

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

UNE APPROCHE MULTIAGENT DE DÉVELOPPEMENT
D'APPLICATIONS D'INTERNET DES OBJETS

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN INFORMATIQUE COGNITIVE

PAR
PATRICK PIERRE

NOVEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude. Je voudrais remercier dans un premier temps mes directeurs de mémoire, M. Roger Nkambou et Pierre Poirier, pour leurs soutien, leur patience, leur disponibilité et surtout leurs commentaires divers qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je voudrais également remercier ma mère Germaine à qui la Covid n'a pas donné de chance et mon père Wilner Pierre ainsi que mes frères et soeurs Roseline, Fedner, Tamara et Harry qui ont toujours placé leur confiance en ma réussite.

Je ne saurais terminer mes remerciements sans mentionner le courage de "Altagracia Pierre" ma tante, considérée comme ma deuxième maman, ma femme Safira et de mes enfants Thamar et Rebecca Pierre qui m'ont toujours encouragé et soutenu pendant cette longue période.

De plus, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance envers Lorry James Encarnacion, Bruel Gerançon, Bolisca Erns, Rebecca Françoise, Louverture Leblanc pour leurs soutien constant et leurs encouragements, ainsi qu'au Service de l'environnement de la ville de Montréal plus précisément Mme Sonia Melançon et M. Philippe Fortin pour leurs innombrables explications concernant les données brutes de la ville.

À Dieu, de m'avoir donné le courage et la santé.

Patrick Pierre

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
RÉSUMÉ	5
CHAPITRE I	
INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE	8
1.1 Problématiques	11
1.2 Motivation de la recherche	13
1.3 Questions de recherche	14
1.4 Objectifs de la recherche	15
1.5 Méthodologie	16
1.6 Hypothèse	17
1.7 Organisation de la thèse	19
CHAPITRE II	
ÉTAT DE L'ART SUR LES VILLES INTELLIGENTES ET L'INTERNET DES OBJETS (IDO)	20
2.1 Introduction	20
2.2 Les concepts de base et définition de l'IdO	21
2.3 Villes intelligentes : définitions et concepts fondamentaux	23
2.3.1 Définition du point de vue macro	23
2.3.2 Définition du point de vue micro	25
2.4 Approches et logiques d'adoption d'une ville intelligente	27
2.5 Perspectives des villes intelligentes	29
2.6 L'internet des objets (IdO)	29
2.6.1 Composantes de l'internet des objets	30
2.7 Coévolution de la ville intelligente et de l'internet des objets	32

2.7.1	Dimension « sociale » de l'IdO (SIoT)	33
2.8	Enjeux entre ville intelligente et IdO	36
2.9	Projets de villes intelligentes	37
2.10	Projet SmartSantander ville intelligente	39
2.11	Quelques problématiques retrouvées dans l'IdO	43
2.12	Les plateformes IdO	44
2.13	Plateforme OpenIoT	47
2.14	Importance du middleware pour IdO	52
2.15	Déploiement de l'IdO : quelques technologies à considérer	59
2.15.1	Coopération Jumeau numérique et l'IdO	59
2.15.2	Coopération Big Data, Lac de données et l'IdO	61
2.15.3	Coopération Cloud Computing et l'IdO : le duo incontournable	64
2.16	Synthèse	66
CHAPITRE III		
ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES MULTIAGENTS (SMA)		67
3.1	INTRODUCTION	67
3.2	Les systèmes multiagents	68
3.3	Les composantes principales d'un système multiagent	70
3.3.1	Les agents	70
3.3.2	L'environnement	80
3.4	CARACTÉRISTIQUES DES SYSTÈMES MULTIAGENTS	82
3.4.1	Interaction	82
3.4.2	Coopération	84
3.4.3	Collaboration et coordination chez les agents	86
3.4.4	Architecture interne SMA (Homogène/Hétérogène)	86
3.4.5	SMA ouvert/fermé	87
3.5	Organisation globale des agents dans un SMA	87

3.5.1	Organisation hiérarchique	87
3.5.2	Hiérarchie simple	88
3.5.3	Hiérarchie uniforme	88
3.5.4	Organisation des agents holoniques	89
3.5.5	Organisation de coalitions	91
3.5.6	Organisation d'équipes	92
3.6	La communication dans un SMA	95
3.6.1	Rôle de la communication dans un SMA	95
3.6.2	Langage de communication de l'agent	96
3.6.3	Langage KIF	99
3.6.4	Ontologies	100
3.6.5	Framework logiciel adapté à la réalisation des SMA	100
3.7	Les SMA sont-ils des systèmes cognitifs ?	103
3.7.1	Emergence dans les systèmes multiagents	103
3.7.2	Communication dans les systèmes multiagents	105
3.7.3	Sociabilité des agents	106
3.8	Bilan des SMA	108
3.9	Synthèse	111
CHAPITRE IV		
FONDER LES APPLICATIONS DE L'INTERNET DES OBJETS SUR LES SMA : CONCEPTION		112
4.1	INTRODUCTION	112
4.1.1	Dimension communicationnelle dans l'IdO	112
4.1.2	Dimension communicationnelle dans SMA	114
4.1.3	Dimension interactive dans l'IdO	114
4.1.4	Dimension interactive dans SMA	116
4.1.5	Dimensions sociale dans l'IdO	116
4.1.6	Dimension sociale dans SMA	118

