurée par l'ontologie. La *valeur de vérité* est la valeur attribuée pour qualifier la croyance de l'acteur par rapport à la proposition (soit « TRUE » ou « FALSE » ou « ISTRUE ? »). Elle change en fonction du type de message. Précisons que nous nous limitons à la logique booléenne dans un premier temps, notamment pour nos expérimentations. Mais cette *valeur de vérité* peut être complétée par un degré de certitude pour être mieux appliqué au monde réel.

Pour illustrer cet usage, reprenons l'exemple de David qui passe un appel lorsqu'il est à l'hôpital. Cette *activité* est reconnue par le système. Imaginons que David souhaite partager le déroulé de ses activités avec son agent avatar, chargé d'enregistrer ses activités quotidiennes. Cette communication de David vers l'Agent avatar serait structurée de la manière suivante :

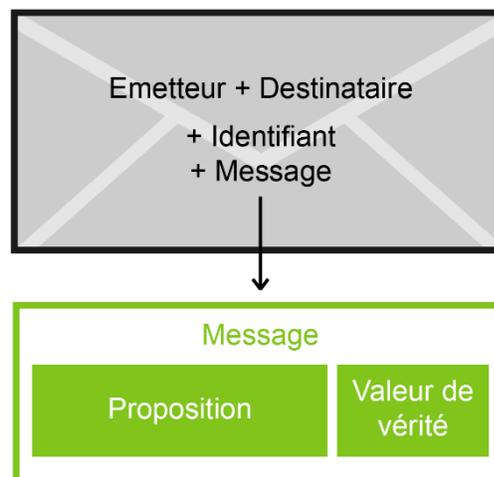


Figure 19 – Schéma de la structure d'une communication

Émetteur : David

Destinataire : Agent Avatar

Identifiant : Conversation 00

Message :

Proposition : Activity = « David passe un appel »
Subject = Person = « David »
Instrument = Hardware = « Smartphone de David »
Action = « Passer un appel »
Time = Time.Day = « 27 » et Time.Month = « Janvier »
Context = Location.BuildingComplex = « Hôpital »
Location.Street = « Rue de la bourgogne »
Val. vérité : TRUE

En outre, le type de communication peut prendre trois formes différentes :

- *Pragmatique* : Si l'émetteur demande un service ou une action à l'acteur destinataire. Cela correspond au fait de statuer sur une information, un *contexte* par exemple. L'exemple précédent est un exemple de communication pragmatique où on demande à l'Agent avatar d'admettre une information. Ce type s'identifie par sa *valeur de vérité*, qui peut prendre la valeur « TRUE » ou « FALSE ».
- *Épistémique* : Si l'émetteur demande une information à l'acteur destinataire. Ce type de communication correspond à une prise de renseignement sur une information spécifique, et la distinction se fait également par la *valeur de vérité*. Par exemple, si nous voulons demander si l'information précédente a vraiment eu lieu, nous pouvons utiliser le message précédent, avec la *valeur de vérité* : « ISTRUE ? ».
- *Émotionnelle* : Cela correspond à une communication qui concerne un soutien affectif. Ce type de communication ne devrait avoir comme émetteur et destinataire que des personnes. La connaissance de l'existence de ce type de communication peut être prise en compte par le système. Cependant, les champs de *message* et de *valeur de vérité* seront vides pour ce type d'échange.

Nous venons de parcourir le modèle des connaissances. Cette partie joue un rôle crucial pour la **personnalisation**, en structurant les informations permettant au système d'évoluer dynamiquement. Par ailleurs, cette structure est générique et **flexible**, ce qui permet une adaptation à différentes problématiques. Enfin, la modélisation des communications

constitue un pas de plus vers l'**approche centrée sur l'utilisateur**, en offrant une manière explicite de prendre en compte les différentes interactions, dont celles qui sont de nature émotionnelle et relèvent de l'affect.

4. Modèle d'environnement ambiant

Le modèle que nous proposons vise la représentation de systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Ce type de système fait partie des systèmes cyber-physiques, c'est-à-dire : des systèmes opérants dans et pour notre environnement physique réel. Dans le cadre de cette interaction entre les *acteurs* et *l'environnement*, il est indispensable de modéliser ces deux classes. Dans cette section, nous revenons sur la modélisation de l'environnement, qui est construite sur la structure déjà offerte par l'ontologie *OfASCIA*.

MODELE DES LOCALISATION

Le modèle s'appuie sur le concept de « *Location* » défini dans l'ontologie *OfASCIA*. Ainsi, il est concevable d'utiliser la classe « *Point* » pour définir un lieu par rapport à des coordonnées géographiques, ou la classe « *Place* » pour définir un lieu nommé. Une fois ce lieu défini, il pourra être utilisé pour former un *contexte*, qui constitue un des éléments de base pour porter les connaissances du système, comme nous l'avons vu dans la section précédente.

MODELE DES DISPOSITIFS

Autre élément s'appuyant sur l'ontologie, le modèle NEXUS réutilise le concept de « *Hardware* ». Il est possible de définir des équipements à partir de cette nomenclature pour former des connaissances. Une fois de plus, ces connaissances pourront être formalisées avec les concepts de « *contexte* » et « *d'activité* ».

Du reste, le modèle NEXUS exploite avantageusement le caractère *composite* des équipements (« *Hardware* »). Comme nous l'avons abordé, ce mécanisme octroie la possibilité d'encapsuler des appareils dans un autre appareil. Ce mécanisme permet d'induire une logique de composition/décomposition permettant de rendre le système adaptatif. Il est possible de décomposer un équipement en accédant aux différents « sous-équipements » qui le composent. Sur la figure 20, nous illustrons ce mécanisme avec la décomposition d'un smartphone, en un écran et un appareil photo (APN). Alors, il devient possible de composer des équipements virtuels à partir d'équipements réels. Dans ce même exemple, nous

proposons la construction d'un capteur virtuel dédié à la détection des chutes. Ce capteur virtuel repose sur deux capteurs : le gyroscope et l'accéléromètre.

Finalement, ce mécanisme de décomposition/recomposition est bénéfique sur deux dimensions : D'une part, cela apporte une connaissance approfondie des appareils de l'environnement qui sont disponibles pour les agents. Puisqu'un équipement est décrit sur plusieurs niveaux de granularité, cela amène à plus de précision et de flexibilité du système. Identiquement au modèle de localisation, il est possible de procéder à des inférences pour former de nouvelles connaissances grâce à cette décomposition. Par exemple, si un agent a besoin de trouver un gyroscope rapporté à David, mais que David n'en a pas. Il est possible de décomposer le smartphone de David pour apprendre le fait qu'un gyroscope est finalement disponible.

De plus, à partir de ce gyroscope et d'un accéléromètre, il est envisageable de recomposer des équipements virtuels. Comme dans l'exemple de la figure suivante, où nous recomposons un détecteur de chute.

D'autre part, que ces équipements composites soient physiques, virtuels, ils pourront être manipulés par les agents de la même manière, ce qui facilite la transition entre différents environnements de déploiement, et donc vers les simulations hybrides.

Enfin, comme nous l'avons montré dans l'article [19], un tel mécanisme de décomposition/recomposition permet la mutualisation des objets connectés et de leurs composants. Cette approche, en plus d'apporter une plus grande flexibilité et robustesse, occasionne d'envisager la réduction du nombre d'objets connectés. Cela constitue un pas vers une meilleure efficacité des systèmes basés sur ce modèle.

Comme nous venons de le montrer, le modèle d'environnement ambiant que nous proposons permet de renseigner des *contextes* et des *activités* en répondant aux questions : Où (« *Location* ») et Quoi (« *Hardware* »). Ainsi, ce sont des éléments essentiels pour l'**adaptation** du système. Le mécanisme de décomposition des équipements et des lieux permet d'apporter **flexibilité** et **efficacité** au modèle, ainsi qu'aux systèmes qui s'y appuient.

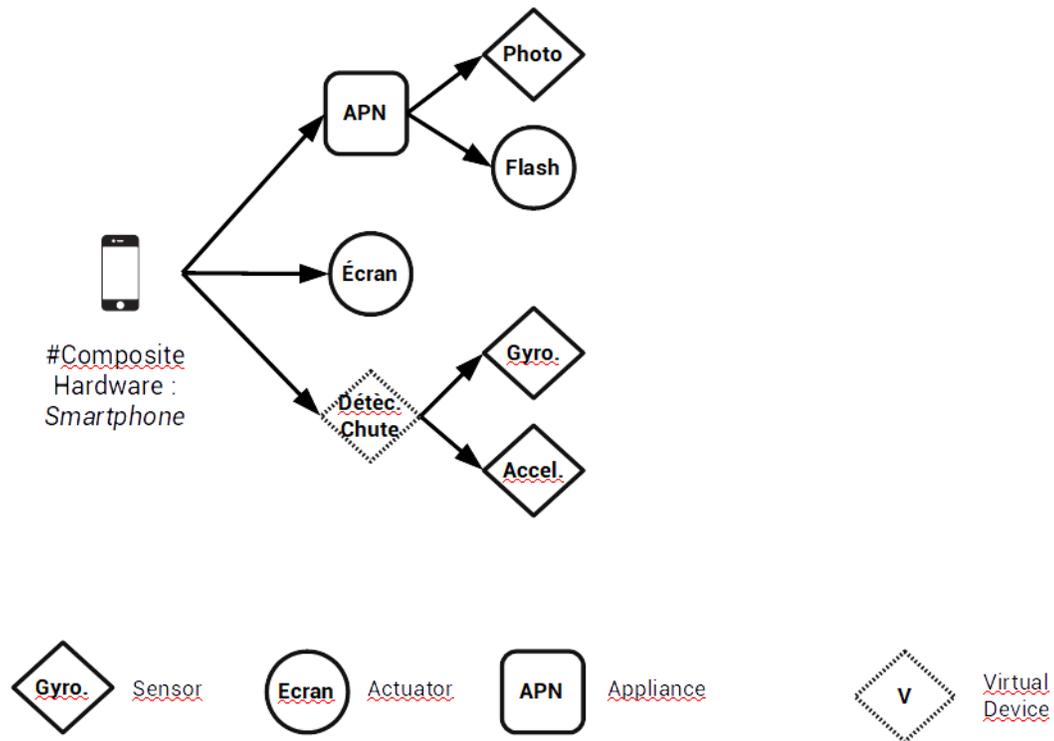


Figure 20 – Exemple du mécanisme décomposition/recomposition d’un smartphone chaque flèche exprime la relation « isComposedBy »

5. Modèle Agent

Pour rappel, les *agents* sont des entités logiciels autonomes. Et nous avons montré l’utilité du paradigme multi-agents pour la constitution des logiciels chargés de délivrer des services distribués, dans le cadre de système ambiant dédié à l’assistance. C’est pourquoi, dans le modèle *NEXUS*, nous intégrons une modélisation des *agents* en adéquation avec le reste des éléments en jeu.

Il est possible de définir des agents réactifs, c’est-à-dire des agents réagissant par réponse directe aux stimuli de l’environnement. Il s’agit de logiciels simples souvent constitués d’une condition sur l’observation d’un capteur, associé à une action. Pourtant, étant donné la complexité de l’environnement et des ressources sémantiques disponibles, il est avantageux de pouvoir définir des agents cognitifs. Ces agents possèdent des perceptions qui vont alimenter le panel des actions possibles. Le choix des actions à effectuer se fait en adéquation avec les objectifs prévus. Pour servir de socle à ces agents cognitifs, nous avons

choisi de nous baser sur le modèle BDI (Beliefs, Desires, Intentions, voir figure 21) [121], [122], qui est un modèle de référence dans le domaine des SMA.

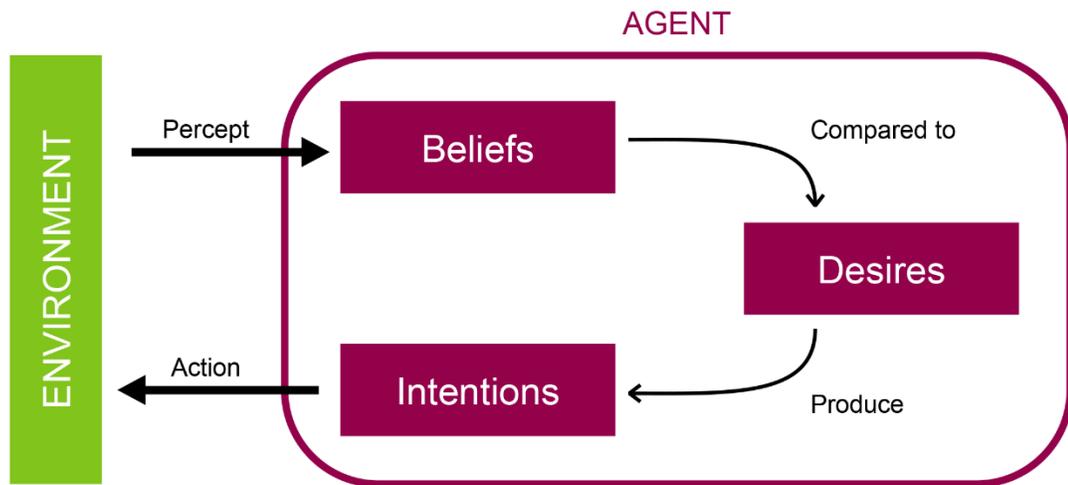


Figure 21 – Schéma de l'architecture BDI [121], utilisé pour la structuration des agents cognitifs du modèle NEXUS

En outre, c'est un modèle qui s'adapte parfaitement avec les autres briques du modèle que nous proposons. En effet, l'ontologie *OfASCIA* offre une structure complète pour formaliser les connaissances. Les croyances (Beliefs) peuvent donc être structurées grâce aux différents concepts permettant de décrire l'état du système (que ce soit à propos des autres *acteurs*, des *équipements*, ou encore de la *localisation* et des *activités* et *contextes* observés).

Afin de délivrer des services d'assistance qui soient adaptés, les *agents* doivent accomplir des objectifs qui concordent avec des services permettant d'assister directement ou indirectement les utilisateurs. Dans notre modèle, les objectifs (« *Goals* »), correspondent aux « désirs » du modèle BDI. La modélisation des buts que nous proposons s'appuie sur les travaux de [29], [121]. Il est possible de déterminer 4 types de buts, comme illustrés sur la figure 22.

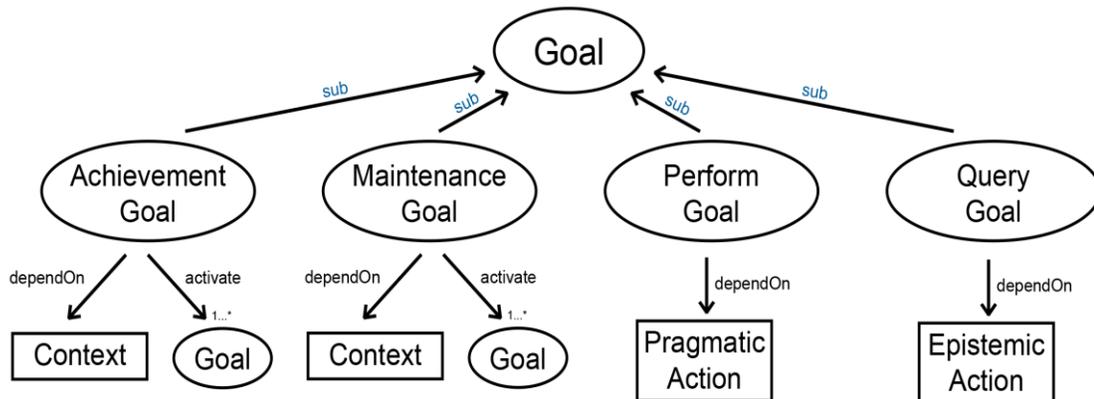


Figure 22 – Schéma de catégorisation des buts dans le modèle

Comme visible sur le schéma ci-dessus, l’accomplissement de ces buts est dépendant de l’opportunité d’effectuer certaines *actions* (ce qui pourra résulter en *activités*), ou de l’accomplissement d’autres buts par rapport à la véracité d’un *contexte*. Par exemple, pour un agent dédié au déclenchement d’alerte suite à la chute d’un utilisateur, celui-ci possède un *but d’accomplissement* (« Achievement Goal » sur la figure 22), qui déclenchera l’activation d’autres sous-buts aussitôt que le *contexte* à surveiller (ici, le fait qu’un utilisateur ait chuté) est une information vraie figurant dans la base de connaissance de l’agent.

TYPES D’AGENTS

Nous avons exposé la constitution des *agents*, telle que proposée dans le modèle NEXUS. Cette constitution permet la construction de trois types d’agents, qui occupent une place spécifique dans l’organisation des services offerts par le système.

En premier lieu, l’**agent assistant** est un *agent* dont les objectifs sont liés à la délivrance de services d’assistance. Cela fait écho aux *types d’assistance* que nous avons exposés dans la section III.B.3. Pour atteindre ces objectifs, ce type d’*agent* peut utiliser des *équipements* pour interagir avec l’environnement physique des utilisateurs. Dans certains cas, cela ne sera pas suffisant. Alors l’*agent* pourra communiquer avec des *personnes* ou d’autres *agents* pour l’aider à accomplir ses objectifs. Ces objectifs sont donc directement reliés à : la guidance cognitive, la détection des situations urgentes, la surveillance de la santé ou l’assistance des activités. Ainsi, les *agents assistants* constituent l’épine dorsale des services d’assistance délivrés par le système.

Ensuite, il peut se révéler nécessaire que le système entre en interaction avec d'autres systèmes informatiques. Dans cette situation, il convient de mettre en place une entité médiatrice, capable d'établir la passerelle. C'est le rôle des **agents médiateurs extérieurs**. D'une part, ces derniers peuvent encapsuler d'autres systèmes informatiques. La communication des autres agents vers ce système peut alors se dérouler comme n'importe quelle autre communication ayant lieu au sein du système, tandis que l'ontologie offre un cadre sémantique pour les systèmes extérieurs. D'autre part, il peut être utile que des données produites au sein du système soit redirigées en sortie du système pour être traitées ou affichées ailleurs. Par exemple, le système peut nécessiter des données issues d'une base de données, type MySQL. Un agent médiateur peut être mis en place, avec l'ontologie, portant à disposition ces informations aux autres agents internes du système.

Dans notre proposition, il existe un autre type d'*agent* médiateur, opérant au sein du système. Les **agents avatars**, qui s'assurent de la communication entre les personnes et le système ambiant. Nous approfondirons cette question dans la section suivante.

D'autres types d'agents peuvent être définis au travers du modèle. Il est possible d'imaginer des **agents de mémoire**, dont les objectifs concernent la sauvegarde et la pérennité des connaissances produites par le système. Cependant, nous pensons que les types d'*agents* que nous avons présentés constituent la base minimum établissant le fonctionnement d'un système ambiant dédié à l'assistance. Le cas d'application du système mis en place pourra demander à étendre les types d'agents à implémenter.

Plus globalement, le paradigme multi-agents, se révèle adapté pour fournir la **flexibilité**, l'**adaptation** et la **décentralisation** au système, grâce au caractère autonome et pro-actif des agents.

6. Position des acteurs humains dans le système

Comme cela a été évoqué précédemment, le modèle NEXUS se veut dans l'inclusion de l'ensemble des personnes pouvant être impliquées dans ce type de système. En effet, comme nous l'évoquions dans le chapitre présentant l'ontologie *OfASCIA*, le modèle offre les mêmes possibilités de représenter les acteurs humains intégrés au système.

Ainsi, le modèle reprend le socle introduit dans l'ontologie. Chaque *personne* peut se voir attribuer un profil, des préférences, des informations sur son état et peut être reliée aux *activités* qu'elle a effectuées. De surcroît, une *personne* peut être rattachée aux autres acteurs avec qui elle a une relation. Nous avons également vu qu'une personne pouvait jouer

différents rôles, en étant aidée ou aidante. Cette modélisation complète des acteurs humains améliore la prise en compte des différents paramètres pour l'adaptation du système à la personne. Ce qui constitue un premier élément pour centrer le système autour de la personne et de ses besoins.

En addition de ces connaissances sur la personne, la conception d'une interface entre les acteurs humains et le reste du système se révèle nécessaire. En effet, les interactions des personnes avec le système se font au travers d'objets connectés, et doivent être personnalisées. En ce sens, le système doit être en mesure de s'adapter pour déterminer intelligemment la meilleure façon de communiquer avec la personne. La transmission de message n'est pas unilatérale et chacun doit pouvoir communiquer avec l'autre dès que le besoin se fait sentir. Ceci nous amène à la détermination d'une interface à être pro-active et autonome. Qui plus est, l'interface que nous désignons doit pouvoir interagir directement avec l'ensemble des autres *acteurs* du système, qu'ils soient des *personnes* ou des *agents*. Cela fait écho à la caractéristique sociale de cette interface. Enfin l'ensemble ces actions doivent se dérouler en temps réel, pour étendre les communications de la personne avec le système au-delà des limites spatiales et temporelles inhérentes à une communication orale.

AGENTS AVATARS

Cette caractérisation nous conduit, sur la base de plusieurs travaux similaires (dont ceux de Médini et al.) [123]–[125], à proposer que cette interface homme-système soit modélisée par des **agents avatars (AA)**. Ces AA servent de médiateurs entre le système et les utilisateurs, comme le montre la figure 23. Ils portent les informations du profil et de l'état de l'utilisateur, en fonction de ses préférences. Dans un sens, ils doivent communiquer les demandes de l'utilisateur aux autres *acteurs*, dont les *agents assistants* sollicités. Dans l'autre sens, lorsqu'un autre acteur souhaite communiquer avec la personne, l'AA doit établir la liaison de manière optimale, au moyen des appareils à dispositions.

Aussi, dans certaines tâches, où une implication émotionnelle est nécessaire (par exemple lorsque l'utilisateur ne souhaite plus interagir directement avec le système), les AA pourront prendre en compte ce critère pour déléguer la tâche à une personne de confiance (par exemple le proche avec qui l'utilisateur aidé a de bonnes relations).

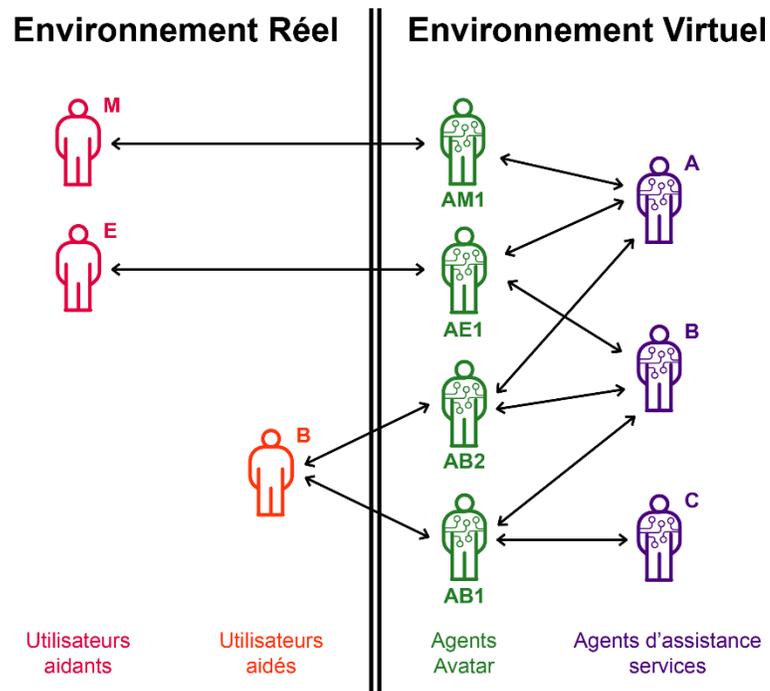


Figure 23 – Représentation de personnes en interaction avec des agents d’assistance par leurs agents avatars

ESPACE DE COMMUNICATION

Par ailleurs, un utilisateur peut désirer partager certaines informations avec certains groupes. À la manière dont nous possédons plusieurs cercles sociaux (cercles d’amis, cercle professionnel, etc.) et adaptons notre posture et notre discours, les *agents* peuvent former des espaces de communications, comme le montre la figure 24. Notons que l’accès à ces espaces de communication devrait être sécurisé. Par exemple, l’accès peut être restreint par un système d’authentification ou par approbation des autres membres.

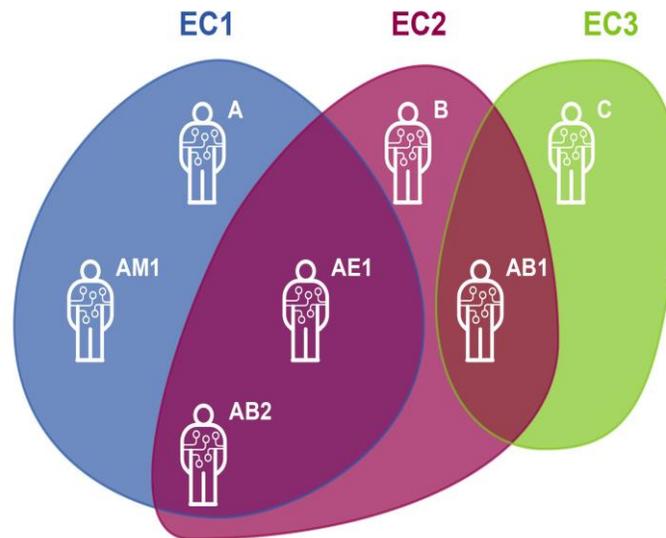


Figure 24 – Représentation des espaces de communication formés par les échanges de la figure précédente

Ainsi, pour reprendre l'exemple de la figure 23, nous considérons la personne aidée, Bob (B). Bob est assisté par un médecin (M) et par une proche nommée Edith (E). Bob possède deux agents avatars. L'AA de Bob numéro 2 (AB2) représente Bob dans un réseau de communication formel (EC1). Dans cet espace, il est possible d'imaginer que les échanges ne concernent que les informations médicales de Bob. Un autre espace de communication (EC2) est formé pour communiquer des informations plus personnelles, comme des activités du quotidien. L'espace de communication (EC2) met en relation l'agent d'assistance (B), l'AA de Edith (AE1) et les deux AA de Bob. Enfin, nous pouvons imaginer que le dernier espace de communication (EC3) est réservé aux échanges d'informations sur les entités présentes à son domicile, avec ses agents assistants.

Ces agents avatars et l'organisation de ces espaces de communication ouvrent l'utilisateur vers un plus grand choix de ce qu'il souhaite partager, et avec qui. L'utilisateur devient réellement partie prenante du système, autant pour les personnes supportées que pour les aidants. Ce critère de respect de la vie privée est crucial pour augmenter la confiance des utilisateurs dans le système, ce qui renforce son utilisabilité [17]. C'est une approche originale pour la gouvernance des données qui semble pertinente, au vu des questions sociales actuelles sur ce sujet, et des approches similaires dans la littérature scientifique [126],

[124], [127]. Enfin, il s'agit d'une organisation qui offre un moyen d'éviter la remontée des connaissances vers un serveur centralisé. Cela nécessite que les modélisateurs et les bénéficiaires du système organisent ces espaces de communications de façon à cloisonner les échanges d'informations, en accord avec les préférences.

7. Synthèse

Dans cette section nous avons abordé les différentes briques constituant le modèle d'architecture de système ambiant dédié à l'assistance que nous proposons. Ce dernier aborde toutes les facettes minimales et nécessaires dans de tels systèmes, en formalisant : l'environnement ambiant, les acteurs humains prenant place dans le système, ainsi que les agents logiciels et finalement, l'ensemble des connaissances inscrites dans le système.

Dans notre analyse de la littérature sur le domaine, et à l'instar de [58], [10], [111], il résulte un manque de modèle générique qui faciliterait le développement des SAA et permettrait l'interopérabilité de ces systèmes. Aussi, le manque de clarté sur la place de l'utilisateur dans ces systèmes a été souligné, notamment vis-à-vis de la communauté aidante.

En réponse à ces verrous, nous avons proposé un modèle générique d'architecture, destiné à la conception de systèmes ambiants dédiés à l'assistance. Ce modèle a été conçu en considérant l'ensemble des critères de conception qui se sont révélés nécessaires [12], [10], [111]. Inscrit dans un contexte multidisciplinaire, le modèle offre un socle fondé sur différentes bases de référence et octroie une représentation de l'ensemble des entités qui pourraient entrer en jeu dans ce type de système. Grâce à la base sémantique offerte par l'ontologie *OfASCIA* et à sa structure modulable, le modèle permet une interopérabilité à plusieurs niveaux. D'abord, dans son fonctionnement interne, grâce aux médiateurs que sont les agents avatars. Puis à l'extérieur, par les *agents médiateurs extérieurs*, qui jouent le rôle d'intergiciel.

De surcroît, nous avons mis un point d'honneur à la représentation de l'humain dans le système. D'abord, en proposant une formalisation explicite de l'ensemble des personnes qui peuvent intégrer le système (personne aidée comme aidante). Celle-ci détaille le profil, les préférences et les relations de la personne. Après quoi, par le biais des agents avatars, nous avons proposé une interface adaptable et transparente entre la personne et le système. Les espaces d'échanges formés par les groupes d'acteurs s'inscrivent également dans un meilleur contrôle de la communication au sein de système.

Fondamentalement, l'ensemble de ces éléments facilitent la manipulation des différents concepts et entités constituant ce type de système multidisciplinaire. En résulte une plus grande facilité de conception pour les experts de chacun des domaines spécifiques impliqués.

3. Mise en œuvre de NEXUS dans le cadre d'une simulation pour l'assistance des PMR

1. Introduction

Afin de démontrer la pertinence du modèle proposé, nous proposons de mettre en œuvre un SAA construit à partir du modèle et de l'ontologie exposée dans les sections précédentes. Ce SAA sera déployé dans une simulation hybride, ayant pour cadre applicatif l'assistance des personnes à mobilité réduite dans un milieu urbain, de type ville intelligente.

L'application à l'assistance des personnes à mobilité réduite est un cadre intéressant. En effet, le terme « Personne à Mobilité Réduite » regroupe un large panel de personnes : cela peut englober les personnes ayant une mobilité réduite à long terme, comme une personne ayant une tétraplégie ou une déficience visuelle. Mais également à court terme, comme quelqu'un qui se déplace en béquilles après s'être cassé la jambe ou une mère se déplaçant avec son bébé en poussette. Il s'agit donc d'un cas très classique, qui pourtant reste relativement peu abordé, comme nous l'avons remarqué dans notre analyse de la littérature existante.

De plus, l'environnement d'expérimentation choisi, l'environnement urbain, constitue un défi d'un point de vue dynamique et ouverture du système : un grand nombre de situations peut être imprévu. Pareillement à l'adage : « Qui peut le plus, peut le moins ». Ainsi, en proposant une solution relevant d'un environnement complexe, tel que celui du milieu urbain, cette solution doit pouvoir fonctionner dans les environnements plus fermés et souvent plus prévisibles, comme celui d'un appartement.

Dans les sous-sections suivantes, nous détaillerons la mise en œuvre du SAA destiné aux PMR en milieu urbain, dans le cadre d'une simulation hybride. Dans un premier temps, nous analyserons le scénario d'expérimentation qui a été construit pour cette simulation hybride (3.3.2), et nous présenterons les prérequis de cette implémentation (3.3.3). Ensuite, dans la sous-section (3.3.4), nous expliquerons l'implémentation de la simulation, d'un point de vue développement. Puis, dans (3.3.5), nous décrirons l'approche hybride qui a été mise en œuvre

pour cette simulation. Suivent les sous-sections (3.3.6) et (3.3.7), qui seront l'occasion de discuter les questions d'évaluation et de validation du système. Pour cela, nous avons choisi d'étudier l'impact du système sur les relations sociales de l'utilisateur. Ce qui nous amène à conduire cette étude au travers du prisme des méthodes issues du domaine de l'analyse des réseaux sociaux.

2. Scénario et paramètres d'expérimentation

Un scénario d'expérimentation permet d'exprimer un ou plusieurs cas d'utilisations d'un système, afin d'observer le comportement de ce dernier dans une situation qui se rapproche de cas d'utilisations réels. Pour la conception d'un scénario qui soit pertinent, nous avons dû effectuer plusieurs choix.

Tout d'abord, ce scénario a été construit conjointement avec un autre doctorant dont le domaine d'expertise est la gérontologie et dont le sujet traite de l'usage des technologies pour les réseaux d'entraide. Cette démarche coopérative nous a permis d'avoir une double perspective : à la fois informaticienne et paramédicale.

Ce travail a été présenté et discuté lors de plusieurs réunions rassemblant des membres de deux laboratoires : d'une part le Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques de l'université de La Réunion, apportant une vision plus axée sur la technologie et l'aspect technique du scénario. D'autre part, le laboratoire DOMUS de l'université de Sherbrooke, dont les membres ont apporté les questionnements liés au domaine de l'assistance.

Enfin, le scénario d'expérimentation, que nous présentons dans les prochains paragraphes, est basé sur un cas d'étude provenant de l'article [128]. Dans cet article, les auteurs ont étudié l'intégration de systèmes ambiants de surveillance médicale chez des patients. Ils y présentent, notamment, le profil et les activités de certains patients. Ce qui a été la base du scénario présenté.

Le scénario, que nous proposons pour l'expérimentation de notre mise en œuvre, décrit une journée type pouvant être vécue par une personne dont la mobilité est réduite. Le document présentant la version complète du scénario se trouve en annexe. Cependant nous pouvons le résumer ainsi :

« Le sujet présente des troubles alimentaires et se déplace en fauteuil roulant, ce qui peut l'amener à avoir de l'anxiété. Cette anxiété le conduit à rencontrer des difficultés lorsqu'il fait face à des situations inhabituelles ou complexes. Notamment, il

lui arrive de se perdre ou de tourner en rond lorsqu'il est soumis à du stress. Le sujet est assisté par un système ambiant, construit sur le modèle NEXUS. Dans cette optique, trois agents assistants l'accompagnent.

Le premier agent, chargé de surveiller que le sujet s'alimente correctement, va contacter un proche de ce dernier, pour lui signaler le fait que le sujet ne s'est pas nourri. Après l'appel du proche, le sujet décide de sortir acheter des ingrédients qu'il lui manque pour préparer son repas.

À l'aller, le deuxième agent propose un trajet sécurisé jusqu'à l'épicerie proche. Ce trajet se déroule bien et le sujet parvient à faire ses achats.

Sur le chemin du retour, le sujet indique qu'il ne veut plus qu'on lui indique de trajet au système. Il suit son propre chemin et tombe à cause d'un obstacle. L'agent détecte la chute et prévient des aidants proches géographiquement : les pompiers. Après avoir été aidé par les pompiers, le sujet est désorienté et se perd avec le stress.

L'agent détecte des boucles dans le trajet et contacte un membre du système d'échange local pour le raccompagner. Ce dernier accepte et raccompagne le sujet chez lui, en lui faisant la conversation. En rentrant chez lui, le sujet prépare le repas avec l'aide du troisième agent. »

Ce scénario présente plusieurs caractéristiques intéressantes pour notre expérimentation :

- Il se passe dans les deux milieux. D'abord au domicile de la personne concernée, le scénario se déroule majoritairement à l'extérieur du domicile pour la suite, ce qui est en phase avec le cadre d'expérimentation que nous avons sélectionné.
- Il expose plusieurs types de situations : autant des situations dites « d'urgence » que d'autres qui sont plus attendues.
- Il convient à une approche hybride (en ajoutant des équipements réels à la simulation).
- Il montre l'intérêt d'une coopération entre un système ambiant et une communauté aidante.
- Il compte sur l'implication de différents types d'utilisateurs (sujet, aidant proche et aidant institutionnel).

Cependant, conduire des expérimentations en restant cantonné à ce scénario montrerait ses limites. En effet, le modèle ne serait mis en œuvre que dans une situation unique et cela reviendrait à conserver une approche ad-hoc. Cela ne nous permettrait donc pas d'exprimer l'adaptabilité du système.

C'est pourquoi, en addition de l'implémentation de ce scénario, nous avons déterminé des paramètres permettant de faire varier le scénario de base. En effet, puisque nous voulons montrer l'intérêt d'un tel système, il se révèle nécessaire de programmer des variables qui vont influencer ce scénario pour en créer plusieurs variations.

En premier lieu, nous voudrions tester le scénario avec et sans les services d'assistance. Ainsi, chaque agent est activable. Cela nous permet de tester le scénario avec et sans intervention du système d'assistance.

De plus, certains comportements de ces agents peuvent être inhibés. Par exemple, il est possible d'activer ou désactiver la suggestion de trajets adaptés à la personne en situation de mobilité réduite. La position des obstacles est également paramétrable, de même que la position géographique des différents acteurs. Puis, il est possible de paramétrer la simulation des comportements de certaines personnes. Par exemple, est-ce que la personne a un proche qui a rencontré l'obstacle plus tôt dans la journée, ce qui aura pour effet d'informer le système de la présence de cet obstacle. Puisque nous nous projetons dans un contexte de ville-intelligente, nous pourrions imaginer que cet obstacle puisse être signalé par le système de vidéo surveillance de la ville.

Cet ensemble de variations nous permet de sortir des limites d'un scénario figé pour aboutir à plus de 100 variations, en ne comptant que les activations/désactivations de comportements des agents avatars et d'assistance. À cela s'ajoutent les variations spatiales et temporelles qui s'additionnent à la dynamique du système.

3. Prérequis pour l'implémentation en simulation

Le système que nous mettons en place constitue une mise en œuvre du modèle que nous proposons et nous l'appelons *SAPR* (pour « Skuad Assist system for Person with Reduced mobility »). Ce système est implanté en environnement de simulation pour les expérimentations. Cet outil de simulation s'intitule « *SimSAPR* » (pour « Simulated SAPR ») et est basé sur un autre outil de simulation permettant de représenter les flux de déplacements urbains : « *Skuad City Model* », comme le résume la figure 25. Cet outil, comme *SAPR*, est basé sur la plateforme *SKUAD* [129].

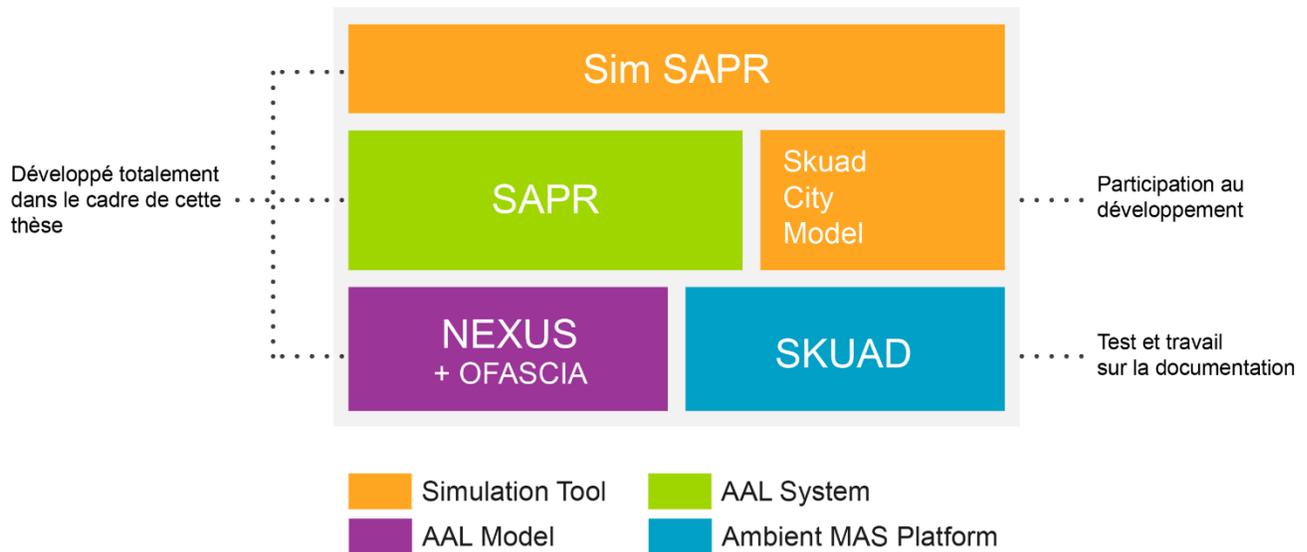


Figure 25 – Diagramme des composants de la mise en œuvre du modèle NEXUS

Les briques plus hautes reposent sur celles plus bas

Les commentaires en pointillés précisent le degré de participation par rapport à la thèse

Cette plateforme, développée au LIM, permet le développement de systèmes multi-agents ambiants. En ce sens, *SKUAD* permet la création des agents, de leurs comportements, ainsi que de leur environnement. L'implémentation se fait avec le langage Java. Ce choix est motivé par la possibilité de déployer un programme Java sur un grand nombre d'appareils différents, allant de l'ordinateur fixe au micro-ordinateur (type Raspberry Pi), en passant par le smartphone (avec l'OS Android). La brique « AgentU » (voir figure 26) permet la gestion des *agents* et offre un patron pour leur développement en Java. Ces *agents* sont liés à deux environnements : d'une part à l'environnement physique, avec lequel ils interagissent par le biais des *équipements* (géré par « UDA », voir figure 26) ; d'autre part l'environnement social, qui regroupe les espaces de communications créés et exploités par les agents (permis par la brique « Ubiquity »). La dernière brique (HubUDP) permet la mise en réseau de tous les éléments gérés par la plateforme, ce qui autorise au système d'être distribué sur plusieurs machines et de communiquer avec les objets connectés.

En plus de pouvoir fonctionner en « Mode ambiant », la plateforme permet de fonctionner en « Mode simulé », comme le montre la figure 26. Dans cette configuration, les équipements et l'environnement, dans lequel les agents sont plongés, sont artificiels.

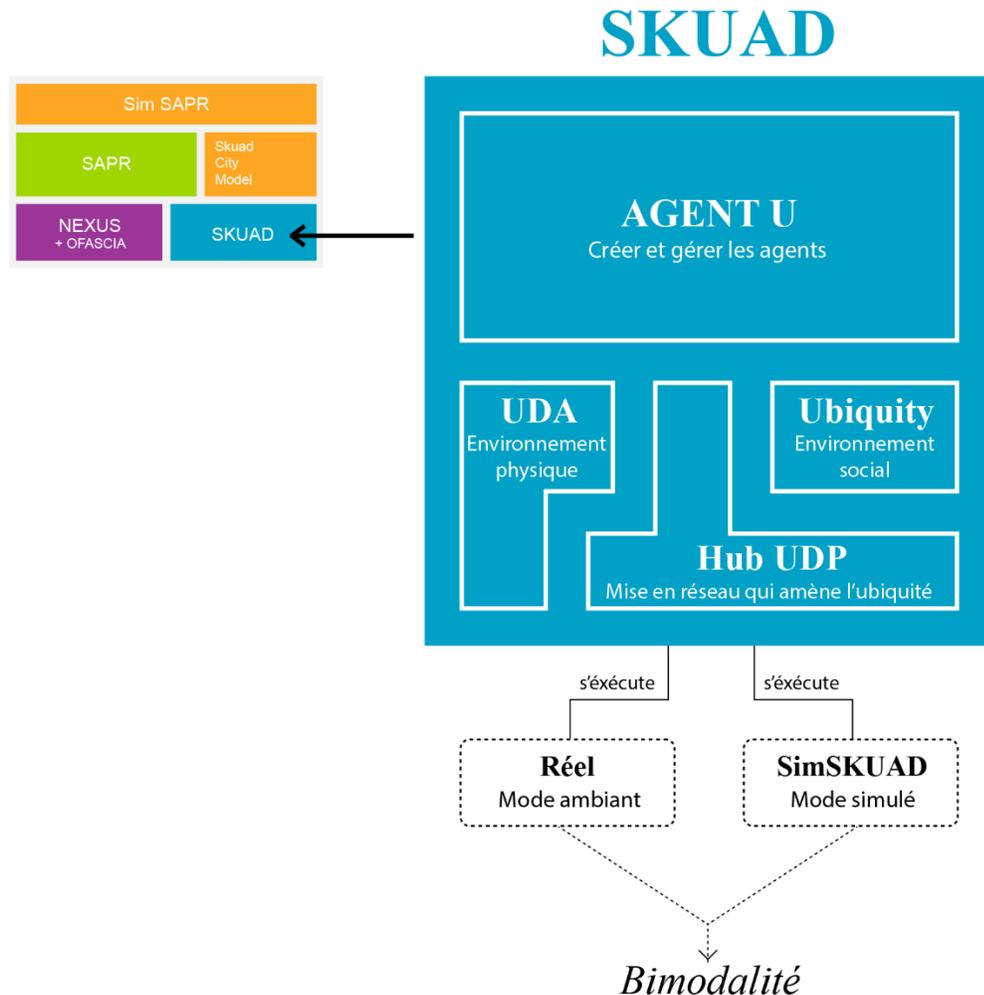


Figure 26 – Diagramme d’architecture de SKUAD

Le choix de cette plateforme amène plusieurs avantages : nous pouvons implémenter notre modèle pour développer le SAA dédié aux PMR à partir de cette plateforme. De plus, nous pouvons faire fonctionner ce même système en mode simulation, sans nécessiter de réécriture de code. Enfin, nous pouvons également implémenter le scénario lui-même avec la plateforme. Il en résulte un gain de temps, offert par l’uniformité des éléments à implémenter selon la même plateforme.

Comme nous l’avons montré sur la figure 25, la simulation de l’outil SAPR s’appuie sur un autre outil de simulation : « Skuad City Model » [129]. Ce modèle de simulation permet de représenter des flux de déplacements en milieu urbain. Chaque agent représente une

personne, qui va suivre un agenda d'activités quotidiennes. Ces agendas sont définis selon le tuple suivant :

$$AP_i = (ACT_i, MDT_i, PD_i)$$

ACT_i représente l'activité à effectuer. Cette dernière peut consister à « Rentrer à la maison », « Faire des courses », « Faire un loisir » ou encore « Travailler ». Ceci conduit l'agent à se déplacer, pour se rendre sur le lieu de sa prochaine activité. Les déplacements sont ensuite étudiés par une analyse statistique. Ce modèle de simulation s'appuie sur « Smart City Model », présenté par T. Ralitera et al. [130], [131].

Nous avons développé l'outil « SkuadCityModel » en 2018 [129], avant le début de cette thèse. Ce développement a été motivé par un besoin de meilleures performances et de maîtrise de la plateforme multi-agents. Puisque nous maîtrisons l'implémentation de Skuad City Model, et que celui-ci possède plusieurs avantages, il s'est révélé évident de nous appuyer sur ce dernier pour notre nouvelle simulation « SimSAPR ».

En effet, la simulation offre déjà un environnement SIG intégré, qui est indispensable dans le cadre de notre cas d'application qui s'inscrit dans le contexte de la ville intelligente. Ce dernier se rattache à la modélisation des *localisations*. De plus, nous souhaitons mettre en place un SAA. Comme nous l'avons montré précédemment, SKUAD possède l'avantage d'être une plateforme bimodale, qui permet le déploiement d'un SMA en simulation ou en mode ambiant. Enfin, du fait de l'approche par activité adoptée dans SkuadCityModel, l'enrichissement à partir de notre modèle serait facilité par la description des activités que nous adoptons.

4. Implémentation en simulation

SAPR

Après avoir parcouru les éléments requis pour la mise en place du système *SAPR*, nous allons nous pencher sur la question de son implémentation. *SAPR* est un SAA chargé de délivrer des services d'assistance des déplacements pour les personnes à mobilité réduite. En plus de l'agent avatar, la personne supportée se voit associer un agent assistant les déplacements. Ce dernier délivre plusieurs services destinés à cet usage, comme le montre la figure suivante :

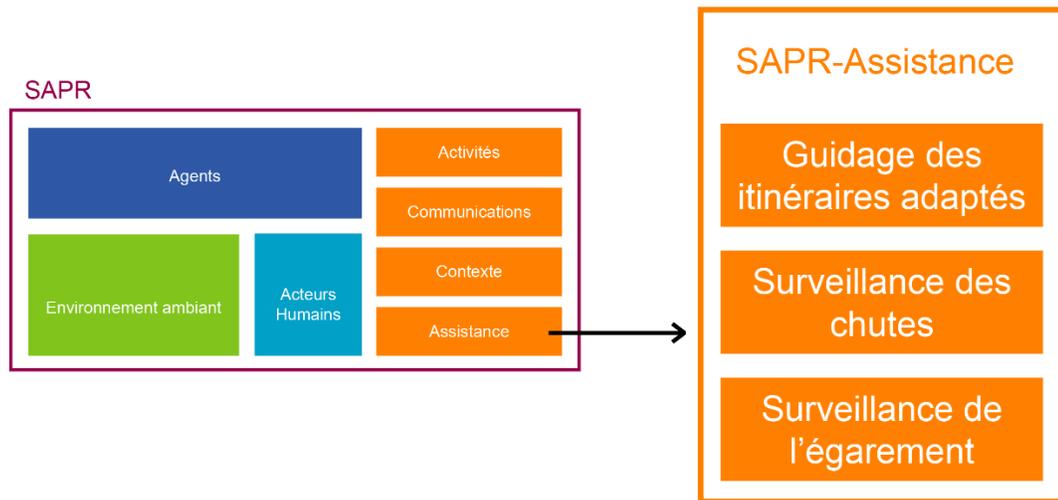


Figure 27 – Diagramme des types d'assistance de SAPR

1. Le guidage sur des itinéraires adaptés, en cas de demande (que l'on peut classer dans la catégorie de la *guidance cognitive*).
2. La surveillance et la prise en charge des cas de chute (que l'on peut classer dans la *détection de situations urgentes*).
3. La surveillance et la prise en charge des cas d'égarement (que l'on peut également classer dans la *détection de situations urgentes*).

Pour représenter ces services au niveau de l'agent, le modèle expose la description des *objectifs* correspondants. Ceux-ci sont associés à d'autres *sous-objectifs* ou à certaines *actions*. La figure 28 schématise l'arbre des buts à atteindre pour la surveillance et la prise en charge des cas de chute. Les actions dépendent, soit de la communication avec un autre *acteur*, soit d'une interaction avec un *équipement*. Ces *actions* ont pour répercussions finales attendu d'assister, la personne.

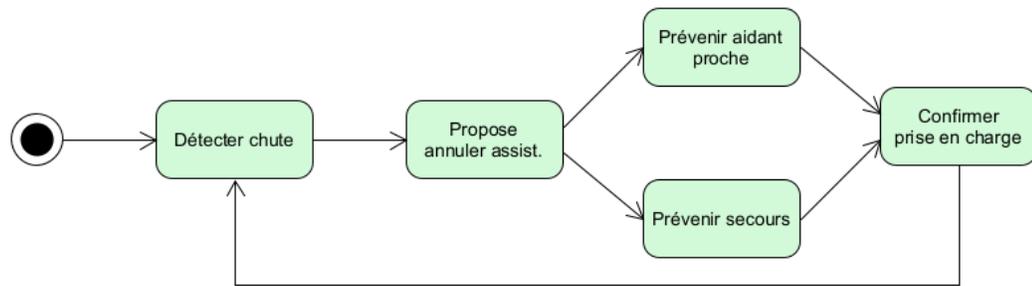


Figure 28 – Diagramme des sous-buts à atteindre pour la prise en charge des cas de chute

Pour la mise en place de ce système, plusieurs équipements sont donc requis. Ces derniers ont été définis dans SAPR, comme le montre la figure suivante :

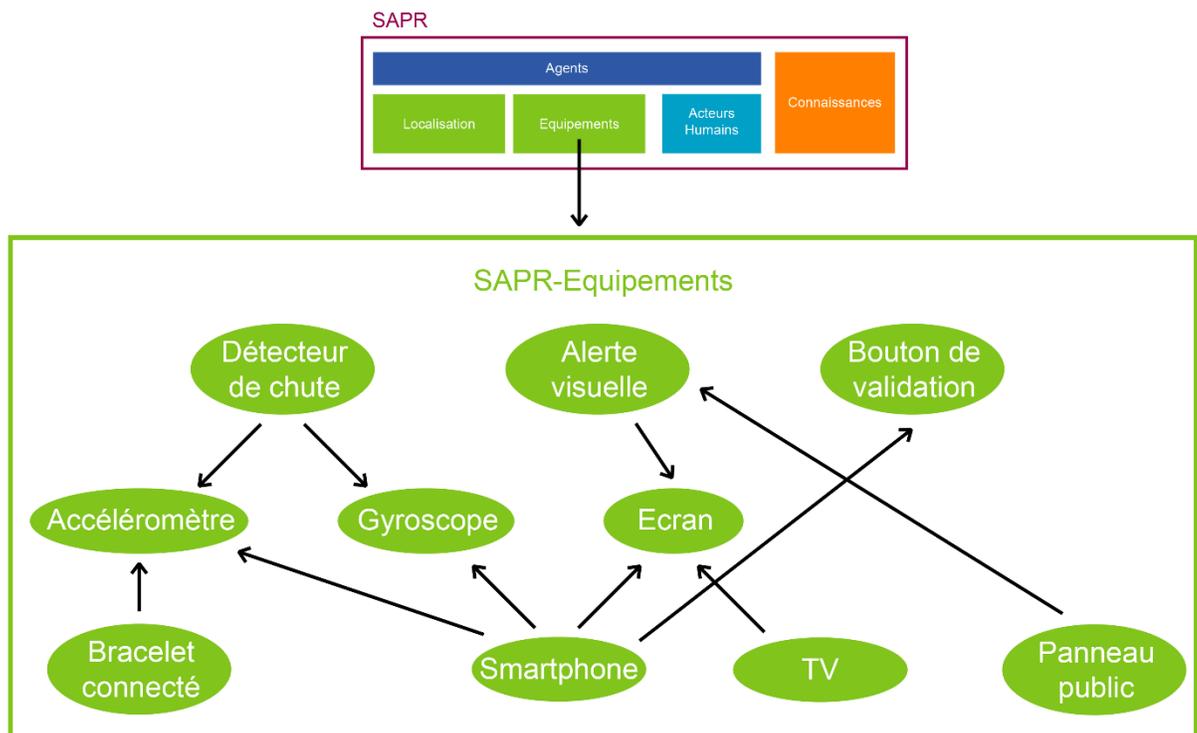


Figure 29 – Diagramme des équipements définis dans SAPR
 Les flèches indiquent un lien de type « estComposéDe »

1. Un détecteur de chute, associé au sujet. En étant génériques, nous nous assurons que plusieurs équipements composites pourraient jouer ce rôle : un smartphone ou un bracelet connecté contenant un accéléromètre sont des candidats valides [75]. Mais un dispositif de détection installé dans l'environnement public le pourrait aussi, par exemple un système de détection par caméra, à l'image de la proposition de R. Baghezza et al. [132].
2. Un écran, associé au sujet pour permettre les communications de son AA vers lui-même. Encore une fois, nous restons génériques ici. Suivant la situation, cela pourra être l'écran du smartphone ou de TV de l'utilisateur.
3. Des écrans et des boutons, utilisés par les AA des membres de la communauté aidante, afin de permettre leur interaction avec le système.

Pour illustrer ce fonctionnement, intéressons-nous aux services de surveillance et de prise en charge en cas de chute par l'agent assistant. Pour chacun de ces services peuvent être associés des objectifs, comme le montre la figure 30 : Un *but de maintenance*, qui est actif tant que l'utilisateur est tombé, et qui déclenchera des sous-buts pour permettre la prise en charge de cette chute par un aidant. Un *but de requête*, permettant de rafraîchir la connaissance de l'agent sur l'état de la chute de la personne. Pour cela, l'état du capteur de détection de chute est récupéré.

Ainsi, grâce à ce but de requête, l'agent va questionner le capteur de détection de chute jusqu'à ce que ce dernier soit activé. Ce capteur de détection de chute peut être construit grâce au mécanisme de décomposition/recomposition, à partir d'un accéléromètre (par exemple celui d'un smartphone ou d'un bracelet connecté). En effet, lors que les éléments nécessaires à l'accomplissement d'un but correspondent avec l'état réel du système, l'agent déclenchera les sous-buts ou actions associées, comme le montre la figure 31.

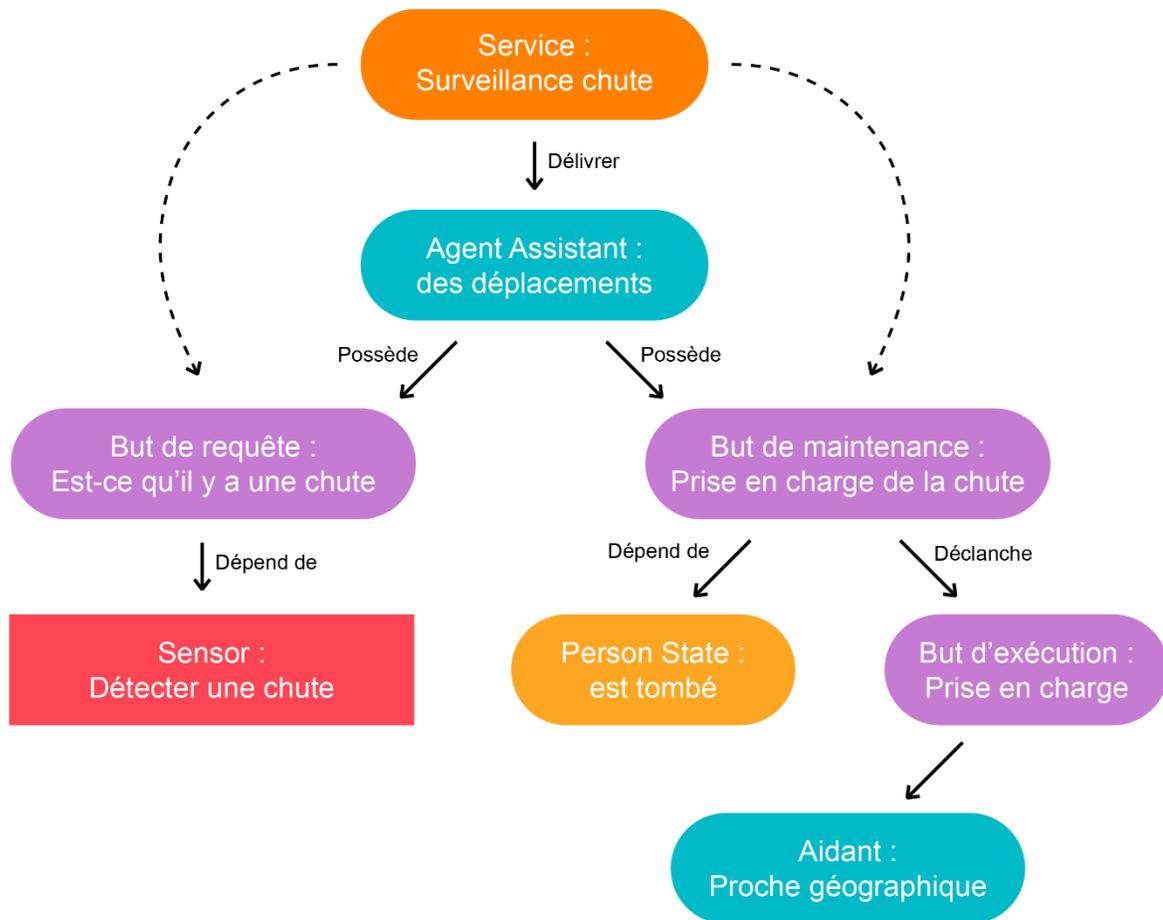


Figure 30 – Diagramme partiel du service de surveillance de chute
 Les flèches en pointillés expriment un lien indirect entre l'existence d'un but et un service associé

Pour aller plus loin, si une chute est détectée, cela aura pour effet d'activer le but de maintenance chargé de la prise en charge de la chute. Cette prise en charge suit le processus suivant : Récupérer les coordonnées de la personne concernée (en contactant l'AA ou tout autre agent susceptible de connaître cette information), et tant que la prise en charge n'a pas été acceptée, demander la prise en charge aux aidants les plus proches géographiquement. Cet accident pourra être communiqué au médecin traitant et/ou aux proches, suivant les préférences de la personne.

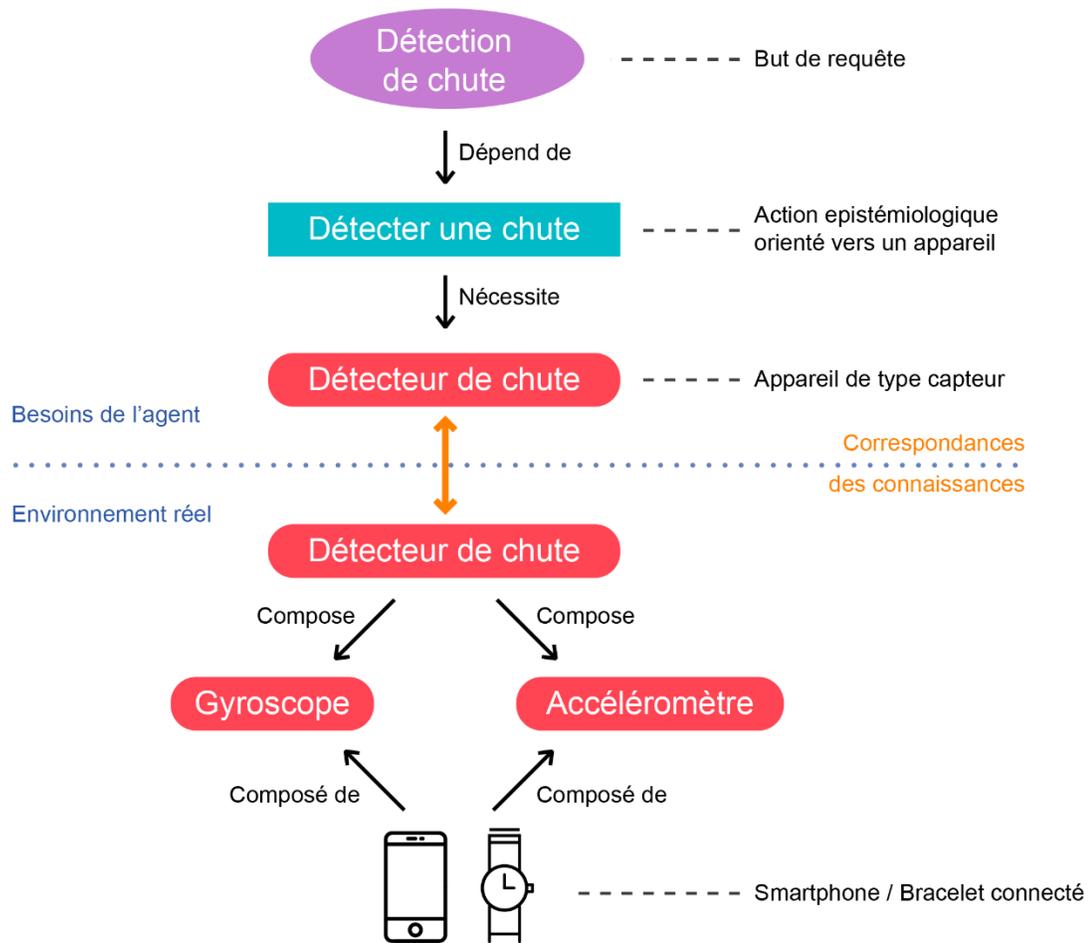


Figure 31 – Diagramme du but et de l'opportunité de l'agent, pour l'exemple de la détection de chute

Cette approche se rapproche de la programmation situationnelle [133] et facilite la conception des services, et donc des agents et de leurs comportements. Puisque la description se fait à un haut niveau d'abstraction, cela rend la conception plus abordable pour des concepteurs métiers, ou non informaticien. De plus, cette approche très souple régit la modularité et la distributivité des services.

Pour résumer, *SAPR* est un système ambiant dont les services proposés visent essentiellement à l'assistance des déplacements des personnes à mobilité réduite. Ce système ne se veut pas exhaustif, mais représente une preuve de concept pour le modèle NEXUS et l'ontologie OfASCIA. Aussi, pour les besoins du scénario, les agents permettant de

surveiller l'alimentation et l'assistance de la préparation du repas ont été implémentés dans le cadre des expérimentations en simulation.

SimSAPR

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous avons choisi d'expérimenter le système *SAPR* en condition de simulation. En effet, la simulation est un outil permettant de s'affranchir des contraintes humaines, matérielles et physiques pour exécuter la simulation sur un temps virtuellement très long. Dans ces conditions, nous avons baptisé le système : *SimSAPR*.

Ainsi, pour expérimenter la simulation dans les modalités du scénario évoqué, nous avons implémenté le scénario au travers de la plateforme multi-agents *SKUAD*. En ce sens, les comportements des personnes ont été simulés au travers d'agents. Dans des conditions réelles, le système représente les personnes au travers de leurs *agents avatars*. Ces *agents avatars* possèdent donc les connaissances des personnes qu'ils représentent. Nous avons donc réexploité ces *agents avatars* pour leur ajouter la capacité d'imiter les comportements des personnes virtuelles qu'ils représentent, dans le cadre d'une simulation.

Puisque notre système est simulé, il n'est pas inscrit dans l'environnement réel. Il nous a fallu trouver une manière réaliste de le représenter, notamment en ce qui concerne la localisation. Or, en basant cette simulation sur l'outil *SkuadCityModel*, nous avons bénéficié de l'environnement SIG fourni par ce dernier. À cet effet, *SimSAPR* a été exécuté dans une représentation fictive de l'île de la Réunion, construite à partir des données SIG provenant majoritairement d'OpenStreetMap. De cette façon, les agents avatars peuvent situer la personne (simulée) qui leur est rattachée, à partir de données géographiques réelles, comme l'aurait fait *SAPR*, en milieu réel. Conséquemment, nous avons construit plusieurs couches d'informations, permettant de situer des habitations, des lieux de commerces et des lieux de loisirs. Ces derniers sont utilisés pour simuler les déplacements des personnes en ces lieux, du fait de l'activité associée.

Finalement, en plus des localisations, les objets connectés représentent le deuxième volet constituant l'environnement. Dans un premier temps, les objets connectés sont également simulés à l'aide de la plateforme *SKUAD*. Ainsi, le détecteur de chute, et les périphériques d'interface sont logiciels et leurs déclenchements sont conditionnés par l'ordonnanceur de la simulation.

Par conséquent, des obstacles virtuels peuvent être posés dans l'environnement virtuel de *SimSAPR*. Le détecteur de chute (capteur virtuel) s'active lorsque les données géographiques virtuelles de la personne assistée et les coordonnées d'un obstacle se rencontrent. Les agents d'assistances peuvent ensuite déclencher leur comportement.

Le scénario, présenté précédemment, nous a accordé la possibilité de structurer des agendas virtuels. Ces agendas virtuels sont suivis par les agents avatars, qui vont simuler les *activités* des personnes, aux horaires donnés. De cette façon, *SimSAPR* permet d'observer le fonctionnement du système à travers le scénario.

L'outil de simulation *SimSAPR* repose sur une interface graphique proche de *SkudCityModel*. Cette dernière est composée de plusieurs fenêtres, comme le montre la figure 32 :

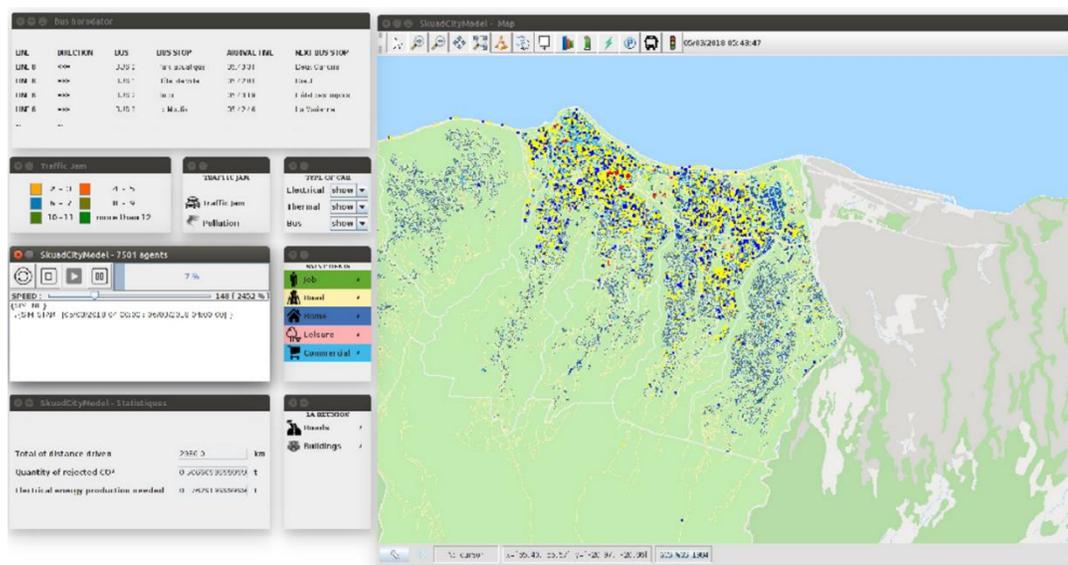


Figure 32 – Capture d'écran de l'interface de *SimSAPR*

La fenêtre « Map » permet la visualisation spatiale de la simulation, où les pastilles représentent des personnes, tandis que les différentes couches de données géographiques figurent les routes, les bâtiments, etc. Nous avons gardé la possibilité de représenter du trafic simulé, héritage de l'outil *SkudCityModel*, ce qui explique le grand nombre de personnes affichées sur la fenêtre de droite de la capture d'écran (figure 32). En définitive, en haut de cette fenêtre, une rangée de boutons permet de naviguer sur la carte, comme le montre la

Les autres fenêtres permettent, pour la plupart, de modifier l’affichage, afin d’augmenter la lisibilité de la simulation en cours. Par exemple, en choisissant de masquer certaines couches d’informations.

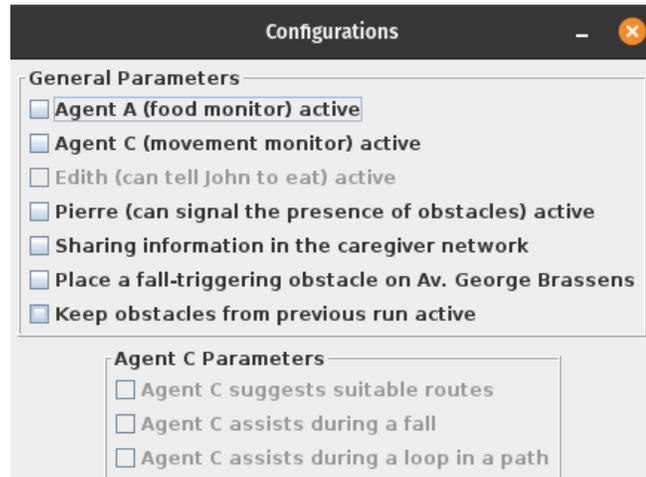


Figure 35 – Capture d’écran de la fenêtre « Parameters » de *SimSAPR*

5. Approche de conception par simulation hybride

Nous avons, dans un premier temps, déployé le système dans un contexte complètement simulé. Cependant, comme nous l’avons souligné dans le chapitre dressant l’état-de-l’art, la simulation peut ne pas représenter la totalité des cas qui se produiraient dans la réalité. Dans notre cas, l’assistance en cas de chute dépend d’objets virtuels, dont le comportement logiciel est relativement prévisible.

C’est pourquoi, nous avons choisi de produire une application simple, jouant le rôle de preuve de concept, comme le montre la figure 36.

Cette application logicielle a été développée pour Android. Cette dernière permet de récupérer les données issues de l’accéléromètre et du gyroscope de l’équipement. Ces données permettent de mettre un capteur de chute à disposition du système. L’intérêt d’un déploiement pour Android permet un déploiement à la fois sur smartphone et sur montre connectée, avec une base de code commune. En outre, les données de géolocalisation peuvent être récupérées par l’application, pour correspondre à la géolocalisation d’une personne.

Comme le décrit le modèle, il est possible de décomposer le smartphone ou le bracelet connecté en plusieurs équipements, dont un accéléromètre. Cet accéléromètre est le

composant nécessaire pour former un équipement composite : le capteur de chute. Pour des expérimentations simples, le capteur de chute est activé lorsque l'accélération captée excède un certain seuil, fixé empiriquement. Or ce capteur de chute est intégré au système, mis à disposition en tant qu'équipement rattaché au sujet. De cette façon, l'agent assistant les déplacements (dans la simulation) peut exploiter ce capteur de chute pour mettre à jour sa connaissance de l'état du sujet.

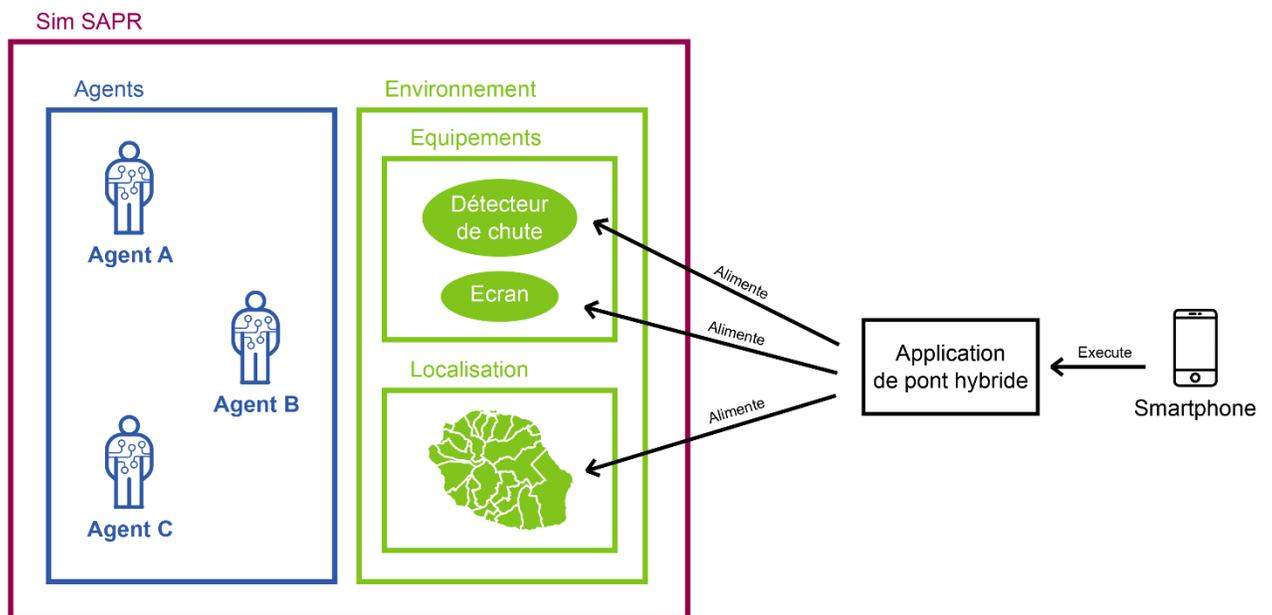


Figure 36 – Schématisation de l'interaction entre la simulation et l'application développée pour faire le pont entre environnement réel et simulé

En outre, l'application permet à l'agent d'utiliser l'écran, le haut-parleur et le micro de l'appareil pour la communication avec l'utilisateur. Lors de la chute, l'agent va demander une confirmation de l'évènement détecté. Pour cela, il utilise un équipement générique virtuel appelé « Alerte ». Cet équipement générique prend en entrée un texte d'alerte à annoncer. Il peut être constitué d'un écran et/ou d'un haut-parleur. Ainsi, si possible, une alerte visuelle sera affichée sur l'écran et une alerte sonore sera diffusée, en utilisant un moteur de synthèse vocale du texte d'alerte. En restant générique, le système gagne en adaptation. Si nous lançons la simulation hybride avec un smartphone et une montre connectée (qui ne possède pas de haut-parleur), l'agent va diffuser l'alerte visuelle sur les deux équipements (ainsi que

sur l'écran virtuel de la simulation), tandis que l'alerte sonore pourra être émise par le téléphone.

Cette implémentation est facilitée : d'une part par l'utilisation de la même plateforme *SKUAD*, à la fois pour les éléments simulés et les éléments réels. D'autre part, le cadre offert par le modèle facilite le nommage et le fonctionnement attendu de tous les éléments, qu'ils soient simulés ou non.

Au niveau des expérimentations, cet exemple d'ajout progressif d'éléments réels permet de tester le système dans de nouvelles conditions. Par exemple, nous avons pu expérimenter les aléas du réseau sans-fil utilisé, lorsque l'agent a dû s'adapter avec les équipements à disposition pour émettre une alerte.

De plus, cette simulation hybride constitue un outil viable pour l'expérimentation de nouveaux dispositifs, dédiés à l'assistance à la personne. Celui-ci offre un modèle clair, et plusieurs situations types pour le prototypage.

6. Évaluation par les méthodes du SNA

Habituellement, les SAA sont évalués de deux façons : soit en étudiant statistiquement les sorties du système, par exemple en comptant le nombre de fois où le système s'est activé ; soit, lors d'un déploiement en milieu réel, en proposant un questionnaire de satisfaction sur l'utilisation du système.

Plusieurs chercheurs, dont les auteurs de [22], [78], mettent en évidence l'importance des relations sociales pour le bien-être et la santé des personnes. Ainsi, se sentir « socialement connecté » avec les autres est un critère important dans le cas où une personne reçoit le support d'un système. Cette question devient, évidemment, encore plus importante pour les PMR. Effectivement, lorsque notre mobilité est réduite, il devient plus difficile de participer à des événements, des activités communes, ou même de rendre visite à ses proches.

Les relations sociales sont donc un « composant clé de la vie humaine » [23], qui ont été limitées par les contraintes physiques du temps et de l'espace. Or, c'est justement à cet endroit que les SAA sont positionnés. Ils permettent de dépasser ces contraintes physiques, et de prolonger l'assistance où une surveillance humaine continue ne serait pas souhaitable et difficile à mettre en place.

C'est pourquoi nous proposons d'étudier l'influence de ce type de système sur le réseau social des personnes supportées. Nous mesurons les communications au sein du système, l'influence sur la topographie des relations centrées sur la personne aidée et la charge induite sur les aidants proches.

Pour évaluer l'impact du système sur les relations sociales de la personne aidée, nous choisissons de mettre en œuvre les techniques issues du domaine de l'analyse des réseaux sociaux. Cette démarche semble d'autant plus intéressante que les auteurs de l'article récent [57] ont souligné l'intérêt que pourrait avoir cette approche pour l'évaluation des SAA.

Ainsi, nous pouvons construire un graphe des relations sociales à partir des *actions* de communication produites dans le système. Dans le cas de notre simulation, les communications entre les personnes seront également reportées par les agents qui leur sont associés. En plus de ces communications, l'ontologie et le modèle offrent une structure qui permet d'enrichir le graphe construit. Par exemple, nous pouvons ajouter la relation qui lie les personnes, et le type de communication produite.

Pour effectuer cette analyse, il est nécessaire de sélectionner des unités de mesures appropriées. Nous étudierons ces métriques lors des expérimentations du système, en simulation. Pour mesurer l'impact de notre proposition sur la qualité des communications et la charge sur les aidants proches, nous proposons d'utiliser trois unités de mesure :

- **Centralité de degré** [23], [57]: Permet de mesurer la position d'un membre, par rapport aux autres membres du réseau. Cette position représente la capacité du membre à « être connecté avec les autres ». Plus un membre multiplie les connexions avec les autres, plus nous pourrions considérer qu'il est indépendant. Cela fait donc directement écho à la question de l'autonomie de la personne, et donc à son bien-être. Dans notre situation, nous ferons cette mesure sur le *sujet*, c'est-à-dire la personne recevant le support du système.

Cet indice se calcule de la manière suivante :

$$\text{Centralité de degré}(\text{sujet}) = \frac{(\text{nombre de liens du sujet effectifs})}{(\text{nombre de membres} - 1)}$$

- **Centralité de proximité** [23]: Correspond à l'accessibilité d'un membre par les autres membres, et réciproquement l'accessibilité des autres pour un membre donné. Moins

il y a d'intermédiaires, plus le membre est accessible. Ainsi, nous pouvons déterminer que plus la centralité de proximité d'un membre est forte, plus ce nœud est central et peut interagir facilement avec les autres. Alors que la centralité de degré mesure les relations par leurs quantités, la centralité de proximité caractérise plutôt la qualité des relations. Cela se fait à partir du postulat suivant : plus une communication est directe (c'est-à-dire, moins il y a d'intermédiaires) meilleure sera la qualité de la relation. Dans le cadre de nos expérimentations, il est intéressant de compléter l'indice précédent en faisant cette mesure sur le *sujet*.

La centralité de proximité se calcule ainsi :

$$\text{Centralité de proximité}(\text{sujet}) = \frac{\text{Nombre de membres}}{\sum_{\text{membre}} \text{distance}(\text{sujet}, \text{membre})}$$

- **Centralité d'intermédiarité** [23], [57]: Est un indice permettant de mettre en lumière la capacité de certains membre à être des intermédiaires, c'est-à-dire à jouer le rôle de « pont » au sein du réseau. Cet indice fait écho à la notion de trou structural. En effet, un membre jouant un rôle d'intermédiaire fort risque de réduire fortement la connectivité du graphe lorsqu'il part. Dans le cas d'un SAA, les membres proches (comme un meilleur ami, un enfant ou un parent) peuvent avoir un rôle d'intermédiaire forte, ce qui amène à faire peser une plus grande charge sur eux. Or le SAA peut équilibrer cette charge, en répartissant directement les communications lorsqu'il n'est pas nécessaire d'ajouter ce poids sur le proche. Ainsi, dans le cas du scénario d'expérimentation, nous mesurons la centralité d'intermédiarité sur le membre proche du *sujet*. De cette façon, en montrant que la centralité d'intermédiarité diminue, nous pouvons en déduire que la charge sur l'aidant proche diminue également, et donc que le système contribue à répartir la charge sur tous les membres.

La mesure de la centralité d'intermédiarité suit le calcul suivant :

$$\text{Centralité intermed. (proche)} = \frac{\text{Plus courts chemins passants par (proche)}}{\text{Total des plus courts chemins}}$$

Pour réaliser ces mesures dans les expérimentations en simulation, nous ajoutons un nouveau type d'*agent médiateur extérieur*, appelé « *agent analyse sociale* ». Ce dernier a pour objectif de recevoir tous les messages échangés au sein d'un réseau. Il ne mémorise pas le message lui-même, mais les métadonnées sur ces messages : la date, l'expéditeur, le destinataire et le type de message (Voir section 3.2.3). À partir de ces métadonnées, et des connaissances sur les relations entre les acteurs (par exemple, si A est un aidant proche de B) et de la structure offerte par l'*OfASCIA*, l'agent alimente une base des connaissances, retraçant l'ensemble des conversations. Cette base des connaissances correspond à une base de données relationnelle, dont les tables ont été structurées par les entrées de l'ontologie. Ce fonctionnement est résumé sur la figure 37.

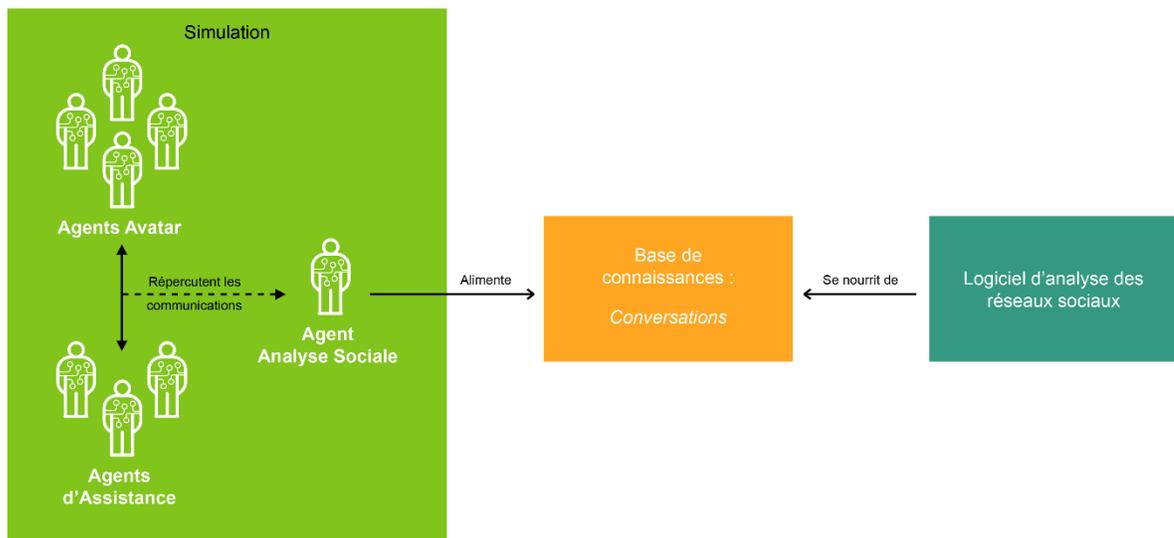


Figure 37 – Schéma du fonctionnement de la base de connaissances des conversations exploitée par le logiciel d'analyse des réseaux sociaux que nous avons développé

Nous avons ensuite développé un outil d'analyse des réseaux sociaux. Cet outil permet de reconstruire le graphe du réseau social d'un sujet à partir des conversations de la base de connaissances. Toujours dans une optique de modularité et d'interopérabilité, cette application web a été développée indépendamment de la plateforme. Nous utilisons le langage Javascript et la bibliothèque *Graphstream*, pour la construction et le rendu du graphe social. Ensuite, nous avons intégré le calcul automatique des trois indices d'analyse des réseaux sociaux dans cet outil. L'interface de cet outil se décompose en trois panneaux, visibles sur les figures 38 et 39 :

1. Le premier panneau permet d'afficher le graphe construit à partir de la base de connaissance portant sur les conversations. Les nœuds correspondent à l'ensemble des *acteurs* qui ont communiqué. Leurs couleurs varient en fonction du type d'acteur (par exemple Orange pour les *agents assistants*). Chaque message échangé entre deux *acteurs* est retranscrit en une arête dont la couleur varie en fonction du type de message (voir section 2.3.1). Ce panneau est visible sur la partie haute de la figure 38.
2. Le deuxième panneau indique les statistiques et indices calculés à partir du graphe construit pour le premier panneau. Dans notre cas, nous nous centrerons sur les trois indices décrits plus haut : la centralité de degré, d'intermédiarité et de proximité. Ce panneau est visible sur la partie basse de la figure 38.
3. Le troisième panneau consiste en un tableau permettant de visualiser l'ensemble des messages qui ont été échangés et pris en compte pour construire le graphe. Comme une sorte de « chat », les messages sont affichés dans l'ordre chronologique et permettent de voir le type de message, l'émetteur, le récepteur, etc. Ce panneau est visible sur la figure 39.

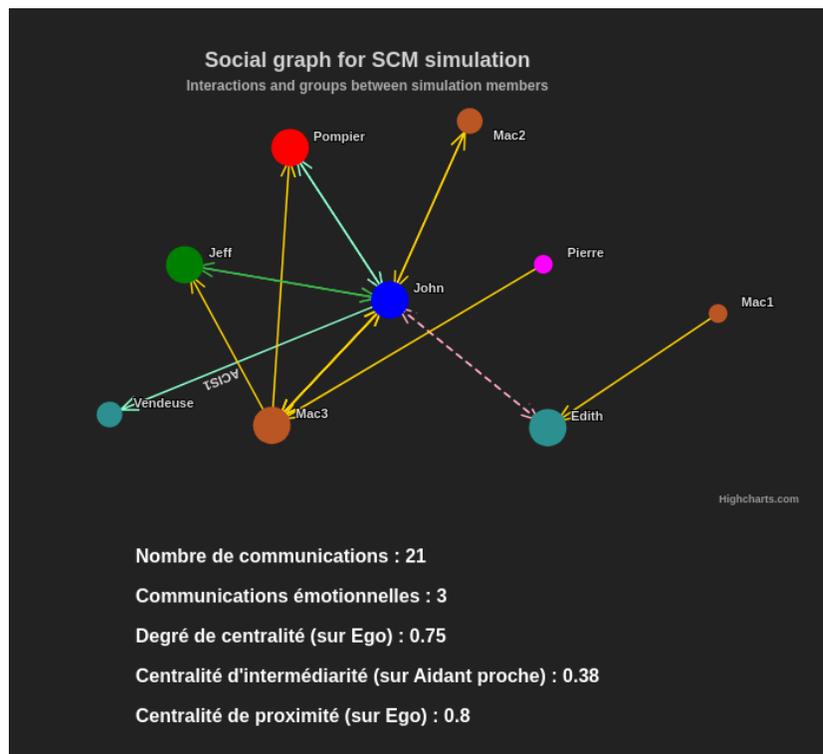


Figure 38 – Capture d'écran des panneaux de graphe et statistique, de l'application web d'analyse des réseaux sociaux

Sender	Receiver	ActivityID	Type	Relation	Timestamp
Mac1	Edith	ACIC1	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:15:00
Edith	John	All1	Emotional	Natural	2021-04-02 12:15:06
John	Edith	All1	Emotional	Natural	2021-04-02 12:15:15
John	Mac2	All2	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:15:22
Mac2	John	All2	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:15:30
John	Mac3	Unknown	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:15:52
Mac3	John	Unknown	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:15:53
Pierre	Mac3	ACIC2	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:19:52
John	Vendeuse	ACIS1	Pragmatic	Formal	2021-04-02 12:22:12
Mac3	John	Unknown	Epistemic	HSI	2021-04-02 12:22:17
John	Mac3	ACIC4	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:24:11
Mac3	Pompier	ACIC4	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:24:16
Pompier	John	ACIC4	Epistemic	Formal	2021-04-02 12:27:39
John	Pompier	ACIC4	Pragmatic	Formal	2021-04-02 12:27:43
Pompier	John	ACIC4	Pragmatic	Formal	2021-04-02 12:27:53
John	Mac3	ACIC5	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:28:24
Mac3	Jeff	ACIC6	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:35:46
Mac3	John	ACIC6	Pragmatic	HSI	2021-04-02 12:35:46
John	Jeff	ACIS2	Pragmatic	LES	2021-04-02 12:38:28
Jeff	John	ACIS2	Emotional	LES	2021-04-02 12:38:28
Jeff	John	ACIS2	Pragmatic	LES	2021-04-02 12:38:29

Figure 39 – Capture d'écran du panneau des conversations, de l'application web d'analyse des réseaux sociaux que nous avons développée

7. Résultats et discussion

Pour effectuer les expérimentations permettant d'évaluer la simulation *SimSAPR*, nous nous appuyons sur le scénario et ses variations. Nous lançons la simulation pour chaque variation et en tirons une base de connaissances de l'ensemble des messages échangés. Puis, nous en calculons les trois indices choisis, à partir de l'outil d'analyse des réseaux sociaux présenté dans les figures précédentes. Nous reportons les indices obtenus pour chaque simulation dans un tableau. L'analyse de ces indices se fera en perspective avec le degré d'assistance, déterminé selon les 12 niveaux suivants :

0 = Aucun agent assistant n'est actif, de même que le système, qui est complètement inopérant.

1 = Aucun agent assistant n'est actif. Le système n'est utilisé que pour répertorier les obstacles.

2 = Aucun agent assistant n'est actif. En plus de pouvoir répertorier les obstacles, cette information est partagée entre les aidants et le sujet.

3 = Les obstacles sont répertoriés et partagés entre les aidants et le sujet. De plus, l'agent chargé de la surveillance et la suggestion de l'alimentation est actif.

4 = Les obstacles sont simplement répertoriés. De plus, l'agent chargé de la surveillance et la suggestion de l'alimentation est actif et un proche du sujet est contacté si aucun repas n'est pris.

5 = Les utilisateurs répertorient les obstacles et partagent l'information. De plus, l'agent chargé de la surveillance et la suggestion de l'alimentation est actif et un proche du sujet est contacté si aucun repas n'est pris.

6 = Les utilisateurs répertorient les obstacles et partagent l'information. L'agent chargé de la surveillance et la suggestion de l'alimentation est actif et un proche du sujet est contacté si aucun repas n'est pris. L'agent assistant les déplacements est limité à la suggestion des trajets adaptés.

7 = Les utilisateurs répertorient les obstacles et partagent l'information. L'agent chargé de la surveillance et la suggestion de l'alimentation est actif et un proche du sujet est contacté si aucun repas n'est pris. L'agent assistant les déplacements se limite à la détection et à la prise en charge en cas d'égarement du sujet.

8 = L'agent assistant les déplacements prend en charge les cas d'égarement, ainsi que la suggestion de trajets adaptés. Les utilisateurs répertorient les obstacles et partagent l'information. Les autres services demeurent actifs.

9 = L'agent assistant les déplacements est limité à la détection et la prise en charge des cas d'égarement. Les utilisateurs répertorient les obstacles et partagent l'information. Les autres services demeurent actifs.

10 = L'agent assistant les déplacements prend en charge les cas de chute, ainsi que la suggestion de trajets adaptés. Les autres services demeurent actifs.

11 = L'agent assistant les déplacements prend en charge les cas de chute et d'égarement. Les autres services demeurent actifs.

12 = L'assistance est complète et l'agent assistant les déplacements prend en charge les cas de chute et d'égarement, ainsi que la suggestion des trajets adaptés. Les autres services demeurent actifs.

En premier lieu, analysons les résultats obtenus pour la centralité de degré. Cet indice est calculé sur le *sujet* et les résultats sont visibles sur la figure 40.

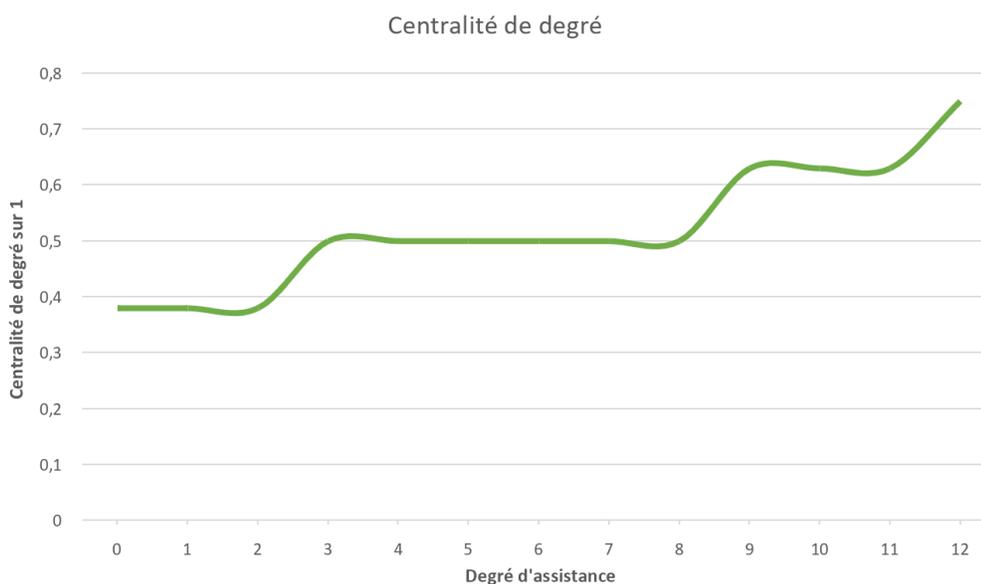


Figure 40 – Graphique de l'évolution de la centralité de degré, en fonction du degré d'assistance

Plus la centralité est proche de 1, plus la quantité des connexions sociales est importante

Nous pouvons observer une évolution croissante de la centralité de degré, qui va de pair avec l'accroissement du degré d'assistance. Celle-ci s'accroît plus fortement à partir du niveau 9, ce qui correspond à l'activation d'au moins deux services chez l'agent assistant les déplacements (en plus de tous les autres services actifs). Ceci nous permet d'affirmer que plus le système offre de services, plus élevée est la centralité de degré sur le *sujet*. Ceci implique

que le système favorise les connexions du *sujet* avec les autres, ce qui constitue, entre autres, un pas vers l'amélioration de l'autonomie du *sujet*.

En second lieu, nous observons les résultats obtenus sur le même jeu de simulation, en considérant la centralité de proximité sur le *sujet*.

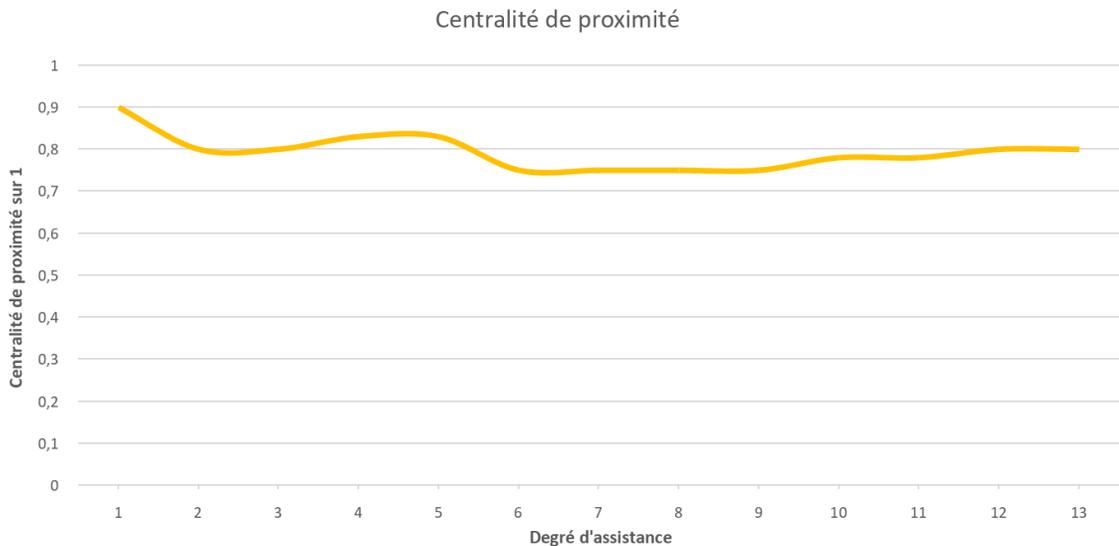


Figure 41 – Graphique de l'évolution de la centralité de proximité, en fonction du degré d'assistance

Plus la centralité de proximité est proche de 1, plus la qualité des connexions sociales est importante

Comme le montre la figure 41, la centralité de proximité avoisine 0.9 au premier degré d'assistance. En effet, puisque le système est désactivé, les communications sont encore peu nombreuses. Dès l'activation du système, d'autres communications ont lieu entre les membres, ce qui explique la baisse de la centralité de proximité. Cependant, cette dernière ne connaît pas de forte baisse qui laisserait supposer que le *sujet* n'est plus au centre des préoccupations. Nous pouvons remarquer que l'ajout simple de services ne faisant pas appel au réseau d'aidants fait diminuer cette mesure (ce qui correspond aux degrés d'assistance n°2 et n°6). Cependant, à mesure que les services sont complétés par une considération de la communauté aidante, l'indice augmente de nouveau.

À partir de cette observation, nous pourrions conclure que l'ajout progressif d'éléments dans le système ferait connaître une baisse constante de la centralité de proximité, et donc de la qualité des communications du sujet. Or, nous pouvons remarquer

que les configurations de l'assistance qui s'appuient sur le réseau d'aidants permettent d'inverser la tendance, et de faire croître à nouveau la centralité de proximité. Cela nous amène à conclure que la prise en compte de la communauté aidante, par le système, permet de favoriser la qualité des communications au sein de ce dernier. Le système joue bien le rôle de fédérateur, en proposant des services qui renforcent cette communauté aidante.

Finalement, le dernier indice que nous allons observer se focalise sur la place des proches du *sujet*. Ainsi, la figure 42 affiche l'évolution de la centralité d'intermédiation en fonction du degré d'assistance, mesuré sur l'aidant proche du scénario d'expérimentation.

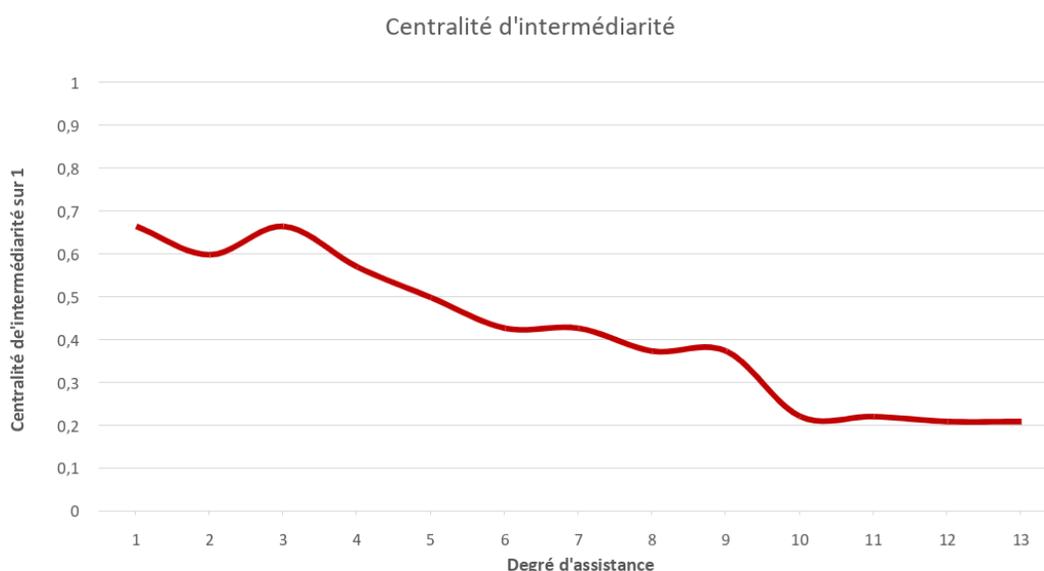


Figure 42 – Graphique de l'évolution de la centralité d'intermédiation, en fonction du degré d'assistance

Plus la centralité d'intermédiation de l'aidant est proche de 1, moins la communication est répartie sur l'ensemble des aidants

Au départ, la centralité d'intermédiation mesurée sur l'aidant proche est à plus de 0,6. En d'autres termes, l'aidant proche est l'intermédiaire par lequel se passe une grande partie des communications, en lien avec le *sujet*. Cela fait de l'aidant proche un pont central, ce qui : d'une part montre qu'en cas d'absence, l'ensemble du réseau d'aidants est affaibli ; d'autre part, cela implique une forte contrainte sur cet acteur. Nous constatons ensuite qu'à partir du niveau 4 (qui correspond au niveau où les agents entrent en communication avec la

communauté aidante), la diminution de la centralité de proximité demeure constante. Cette diminution suit l'augmentation du nombre de services d'assistance déployés.

Globalement, ceci montre qu'en densifiant la communication et en répartissant la charge sur l'ensemble de la communauté aidante, ce type de système permet de renforcer le réseau social du *sujet*. Tandis que pour les aidants proches, la charge est réduite. Cette réduction de la charge n'est pourtant pas synonyme d'une diminution de la quantité ou de la qualité des communications.

À partir de l'analyse du réseau social que nous avons menée sur la communauté aidante, nous pouvons faire plusieurs observations à propos de l'impact du système.

Tout d'abord, pour le sujet lui-même, nous avons montré qu'un système offrant des services dédiés à l'assistance pouvait ne pas nuire au fait que le *sujet* soit socialement connecté. D'abord en termes de qualité, augmenter le nombre de services et d'intervenants peut réduire la proximité du *sujet* avec ses aidants. Cependant, en partageant l'information de manière appropriée, la proximité du *sujet* avec les autres peut être améliorée. Sur le plan de la quantité, nous avons montré que ce type de système peut permettre de créer plus de lien, en mettant en contact le *sujet* avec de nouveaux aidants. Globalement, dans nos expérimentations, nous avons remarqué qu'un tel système pouvait multiplier par cinq la quantité de messages échangés.

Du point de vue des proches, nous avons observé le fait qu'il était également possible de réduire la charge sur eux, sans toutefois chercher à les retirer du système. Cette réduction de la charge ne se fait pas en retirant de l'importance ou en réduisant les communications avec les proches. Mais par densification du maillage des communications au sein du réseau d'aidants, la présence de possibles trous structuraux se voit ainsi réduite.

8. Synthèse

Lors de cette section, nous avons abordé la mise en œuvre du modèle *NEXUS* au travers de l'implémentation d'un SAA (appelé *SAPR*) appliqué à l'assistance des personnes à mobilité réduite. Nous avons construit un scénario type d'expérimentation inspiré d'un cas réel de la littérature, avec une approche pluridisciplinaire.

Ensuite, le système *SAPR* a été déployé au sein d'une simulation hybride. L'intérêt de cette approche hybride est bénéfique pour la simulation, en permettant d'ajouter plus de

réalisme et d'évènements possiblement inattendus par les modélisateurs. La simulation permettant de réduire les contraintes physiques et temporelles pour effectuer un plus grand nombre d'essais. Pour les concepteurs, la simulation est un environnement contrôlable qui peut permettre de tester un prototype d'objet connecté, par exemple. Enfin, l'approche par simulation hybride permet de mettre en place un mécanisme d'anticipation pour l'évolution d'un système (par exemple l'approche par co-simulation [103], [104]).

Après l'implémentation des services d'assistance et du scénario au sein de l'outil de simulation *SimSAPR*, nous avons proposé l'évaluation de ce dernier par les méthodes issues du domaine de l'analyse des réseaux sociaux. Nous avons observé l'évolution de trois indices de mesures sur les communications se déroulant autour du système.

Pour le système, ces expérimentations nous permettent d'affirmer la perspicacité d'une approche socio-technique dans la question de la conception de système où l'humain doit rester au centre. Dans ce cas, la masse d'objets connectés sert de médium d'interaction entre la partie logicielle du système, et les personnes aidantes. Alors, le système informatique vient compléter le soutien déjà reçu par la personne, en offrant une aide affranchie des limites de temps et d'espace que pourrait subir une personne aidante. Cette aide se fait en multipliant les communications avec les aidants déjà impliqués, et en mettant en place des mécanismes de recherche d'aidants proches. Pour le *sujet*, les communications et les personnes aidantes sont alors plus diversifiées, tandis qu'il est possible de réduire la pression qui pourrait être induite sur les proches. Pour servir correctement son objectif, ceci devrait toujours se faire selon les préférences de l'utilisateur. De plus, la méthodologie d'analyse que nous proposons constitue une façon originale et calculable d'évaluer l'impact du système déployé, en restant centré sur les personnes plutôt que sur la technologie.

La mise en œuvre de *SAPR* constitue une preuve de concept, pour le modèle *NEXUS* et l'ontologie *OfASCIA*. D'abord, nous avons reconstruit le scénario au sein de l'ontologie, en instanciant chaque élément au travers des concepts d'*OfASCIA*. Cette étape a été implémentée avec le logiciel *Protégé*, et nous a permis de vérifier que l'ensemble des éléments constituant ce type de SAA est représentable avec les concepts construits. En outre, pour effectuer une deuxième vérification de cette étape, nous avons demandé à un élève du Master Informatique de l'Université de la Réunion de construire la description du scénario au travers de l'ontologie, en OWL. Ce dernier a réussi, également, à instancier l'ensemble des éléments (acteurs, agents, activités, objectifs, localisations, équipements, etc.) du scénario. Ceci contribue à montrer la complétude de l'ontologie pour la structuration des éléments constituant un SAA.

D'autre part, le modèle *NEXUS* a été conçu pour faciliter la mise en œuvre de SAA, tout en respectant un certain nombre de critères de conception jugés nécessaires dans ce cadre. Bien qu'il s'agisse d'un système relativement simple, *SAPR* prouve que le modèle met à disposition toutes les briques nécessaires, tout en offrant les avantages liés à son interopérabilité et son extensibilité.

Plus largement, nous avons proposé une méthodologie de mise en œuvre originale basée sur : le modèle *NEXUS*, l'approche de déploiement par simulation hybride, ainsi que l'analyse du réseau social des personnes supportées. Cette méthodologie offre un cadre permettant le respect des critères de conception, facilitant le déploiement en milieu réel avec un cycle de vie progressif, tout en œuvrant pour une meilleure prise en compte de l'aspect humain lors de l'analyse de l'impact du système.

Cette mise en œuvre étant seulement une preuve de concept, une implémentation complète en milieu réel permettrait d'affiner la mise à l'épreuve du modèle. Il en est de même pour l'approche par simulation hybride, dont nous avons seulement montré les premières étapes. Nous avons montré un exemple avec l'intégration d'un équipement réel. Mais avec un cadre d'expérimentation comptant des usagers réels, la simulation pourrait aussi être utilisée comme une sorte de « projection mentale » pour les questionner sur leurs réactions face au système. C'est une démarche qui avoisine le domaine des interfaces tangibles.

Nous avons également présenté une première évaluation originale du système, basée sur l'analyse des réseaux sociaux. Ce type d'évaluation n'en est qu'à ses débuts, et mériterait d'être approfondi par une série d'expérimentations plus poussées, que nous avons envisagé réaliser au laboratoire DOMUS. Cette série devait se faire avec l'aide d'experts du domaine de l'assistance. En effet, ce type d'approche basée sur l'analyse des réseaux sociaux offre une manière calculable d'évaluer l'impact d'un système sur les personnes concernées. De même, lors d'une mise en œuvre réelle, il serait tout à fait approprié de compléter l'évaluation qualitative par questionnaire avec ce type d'approche quantitative par analyse des réseaux sociaux.

Chapitre 4

Conclusion

Cette thèse s'inscrit dans le contexte des villes intelligentes, en proposant des moyens de faciliter la mise en place de systèmes ambiants dédiés à l'assistance des personnes. Pour cela, nous proposons d'adopter une approche socio-technique respectueuse de critères de conception, mis en lumière par plusieurs chercheurs du domaine. Globalement, notre contribution se concrétise sous la forme d'un modèle générique d'architecture. Ce modèle offre une structure permettant la représentation de l'ensemble des entités impliquées dans ce type de systèmes. Il se base également sur une ontologie offrant le fondement sémantique nécessaire, du fait de l'aspect multidisciplinaire de ce type de solution. Enfin, une démonstration de faisabilité a été mise en œuvre, avec l'assistance des déplacements des personnes à mobilité réduite comme cadre applicatif.

SYNTHESE

Dans la littérature scientifique traitant des domaines de l'informatique ambiante, de l'informatique ubiquitaire ou de l'Inter des Objets, il a été souligné que plusieurs termes sont utilisés de manière inconsistante, en fonction de la vision et des intérêts des auteurs. De plus, alors que les systèmes ambiants dédiés à l'assistance présentent des facettes pluridisciplinaires (domaine de l'assistance, de l'informatique ambiante, de l'informatique distribuée, etc.) les ontologies existantes n'englobent pas l'ensemble de ces facettes. C'est ce qui nous a motivés à construire **notre première contribution, consistant en une ontologie (OfASCIA)**. Nous l'avons conçue de façon qu'elle soit générique et modulaire, tout en offrant des concepts de haut-niveau d'abstraction pour décrire l'ensemble des éléments pouvant exister dans un SAA. Elle s'appuie sur des ontologies qui font référence dans leurs domaines respectifs, tout en permettant un éclairage singulier sur la vision harmonisée et cohérente de l'ensemble des entités actives du système. Sa nature générique prend essence dans le fait qu'il s'agit d'une ontologie de domaine qui offre une fondation large, et qu'il conviendra d'étendre en fonction des besoins spécifiques des modélisateurs. En outre, cette ontologie demeure légère pour permettre son intégration à des solutions logicielles embarquées.

En plus des considérations sémantiques, plusieurs articles mettent aussi en évidence l'absence d'un modèle d'architecture générique de SAA. La plupart du temps, les solutions proposées adoptent une approche ad-hoc, ce qui constitue un frein pour la réutilisabilité et l'interopérabilité de ces systèmes. Plusieurs chercheurs soulignent également les limitations des modèles existants vis-à-vis des critères de conceptions nécessaires à un SAA. En réaction à cela, **le modèle d'architecture générique (NEXUS) constitue notre deuxième contribution.** En prenant appui sur notre ontologie, ce modèle offre une structure organisée autour des différents éléments composant un SAA. D'une part, suivre la structure offerte par ce modèle facilite la conception de solutions d'assistance adaptées. D'autre part, le modèle favorise l'interopérabilité de ces solutions, de même que leur qualité par rapport aux critères de conceptions retenus.

Enfin, après la phase de conception, la mise en opération de SAA se fait encore sur mesure, et il n'y a pas encore de méthodologie générique pour cette ultime phase. C'est pourquoi, **notre troisième contribution constitue à la fois une preuve de concept de notre modèle NEXUS et une proposition d'approche pour la mise en œuvre de SAA.** Cette approche se distingue selon deux axes : d'une part, nous proposons de faire le développement avec un cycle de vie en spirale, basé sur une simulation hybride. En ce sens, le système est d'abord simulé. Puis chaque itération, un ou des éléments réels sont ajoutés progressivement. Cela facilite les expérimentations, en outrepassant certaines limites physiques et temporelles qui auraient existé, tout en assurant un meilleur réalisme, par rapport à une simulation « classique ». En outre, pour évaluer l'impact du système, nous proposons de réaliser une analyse de son influence sur le réseau social de la personne aidée. C'est pourquoi nous proposons d'exploiter l'observation de certains indices du domaine pour évaluer les conséquences du système sur les personnes concernées.

LIMITES

En termes de modèle, notre proposition offre seulement un cadre générique permettant la conception de SAA ciblé. Bien que nous ayons fourni une preuve de concept au travers d'une mise en œuvre de ce modèle, son intérêt prendrait plus de sens avec la mise en œuvre de solutions réelles. Cela découle du fait que les critères de conception adoptés visent une utilisabilité réaliste de ce type de systèmes.

Bien que nous proposons des pistes pour l'évaluation de l'influence de ce type de système par le biais de l'analyse du réseau social de la personne aidée, cette analyse sociologique mériterait d'être développée. N'ayant pas l'expertise pour développer cette

approche, nous nous sommes limités à construire un premier outil pour mettre en place cette analyse. En plus des indices calculables que nous proposons, il serait nécessaire de compléter cette approche par une étude qualitative auprès des utilisateurs. Malgré les précautions que nous avons mises en place dans le modèle, ceci nous paraît être nécessaire pour permettre l'adoption du système par les utilisateurs.

PERSPECTIVES

Notre travail offre une ouverture vers plusieurs perspectives de recherches, qui se déclinent dans de multiples domaines :

Du côté de l'informatique, nous avons posé de nouvelles bases pour la conception d'agents cognitifs. Bien que nous ayons introduit la notion de « notation » dans l'ontologie, il serait intéressant d'étendre le modèle agent pour prendre en compte cette notion. Cette dernière ouvre la voie à des mécanismes d'apprentissage automatique. Ce type de mécanisme permettant de pousser plus loin l'aspect auto-adaptatif du système. En outre, en plus de prendre en compte le passé (perceptions), l'agent pourrait étendre sa vision au futur (anticipation). L'utilisation de la simulation comme mécanisme d'anticipation [134] pourrait compléter les mécanismes cognitifs de l'agent. Ce n'est là qu'un exemple des nombreuses techniques issues du SMA qui permettrait d'étendre les fonctionnalités du modèle et des systèmes qui s'y appuient. Aussi, relativement aux aspects de sécurités intrinsèques à ce type de système, nous avons employé une implémentation simplement sécurisée par le chiffrement des communications entre les acteurs et de l'accès aux espaces de communications par mot de passe. Il conviendrait de pousser cet aspect pour assurer une sécurisation plus large du système, ce qui est un élément à prendre en compte pour l'adoption de ce dernier. Les techniques liées à la blockchain nous paraissent être des pistes intéressantes pour compléter le modèle de communication qui régit le système.

Du côté de l'analyse sociologique, cette dernière présente un grand intérêt, notamment quand il est question de centrer le système sur l'humain. Lors de cette thèse, nous avons eu l'occasion de collaborer avec un doctorant en gérontologie, sensible aux aspects liés au domaine de l'assistance. Nous avons également eu un regard de la part de chercheurs du laboratoire DOMUS, spécialisés sur ces questions. Il reste également clair que la continuité de l'approche socio-technique que nous avons proposée pourra être approfondie par une équipe pluridisciplinaire, comptant des sociologues, des médecins et tout autre expert des autres domaines liés en plus des informaticiens et experts du domaine de l'assistance.

Bibliographie

- [1] S. Dirks, C. Gurdgiev, et M. Keeling, « Smarter Cities for Smarter Growth: How Cities Can Optimize Their Systems for the Talent-Based Economy », Social Science Research Network, Rochester, NY, SSRN Scholarly Paper ID 2001907, mai 2010. Consulté le: 12 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://papers.ssrn.com/abstract=2001907>
- [2] C. Manville, R. Europe, J. Millard, D. T. Institute, et A. Liebe, « Mapping Smart cities in the EU », p. 200, 2014.
- [3] G. Lévy, « L'accessibilité des transports aux personnes handicapées et à mobilité réduite », p. 132, 2003.
- [4] P. Novais, D. R. Carneiro, Â. Costa, et R. Costa, « A framework for monitoring and assisting seniors with memory disabilities », in *Ambient Assisted Living*, Taylor & Francis, 2015. doi: 10.1201/b18520-17.
- [5] P. Rashidi et A. Mihailidis, « A Survey on Ambient-Assisted Living Tools for Older Adults », *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 17, n° 3, p. 579-590, mai 2013, doi: 10.1109/JBHI.2012.2234129.
- [6] J. Ferber, *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. Harlow: Addison-Wesley, 1999.
- [7] J.-B. Waldner, « Nanocomputers and swarm intelligence », 2008.
- [8] N. M. Garcia et J. J. P. C. Rodrigues, *Ambient Assisted Living*. 2015.
- [9] C. Jaschinski, « Ambient assisted living: towards a model of technology adoption and use among elderly users », in *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, New York, NY, USA, sept. 2014, p. 319-324. doi: 10.1145/2638728.2638838.
- [10] A. El murabet, A. Abtoy, A. Touhafi, et A. Tahiri, « Ambient Assisted living system's models and architectures: A survey of the state of the art », *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 32, n° 1, p. 1-10, janv. 2020, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.04.009.
- [11] W. Shi et S. Dustdar, « The Promise of Edge Computing », *Computer*, vol. 49, n° 5, p. 78-81, mai 2016, doi: 10.1109/MC.2016.145.
- [12] S. Triki, « Système Multi-Agent Ambient pour faciliter l'autonomie et l'accessibilité aux espaces publics des personnes ayant des déficiences cognitives », 2018.
- [13] H. Nakashima, H. Aghajan, et J. C. Augusto, Éd., *Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments*. Boston, MA: Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-0-387-93808-0.
- [14] W. Wu, L. Au, B. Jordan, T. Stathopoulos, M. Batalin, et W. Kaiser, « The SmartCane System: An Assistive Device for Geriatrics », p. 4, 2008.

- [15] S. Fudickar et B. Schnor, « KopAL – A Mobile Orientation System for Dementia Patients », in *Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing*, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 109-118. doi: 10.1007/978-3-642-10263-9_10.
- [16] P. Campillo-Sanchez et J. J. Gómez-Sanz, « Agent Based Simulation for Creating Ambient Assisted Living Solutions », in *Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection*, Cham, 2014, p. 319-322. doi: 10.1007/978-3-319-07551-8_28.
- [17] J. Bohn, V. Coroamă, M. Langheinrich, F. Mattern, et M. Rohs, « Social, Economic, and Ethical Implications of Ambient Intelligence and Ubiquitous Computing », in *Ambient Intelligence*, W. Weber, J. M. Rabaey, et E. Aarts, Éd. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, p. 5-29. doi: 10.1007/3-540-27139-2_2.
- [18] Xiao Hang Wang, Da Qing Zhang, Tao Gu, et Hung Keng Pung, « Ontology based context modeling and reasoning using OWL », in *IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 2004. Proceedings of the Second*, Orlando, FL, USA, 2004, p. 18-22. doi: 10.1109/PERCOMW.2004.1276898.
- [19] R. Fontaine, N. Aky, D. Payet, et R. Courdier, « Vers une utilisation éco responsable des objets connectés par la mutualisation de leurs composants physiques : une approche basée sur le concept d’artefact », 2020, p. 38.
- [20] J.-P. Jamont et M. Occello, « A Multiagent Tool to Simulate Hybrid Real/Virtual Embedded Agent Societies », in *Proceedings of the 2009 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2009, Milan, Italy, 15-18 September 2009*, 2009, p. 501-504. doi: 10.1109/WI-IAT.2009.202.
- [21] G. Ellis, « Chapter 13 - Model Development and Verification », in *Control System Design Guide (Fourth Edition)*, G. Ellis, Éd. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, p. 261-282. doi: 10.1016/B978-0-12-385920-4.00013-8.
- [22] J. Holt-Lunstad, T. Robles, et D. A. Sbarra, « Advancing Social Connection as a Public Health Priority in the United States », *Am Psychol*, vol. 72, n° 6, p. 517-530, sept. 2017, doi: 10.1037/amp0000103.
- [23] A. D’Andrea, F. Ferri, P. Grifoni, A. Abraham, A.-E. Hassanien, et V. Snasel, *Computational Social Network Analysis: Trends, Tools and Research Advances*. Springer London, 2010.
- [24] S. Russell et P. Norvig, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. 2016.
- [25] W. Ertel, *Introduction to Artificial Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-58487-4.
- [26] A. Dorri, S. S. Kanhere, et R. Jurdak, « Multi-Agent Systems: A Survey », *IEEE Access*, vol. 6, p. 28573-28593, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831228.
- [27] F. L. Bellifemine, G. Caire, et D. Greenwood, *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. John Wiley & Sons, 2007.
- [28] E. Hermellin, « Modélisation et implémentation de simulations multi-agents sur architectures massivement parallèles. (Modeling and implementing multi-agents based simulations on massively parallel architectures) », 2016.

- [29] M. B. van Riemsdijk, M. Dastani, et M. Winikoff, « Goals in agent systems: a unifying framework », in *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems - Volume 2*, Estoril, Portugal, mai 2008, p. 713-720.
- [30] D. Kinny et M. Georgeff, « Modelling and design of multi-agent systems », in *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, vol. 1193, J. P. Müller, M. J. Wooldridge, et N. R. Jennings, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, p. 1-20. doi: 10.1007/BFb0013569.
- [31] J. Ferber, O. Gutknecht, et F. Michel, « From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-agent Systems », in *Agent-Oriented Software Engineering IV*, vol. 2935, P. Giorgini, J. P. Müller, et J. Odell, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, p. 214-230. doi: 10.1007/978-3-540-24620-6_15.
- [32] J. Tranier, « Vers une vision intégrale des systèmes multi-agents: Contribution à l'intégration des concepts d'agent, d'environnement, d'organisation et d'institution. », p. 183, 2007.
- [33] E. H. Durfee et J. S. Rosenschein, « Distributed Problem Solving and Multi-Agent Systems: Comparisons and Examples », p. 11, 1994.
- [34] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, et R. M. Murray, « Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, n° 1, p. 215-233, janv. 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.887293.
- [35] J. Ota, « Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems », *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, n° 1, p. 59-70, janv. 2006, doi: 10.1016/j.aei.2005.06.002.
- [36] W. Ren, R. W. Beard, et E. M. Atkins, « A survey of consensus problems in multi-agent coordination », in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, juin 2005, p. 1859-1864 vol. 3. doi: 10.1109/ACC.2005.1470239.
- [37] A. Uhrmacher et D. Weyns, Éd., *Multi-agent systems: simulation and applications*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009.
- [38] N. Minar, R. Burkhart, C. G. Langton, et M. Askenazi, « The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations », p. 12, 1996.
- [39] P. Novais, R. Costa, D. Carneiro, et J. Neves, « Inter-organization cooperation for ambient assisted living », *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 2, n° 2, p. 179-195, janv. 2010, doi: 10.3233/AIS-2010-0059.
- [40] Wan, J., Byrne, C., O'Hare, G. M., & O'Grady, M. J., « OutCare: Supporting Dementia Patients in Outdoor Scenarios », in *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, vol. 6279, R. Setchi, I. Jordanov, R. J. Howlett, et L. C. Jain, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, p. 365-374. doi: 10.1007/978-3-642-15384-6_39.
- [41] M. Weiser, « The Computer for the 21st Century », p. 8, 1991.
- [42] N. Olson, J. M. Nolin, et G. Nelhans, « Semantic web, ubiquitous computing, or internet of things? A macro-analysis of scholarly publications », *Journal of Documentation*, vol. 71, n° 5, p. 884-916, sept. 2015, doi: 10.1108/JD-03-2013-0033.

- [43] K. I.-K. Wang, W. H. Abdulla, et Z. Salcic, « Ambient intelligence platform using multi-agent system and mobile ubiquitous hardware », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, n° 5, p. 558-573, oct. 2009, doi: 10.1016/j.pmcj.2009.06.003.
- [44] C. G. JeanYves DELOT Thierry, SÈDES Florence et TIGLI, *Informatique et intelligence ambiante : des capteurs aux applications (Traité Informatique et Systèmes d'Information, IC2)*. Lavoisier, 2012.
- [45] L. Atzori, A. Iera, et G. Morabito, « The Internet of Things: A survey », *Computer Networks*, vol. 54, n° 15, p. 2787-2805, oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [46] N. Aky, D. Payet, S. Giroux, et R. Courdier, « Ubiquitous Computing and Multi-agent Systems: Clarification of the Lexicon », in *PRIMA 2019: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, Cham, 2019, p. 602-609. doi: 10.1007/978-3-030-33792-6_46.
- [47] Preuveneers, D., Bergh, J. V. D., Wagelaar, D., Georges, A., Rigole, P., Clerckx, T., ... & Bosschere, K. D. « Towards an Extensible Context Ontology for Ambient Intelligence », in *Ambient Intelligence*, vol. 3295, P. Markopoulos, B. Eggen, E. Aarts, et J. L. Crowley, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, p. 148-159. doi: 10.1007/978-3-540-30473-9_15.
- [48] R. J. Brachman et H. J. Levesque, « Knowledge Representation and Reasoning », p. 179, 2003.
- [49] T. R. Gruber, « Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, n° 5, p. 907-928, nov. 1995, doi: 10.1006/ijhc.1995.1081.
- [50] R. Arp, B. Smith, et A. Spear, *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*. 2015.
- [51] N. Komninos, C. Bratsas, C. Kakderi, et P. Tsarchopoulos, « Smart city ontologies: Improving the effectiveness of smart city applications », *Journal of Smart Cities*, vol. 1, n° 1, p. 31-46, mars 2019, doi: 10.18063/JSC.2015.01.001.
- [52] R. Studer, V. R. Benjamins, et D. Fensel, « Knowledge engineering: Principles and methods », *Data & Knowledge Engineering*, vol. 25, n° 1, p. 161-197, mars 1998, doi: 10.1016/S0169-023X(97)00056-6.
- [53] N. Guarino, « Formal Ontology and Information Systems », p. 13, 1998.
- [54] J. Ye, L. Coyle, S. Dobson, et P. Nixon, « Ontology-based models in pervasive computing systems », *The Knowledge Engineering Review*, vol. 22, n° 4, p. 315-347, déc. 2007, doi: 10.1017/S0269888907001208.
- [55] A. ahmed Benyahia, « Etude d'une méthodologie pour la construction d'un système de télésurveillance médicale : application à une plateforme dédiée au maintien et au suivi à domicile de personnes atteintes d'insuffisance cardiaque », 2015. Consulté le: 5 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/66197949/Etude_d_une_m%C3%A9thodologie_pour_la_construction_d_un_syst%C3%A8me_de_t%C3%A9l%C3%A9surveillance_m%C3%A9dicale_application_%C3%A0_une_plateforme_d%C3%A9di%C3%A9e_au_maintien_et_au_suivi_%C3%A0_domicile_de_personnes_atteintes_d_insuffisance_cardiaque
- [56] J. Ladyman, J. Lambert, et K. Wiesner, « What is a Complex System? », p. 39, 2013.

- [57] Gomersall, T., Nygård, L., Mihailidis, A., Sixsmith, A., Hwang, A. S., Hedman, A., & Astell, A., « Network-based approaches for evaluating ambient assisted living (AAL) technologies », *Evaluation*, vol. 23, n° 2, p. 192-208, avr. 2017, doi: 10.1177/1356389017697615.
- [58] L. Garces, A. Ampatzoglou, F. Oquendo, et E. Yumi, « Reference Architectures and Reference Models for Ambient Assisted Living Systems: A Systematic Literature Review », p. 32, 2017.
- [59] ROSETTA. <http://www.aal-europe.eu/projects/rosetta/>. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.aal-europe.eu/projects/rosetta/>
- [60] Meiland, F. J. M., Hattink, B. J. J., Overmars-Marx, T., De Boer, M. E., Jedlitschka, A., Ebben, P. W. G., ... & Dröes, R. M., « Participation of end users in the design of assistive technology for people with mild to severe cognitive problems; the European Rosetta project », *Int. Psychogeriatr.*, vol. 26, n° 5, p. 769-779, mai 2014, doi: 10.1017/S1041610214000088.
- [61] Meiland, F., Reinersmann, A., Bergvall-Kareborn, B., Craig, D., Moelaert, F., Mulvena, M., ... & Dröes, R. M., « COGKNOW: Development of an ICT device to support people with dementia », *The Journal of Information Technology in Healthcare*, vol. 5, n° 5, p. 324-334, 2007.
- [62] T. Kleinberger, A. Jedlitschka, H. Storf, S. Steinbach-Nordmann, et S. Prückner, « Evaluation of ADL detection in the EMERGE project », 2010, Consulté le: 29 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/display/56902298>
- [63] A. Jans, H.S.M. Kort, T. Overmars-Marx, et Joost van Hoof, « Evaluatieonderzoek van het UAS-project van Zorgpalet Baarn-Soest, Zorg aan huis. Eindrapportage », *None (EN)*, 2009, Consulté le: 29 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://surfsharekit.nl/public/2dae1e38-11a1-4d3c-bc18-d4b562a1f37a>
- [64] D. J. Cook, A. S. Crandall, B. L. Thomas, et N. C. Krishnan, « CASAS: À Smart Home in a Box », *Computer*, vol. 46, n° 7, p. 62-69, juill. 2013, doi: 10.1109/MC.2012.328.
- [65] C. Forchul, J. Serrato, A. Rudnick, D. Corring, R. Mann, et B. Frampton, « An Interconnected Smart Technology System for Individuals with Mental Illness Living in the Community and Transitional Hospital Apartments », présenté à International Conference on Smart Homes and Health Telematics, Cham, 2019.
- [66] R. Levinson, « The Planning and Execution Assistant and Trainer (PEAT) », *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, vol. 12, n° 2, p. 85-91, avr. 1997.
- [67] P. Mallet et G. Schoner, « WAD project where attractor dynamics aids wheelchair navigation », in *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, sept. 2002, vol. 2, p. 772-777 vol.2. doi: 10.1109/CCA.2002.1038698.
- [68] R. Grasse, Y. Morère, et A. Pruski, « Assisted Navigation for Persons with Reduced Mobility: Path Recognition Through Particle Filtering (Condensation Algorithm) », *J Intell Robot Syst*, vol. 60, n° 1, p. 19-57, oct. 2010, doi: 10.1007/s10846-010-9406-y.

- [69] A. K. Raj, P. D. Neuhaus, A. M. Moucheboeuf, J. H. Noorden, et D. V. Lecoutre, « Mina: A Sensorimotor Robotic Orthosis for Mobility Assistance », *Journal of Robotics*, vol. 2011, p. e284352, déc. 2011, doi: 10.1155/2011/284352.
- [70] B. Gervais et G. Morin, « Projet Handimap », vol. 219, p. 46-47, 2013.
- [71] M. A. Mostafavi, « MobiliSIG: Development of a Geospatial assistive technology for navigation of people with motor disabilities », présenté à Spatial Knowledge and Information Conference, Alberta, Canada, 2015.
- [72] M. D. N. Sawadogo, F. Hubert, A. Mostafavi, et P. Coayla, « Vers la diffusion d'itinéraires adaptés, adaptables et adaptatifs pour des personnes à mobilité réduite », p. 15.
- [73] A. Mobasheri, J. Deister, et H. Dieterich, « Wheelmap: the wheelchair accessibility crowdsourcing platform », *Open Geospatial Data, Software and Standards*, vol. 2, n° 1, p. 27, nov. 2017, doi: 10.1186/s40965-017-0040-5.
- [74] D. Mack, « WE-MAP: Crowdsourced map based mobile application for the wheelchair accessibility », Haute Ecole de Gestion & Tourisme, 2017. Consulté le: 30 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://doc.rero.ch/record/309501>
- [75] Noury, N., Fleury, A., Rumeau, P., Bourke, A. K., Laignin, G. O., Rialle, V., & Lundy, J. E., « Fall detection - Principles and Methods », in *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Lyon, France, août 2007, p. 1663-1666. doi: 10.1109/IEMBS.2007.4352627.
- [76] M. Mubashir, L. Shao, et L. Seed, « A survey on fall detection: Principles and approaches », *Neurocomputing*, vol. 100, p. 144-152, janv. 2013, doi: 10.1016/j.neucom.2011.09.037.
- [77] E. Castillejo, A. Almeida, D. López-de-Ipiña, et L. Chen, « Modeling Users, Context and Devices for Ambient Assisted Living Environments », *Sensors*, vol. 14, n° 3, Art. n° 3, mars 2014, doi: 10.3390/s140305354.
- [78] Ngankam, H. K., Pigot, H., Parenteau, M., Lussier, M., Aboujaoudé, A., Laliberté, C., ... & Giroux, S., « An IoT architecture of microservices for ambient assisted living environments to promote aging in smart cities », *Cham*, 2019, p. 154-167.
- [79] B. Varghese, N. Wang, S. Barbhuiya, P. Kilpatrick, et D. S. Nikolopoulos, « Challenges and Opportunities in Edge Computing », *arXiv:1609.01967 [cs]*, sept. 2016, Consulté le: 31 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1609.01967>
- [80] Sixsmith, A., Mueller, S., Lull, F., Klein, M., Bierhoff, I., Delaney, S., & Savage, R., « SOPRANO – An Ambient Assisted Living System for Supporting Older People at Home », in *Ambient Assistive Health and Wellness Management in the Heart of the City*, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 233-236. doi: 10.1007/978-3-642-02868-7_30.
- [81] S. Müller, M. Santi, et A. Sixsmith, « Eliciting user requirements for ambient assisted living: Results of the SOPRANO project », p. 8, 2008.
- [82] M. Klein, A. Schmidt, et R. Lauer, « Ontology-Centred Design of an Ambient Middleware for Assisted Living: The Case of SOPRANO », p. 8, 2007.
- [83] P. Wolf et A. Schmidt, « openAAL - the open source middleware for ambient assisted living (AAL) », p. 5, 2010.

- [84] A. Forkan, I. Khalil, et Z. Tari, « CoCaMAAL: A cloud-oriented context-aware middleware in ambient assisted living », *Future Generation Computer Systems*, vol. 35, p. 114-127, juin 2014, doi: 10.1016/j.future.2013.07.009.
- [85] Ferro, E., Girolami, M., Salvi, D., Mayer, C., Gorman, J., Grguric, A., ... & Stockl w, C., « The UniversAAL Platform for AAL (Ambient Assisted Living) », *Journal of Intelligent Systems*, vol. 24, n  3, p. 301-319, ao t 2015, doi: 10.1515/jisys-2014-0127.
- [86] H. Chen, T. Finin, Anupam Joshi, L. Kagal, F. Perich, et Dipanjan Chakraborty, « Intelligent agents meet the semantic Web in smart spaces », *IEEE Internet Comput.*, vol. 8, n  6, p. 69-79, nov. 2004, doi: 10.1109/MIC.2004.66.
- [87] A. B. K. A. Babu et R. Sivakumar, « Development of ontology based middleware for context awareness in ambient intelligence », in *2014 14th International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, Kuwait, Kuwait, d c. 2014, p. 219-224. doi: 10.1109/HIS.2014.7086202.
- [88] D. Ntalasha, R. Li, et Y. Wang, « Internet of Thing Context Awareness Model », *EAI Endorsed Transactions on Context-aware Systems and Applications*, vol. 3, n  7, Art. n  7, f vr. 2016, Consulté le: 4 ao t 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.12-2-2016.151084>
- [89] H. Chen, F. Perich, T. Finin, et A. Joshi, « SOUPA: Standard Ontology for Ubiquitous and Pervasive Applications », p. 10, 2004.
- [90] P. Bellini, M. Benigni, R. Billero, P. Nesi, et N. Rauch, « Km4City ontology building vs data harvesting and cleaning for smart-city services », *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 25, n  6, p. 827-839, d c. 2014, doi: 10.1016/j.jvlc.2014.10.023.
- [91] N. Anand, M. Yang, J. H. R. van Duin, et L. Tavasszy, « GenCLOn: An ontology for city logistics », *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n  15, p. 11944-11960, nov. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.03.068.
- [92] T. G. Stavropoulos, D. Vrakas, D. Vlachava, et N. Bassiliades, « BOnSAI: a smart building ontology for ambient intelligence », in *Proceedings of the 2nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics - WIMS '12*, Craiova, Romania, 2012, p. 1. doi: 10.1145/2254129.2254166.
- [93] Panisson, A. R., Freitas, A., Schmidt, D., Hilgert, L., Meneguzzi, F., Vieira, R., & Bordini, R. H., « Arguing About Task Reallocation Using Ontological Information in Multi-Agent Systems », p. 17, 2015.
- [94] B. Gateau, Y. Naudet, et J. Rykowski, « Ontology-based smart IoT engine for personal comfort management », in *2016 11th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP)*, Thessaloniki, Greece, oct. 2016, p. 35-40. doi: 10.1109/SMAP.2016.7753381.
- [95] N. Aky, S. Giroux, D. Payet, et R. Courdier, « Modèle générique inclusif de système ambiant dédié à l'assistance basée sur le paradigme multi-agent », présenté à JFSMA2021 (  paraître), 2021.

- [96] N. Aky, D. Payet, S. Giroux, et R. Courdier, « Une ontologie pour les systèmes multi-agents ambiants dans les villes intelligentes », présenté à Terminology & Ontology : Theories and applications, Chambéry, France, à paraître.
- [97] M. Prachyabrued, D. L. Ducrest, et C. W. Borst, « Handymap: A Selection Interface for Cluttered VR Environments Using a Tracked Hand-Held Touch Device », in *Advances in Visual Computing*, vol. 6939, G. Bebis, R. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, S. Wang, K. Kyungnam, B. Benes, K. Moreland, C. Borst, S. DiVerdi, C. Yi-Jen, et J. Ming, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 45-54. doi: 10.1007/978-3-642-24031-7_5.
- [98] D. Salvi, J. B. Montalvá Colomer, M. T. Arredondo, B. Prazak-Aram, et C. Mayer, « A framework for evaluating Ambient Assisted Living technologies and the experience of the universAAL project », *AIS*, vol. 7, n° 3, p. 329-352, juin 2015, doi: 10.3233/AIS-150317.
- [99] Y. Zhou, J. Cao, V. Raychoudhury, J. Siebert, et J. Lu, « A Middleware Support for Agent-Based Application Mobility in Pervasive Environments », in *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'07)*, Toronto, ON, Canada, 2007, p. 9-9. doi: 10.1109/ICDCSW.2007.12.
- [100] Fernández-Llatas, C., Mocholí, J. B., Sala, P., Naranjo, J. C., Pileggi, S. F., Guillén, S., & Traver, V., « Ambient assisted living spaces validation by services and devices simulation », in *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, août 2011, p. 1785-1788. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090509.
- [101] H. Ajami, H. Mcheick, et K. Mustapha, « Ubiquitous Healthcare Systems and Medical Rules in COPD Domain », in *How AI Impacts Urban Living and Public Health*, Cham, 2019, p. 97-108. doi: 10.1007/978-3-030-32785-9_9.
- [102] D. Perez, S. Memeti, et S. Pllana, « A Simulation Study of a Smart Living IoT Solution for Remote Elderly Care », p. 6, 2018.
- [103] T. Jung, P. Shah, et M. Weyrich, « Dynamic Co-Simulation of Internet-of-Things-Components using a Multi-Agent-System », *Procedia CIRP*, vol. 72, p. 874-879, janv. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.084.
- [104] T. Jung, N. Jazdi, S. Krauß, C. Köllner, et M. Weyrich, « Hardware-in-the-Loop Simulation for a Dynamic Co-Simulation of Internet-of-Things-Components », *Procedia CIRP*, vol. 93, p. 1334-1339, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.073.
- [105] P. D. O'Brien et R. C. Nicol, « FIPA — towards a standard for software agents », vol. 16, n° 3, p. 9, 1998.
- [106] FIPA, « FIPA ACL Message Structure Specification ». 2002.
- [107] I. Ayala, M. Amor, J.-M. Horcas, et L. Fuentes, « A goal-driven software product line approach for evolving multi-agent systems in the Internet of Things », *Knowledge-Based Systems*, vol. 184, p. 104883, nov. 2019, doi: 10.1016/j.knosys.2019.104883.
- [108] M. Uschold et M. King, « Towards a Methodology for Building Ontologies », p. 15, 1995.
- [109] L. Chen, C. Nugent, et G. Okeyo, « An Ontology-Based Hybrid Approach to Activity Modeling for Smart Homes », *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 44, n° 1, p. 92-105, févr. 2014, doi: 10.1109/THMS.2013.2293714.

- [110] Bonino, D., Alizo, M. T. D., Alapetite, A., Gilbert, T., Axling, M., Udsen, H., ... & Spirito, M., « ALMANAC: Internet of Things for Smart Cities », in *2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud*, Rome, Italy, août 2015, p. 309-316. doi: 10.1109/FiCloud.2015.32.
- [111] E. murabet Amina, A. Anouar, T. Abdellah, et T. Abderahim, « A novel reference model for ambient assisted living systems' architectures », *ACI*, vol. 17, n° 2, p. 210-221, avr. 2021, doi: 10.1016/j.aci.2018.08.005.
- [112] S. Cès, D. Flusin, O. Schmitz, A.-S. Lambert, N. Pauwen, et J. Macq, « Les aidants proches des personnes âgées qui vivent à domicile en Belgique: un rôle essentiel et complexe », *Etude de données*, 2016.
- [113] G. D. Abowd, A. K. Dey, P. J. Brown, N. Davies, M. Smith, et P. Steggles, « Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness », in *Handheld and Ubiquitous Computing*, vol. 1707, H.-W. Gellersen, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, p. 304-307. doi: 10.1007/3-540-48157-5_29.
- [114] N. Baumgartner et W. Retschitzegger, « A SURVEY OF UPPER ONTOLOGIES FOR SITUATION AWARENESS », p. 9, 2006.
- [115] V. Folcher et P. Rabardel, « 15. Hommes, artefacts, activités : perspective instrumentale », in *Ergonomie*, 1r éd., Presses Universitaires de France, 2004, p. 251. doi: 10.3917/puf.falzo.2004.01.0251.
- [116] J. Ye, G. Stevenson, et S. Dobson, « A top-level ontology for smart environments », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, n° 3, p. 359-378, juin 2011, doi: 10.1016/j.pmcj.2011.02.002.
- [117] P. Rabardel, « Les hommes et les technologies; approche cognitive des instruments contemporains », p. 195, 1995.
- [118] Le Page, C., Abrami, G., Barreteau, O., Becu, N., Bommel, P., Bonte, B., & Monteil, C., « Concevoir et développer un modèle informatique », in *La modélisation d'accompagnement : partager des représentations, simuler des dynamiques*, Nantes, 2015, p. 95-112.
- [119] A. Freitas, R. H. Bordini, et R. Vieira, « Model-driven engineering of multi-agent systems based on ontologies », *Applied Ontology*, vol. 12, n° 2, p. 157-188, janv. 2017, doi: 10.3233/AO-170182.
- [120] Demongivert, C., Bouchard, K., Gaboury, S., Bouchard, B., Lussier, M., Parenteau, M., ... & Giroux, S., « A distributable event-oriented architecture for activity recognition in smart homes », *Journal of Reliable Intelligent Environments*, janv. 2021, doi: 10.1007/s40860-020-00125-y.
- [121] L. Braubach, A. Pokahr, D. Moldt, et W. Lamersdorf, « Goal Representation for BDI Agent Systems », in *Programming Multi-Agent Systems*, vol. 3346, R. H. Bordini, M. Dastani, J. Dix, et A. El Fallah Seghrouchni, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 44-65. doi: 10.1007/978-3-540-32260-3_3.

- [122] R. Bordini, A. Seghrouchni, K. Hindriks, B. Logan, et A. Ricci, « Agent programming in the cognitive era », *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 34, oct. 2020, doi: 10.1007/s10458-020-09453-y.
- [123] M. Mrissa, L. Médini, J.-P. Jamont, N. L. Sommer, et J. Laplace, « An Avatar Architecture for the Web of Things », *IEEE Internet Computing*, vol. 19, n° 2, p. 30-38, 2015, doi: 10.1109/MIC.2015.19.
- [124] Médini, L., Mrissa, M., Khalfi, E. M., Terdjimi, M., Le Sommer, N., Capdepuy, P., ... & Touseau, L., « Building a Web of Things with Avatars: A comprehensive approach for concern management in WoT applications », in *Managing the Web of Things: Linking the Real World to the Web*, M. Sheng, Y. Qin, L. Yao, et B. Benatallah, Éd. Morgan Kaufmann, 2017, p. 151-180. doi: 10.1016/B978-0-12-809764-9.00007-X.
- [125] D. Sparrow, K. Kruger, et A. Basson, « Human digital twin for integrating human workers in industry 4.0 », présenté à International Conference on Competitive Manufacturing, 2019.
- [126] Mansour, E., Sambra, A. V., Hawke, S., Zereba, M., Capadisli, S., Ghanem, A., ... & Berners-Lee, T., « A Demonstration of the Solid Platform for Social Web Applications », in *Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web - WWW '16 Companion*, Montréal, Québec, Canada, 2016, p. 223-226. doi: 10.1145/2872518.2890529.
- [127] K. Ndiaye, F. Balbo, J.-P. Jamont, et M. Ocello, « Simulation Coupling Limitations with Respect to Shared Entities Constraints », in *Proceedings of 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, SIMULTECH 2018, Porto, Portugal, July 29-31, 2018*, 2018, p. 338-346. doi: 10.5220/0006859603380346.
- [128] Lussier, M., Couture, M., Moreau, M., Laliberté, C., Giroux, S., Pigot, H., ... & Bier, N., « Integrating an Ambient Assisted Living monitoring system into clinical decision-making in home care: An embedded case-study », 2020.
- [129] N. Aky, T. V. E. Ralitera, D. Payet, et R. Courdier, « SkuadCityModel : Une simulation de déplacements urbains construite sur la plateforme SKUAD », 2018, p. 233-234.
- [130] T. Ralitera et R. Courdier, « Toward Smart Island Simulation Application », mai 2017, p. 457. doi: 10.1007/978-3-319-60285-1_39.
- [131] T. Ralitera, M. Ferard, G. Bustos-Turu, K. H. van Dam, et R. Courdier, « Steps Towards Simulating Smart Cities and Smart Islands with a Shared Generic Framework », in *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, Setubal, PRT, avr. 2017, p. 329-336. doi: 10.5220/0006371203290336.
- [132] R. Baghezza, K. Bouchard, A. Bouzouane, et C. Gouin-Vallerand, « Profile Recognition for Accessibility and Inclusivity in Smart Cities using a Thermal Imaging Sensor in an Embedded System », *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1-1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3127137.

- [133] F. Michel, J. Ferber, P.-A. Laur, et A. Florian, « Programmation situationnelle: programmation visuelle de comportements agents pour non informaticiens », p. 11, 2010.
- [134] T. V. E. Ralitera, « Simulations multi-agent pour les villes intelligentes: une architecture multi-environnement temporelle, spatiale et organisationnelle. Apports pour l'anticipation », 2020.

Annexes

1. Scénario d'expérimentation complet

Mise en contexte

John se déplace en fauteuil roulant et a des troubles cognitifs, l'entraînant à des difficultés à faire face à des situations inhabituelles, complexes ou d'apprentissage.

John est donc assisté par plusieurs agents :

MAC1) Un agent « A » de suivi de l'alimentation : doit vérifier que John se nourrit correctement, et propose à John de cuisiner un repas si l'heure du repas commence et que John n'a rien préparé ;

MAC2) Un agent « B » d'assistance à la préparation des repas : s'il se lance dans la préparation d'un repas, COOK assistera la préparation d'un repas;

MAC3) Un agent « C » d'assistance des déplacements : Si John sort, pour aller dans une épicerie par exemple, cet agent va assister John. D'une part, pour lui proposer un trajet approprié (par exemple en évitant un trottoir si ce dernier est en travaux). D'autre part, il vérifie que John ne tombe pas ou ne se retrouve pas bloquer (c.a.d. permet la demande d'assistance d'urgence). La connaissance des possibles blocages/obstacles pour John se fait de manière communautaire : les gens du réseau d'entraide habitant dans la même ville peuvent signaler des rues pouvant poser un problème.

Présentation du scénario

Aujourd'hui, il est 12h45 et l'agent de suivi de l'alimentation (**MAC1**) constate que John (**Sujet**) ne s'est pas alimenté depuis son réveil. Il est essentiellement resté devant la télévision. L'agent cherche donc à contacter une personne proche (c.a.d. Une personne de son réseau informel), pour le notifier qu'il faudrait que John s'alimente [*ACIC1*]. Édith (**MI1**), la sœur de John, qui a de très bonne relation avec ce dernier est notifiée. Cette dernière appelle John par téléphone filaire pour prendre de ses nouvelles et lui demande ce qu'il a mangé pour le déjeuner [*AIH1*]. Ce dernier répond qu'il n'a pas encore mangé mais qu'il va le faire. Après l'appel avec sa sœur, John se rend dans sa cuisine et démarre COOK (**MAC2**) préparer un repas [*AIH2*]. Il décide de préparer des spaghettis à la bolognaise, mais il lui manque des ingrédients. John décide donc de se rendre à l'épicerie pour en acheter.

Une fois préparé, il sort de chez lui et l'agent d'assistance des déplacements (**MAC3**) lui demande, à partir de son téléphone intelligent, où ce dernier désire-t-il se rendre. L'agent d'assistance des déplacements (**MAC3**) calcule un itinéraire. Il trouve un premier itinéraire qui n'est pas conservé, contenant une rue qui aurait été signalées comme comportant un obstacle. En effet, plus tôt dans la journée, Pierre (**MI2**), le petit-fils de John, habitant dans la ville, a signalé des travaux sur les trottoirs d'une rue sur le trajet de son lycée [*ACIC2*]. Un autre trajet semble sécurisé, et l'agent propose à John de suivre cet itinéraire [*ACIC3*]. John parvient à l'épicerie et y entre. Le trajet indiqué par l'agent (**MAC3**) lui a semblé long, ce qui lui a déplu. Il y récupère les ingrédients dont il a besoin et se dirige vers la vendeuse (**MI3**) pour régler ses achats [*ACIS1*].

Une fois sorti, l'agent d'assistance des déplacements (**MAC3**) demande à John, sur son téléphone, s'il désire rentrer chez lui. John ne souhaite pas recevoir de suggestions d'itinéraires, mais la fonction de surveillance reste active. Ainsi, l'agent (**MAC3**) enregistre les rues parcourues par John. Partie de l'épicerie, John rencontre un obstacle et tombe sur le sol. La chute est détectée par l'agent (**MAC3**), et ce dernier déclenche son processus de recherche d'un aidant. : D'abord, il propose à John d'annuler le processus si ce dernier ne pense pas avoir besoin d'aide. John n'ayant pas annuler la demande, et ayant des difficultés pour se relever, l'agent (**MAC3**) commence par chercher un aidant parmi ses connaissances. Si à proximité, personne n'est trouvé ou ne valide la prise en charge de l'aide, l'agent (**MAC3**) contacte directement les secours. Dans cet exemple, il n'y pas de membre de son réseau informel pouvant l'aider, un pompier (**MF1**) est rapidement envoyé pour aider John et vérifier qu'il n'a aucune séquelle [*ACIC4*]. Le pompier étant venu l'aider, John n'a rien et cet événement a été notifié aux membres de son réseau formel. Toujours assisté par l'agent C (**MAC3**), John reprend son chemin, anxieux de la chute qui lui est arrivée [*ACIC5*].

Malheureusement, à cause de cela, bien qu'il n'en soit pas conscient John se perd et tourne en rond. Cette situation est détectée par l'agent (**MAC3**) car parmi les rues parcourues par John, on retombe sur un cycle de 4 rues déjà parcourues. L'agent (**MAC3**) [*ACIC6*] cherche donc une personne à proximité qui pourrait guider John pour retrouver son chemin. Heureusement, un membre du SEL, Jeff (**MS1**), confirme qu'il peut aider John. Ce dernier propose à John de le raccompagner, et lui fait la conversation sur le chemin du retour [*ACIS2*].

Il rentre chez lui et croise son voisin (**MI4**) (ce qui est notifié dans le système, puisque ce voisin fait partie de son réseau d'aidants), avec qui il discute [*ACIS3*], puis rentre dans son appartement et se prépare un repas avec sa cuisinière (**MA1**) [*ACIS4*].

2. Capture d'écran de Protégé et de l'ontologie OfASCI