4.1.7	SMA et IdO, une collaboration évidente	119
4.1.8	Enjeux de l'émergence dans les SMA et l'IdO	125
4.2	Description de la solution	129
4.3	Choix de simulation de la solution MISMA-IdO	130
4.4	Architectures exécutable du module qualité d'air	131
4.5	Conteneur principal	132
4.6	Conteneur d'agent d'interface	134
4.7	Conteneur d'agent de recherche	134
4.8	Conteneur d'agent d'adresse	135
4.9	Conteneur d'agent des polluants	135
4.10	Conteneur d'agent de calculs	135
4.11	Application de la méthodologie PASSI au développement de la solution	136
4.11.1	Les différentes phases du modèle PASSI	136
4.12	Première phase de la méthodologie de PASSI	138
4.12.1	Description détaillée de cas d'utilisations	139
4.12.2	Identification des agents.	141
4.12.3	Identification des rôles	145
4.13	Diagramme de séquences du système	145
4.13.1	Spécification des tâches	147
4.14	Phase II de la méthodologie de PASSI	149
4.14.1	Ontologie du domaine	149
4.14.2	Ontologie de communication	152
4.15	Phase III de la méthodologie PASSI	153
4.15.1	Description des rôles des agents	154
4.15.2	Phase de définition de la structure des agents	155
4.15.3	Définition de la structure interne de l'agent	156
4.16	Quatrième phase de la méthodologie PASSI	157

4.16.1	Codes sources de l'agent de recherche dans la solution proposée	158
4.17	Synthèse	162
CHAPITRE V		
PRÉSENTATION ET STRATÉGIE DE VALIDATION DU MODULE		
IQA		164
5.1	Introduction	164
5.1.1	Environnement considéré	164
5.1.2	Présentation des polluants et motivation du choix de développement du module IQA	165
5.1.3	Méthode de calcul de l'indice et sous-indice de la qualité de l'air	167
5.1.4	Structuration des données	170
5.1.5	Choix technologiques	171
5.1.6	Configurations matérielles	172
5.1.7	Présentation du module IQA	173
5.2	Interaction chez les agents du prototype IQA	178
5.3	Objectifs et stratégie de validation	179
5.4	La conduite des expérimentations	181
5.4.1	Méthodologie	181
5.4.2	Communication avec le middleware	182
5.5	Synthèse	185
CHAPITRE VI		
VÉRIFICATION ET VALIDATION DU MODULE IQA		
6.1	Simulation de la solution via l'outil Postman, scénario (1)	187
6.2	Simulation de l'usage de la solution MISMA-IdO (module IQA) par l'application AppAir.	192
6.3	Discussion des résultats	197
6.3.1	Analyse des résultats avec l'outil « Postman »	197
6.3.2	Analyse des résultats avec « l'application AppAir »	199
6.4	Synthèse des résultats et discussions	202

6.4.1	L'efficacité	202
6.4.2	L'efficience	206
6.5	Synthèse	208
CHAPITRE VII		
	CONCLUSION	209
7.1	Contributions	214
7.1.1	Réponses aux questions de recherche	214
7.1.2	Dimension cognitive de la thèse	221
7.1.3	Analyse du module IQA	224
7.2	Opportunités de la recherche	225
7.3	Les limites de la recherche	225
7.4	Perspectives	227
ANNEXE A		
	LISTE DES BORNES DE STATIONS	229
ANNEXE B		
	LISTE DES POLLUANTS ET VALEURS DE LA STATION ID 3	230
ANNEXE C		
	COMMUNICATIONS ET RÉCUPÉRATIONS DES DONNÉES AVEC LA VILLE DE MONTRÉAL	231
ANNEXE D		
	RÉSULTATS DES CAS DE TESTS DU SCÉNARIO APPLICATION TIERCE	233
ANNEXE E		
	RÉSULTATS DES CAS DE TESTS DU SCÉNARIO APPLICATION TIERCE RIVIÈRE- DES-PRAIRIES	235
ANNEXE F		
	DAVANTAGE DE SIMULATIONS POUR MIEUX VALIDER LE MO- DULE IQA	237
	RÉFÉRENCES	241

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Fonctionalités des middleware(Bandyopadhyay <i>et al.</i> , 2011). . . .	55
2.2 interface des middleware(Bandyopadhyay <i>et al.</i> , 2011).	55
2.3 Défis dans les middleware(Chaqfeh et Mohamed, 2012).	58
3.1 message KQML	99
4.1 Rôles des modules de base du framework Jade	133
4.2 Grille de conception adaptée de la grille d'analyse de Ferber . . .	143
5.1 Valeur de l'indice	168
5.2 conversion des facteurs	169
5.3 valeurs de référence	169
5.4 Table des données des polluants	170
5.5 Choix technologiques	171
6.1 Scénario1-Test1 entre 5h et 13h, Sainte-Anne-de-Bellevue	189
6.2 Scénario1-Test1 entre 14h et 23h, Sainte-Anne-de-Bellevue	189
6.3 Scénario1-Test2, entre 4h et 9h, Rosemont-La-Petite-Patrie	191
6.4 Scénario1-Test2, entre 14h et 23h, Rosemont-La-Petite-Patrie . . .	191
6.5 Comparaison des résultats	198
6.6 Comparaison des résultats	199
6.7 Comparaison des résultats test1, scenario 2	200
6.8 Comparaison des résultats, test2, scénario 2	201
6.9 Sous-indice et l'indice IQA	204

6.10	Sous-indice et l'indice IQA	205
7.1	Comparaison résultats IQA (MISMA-IdO et ville Montréal) . . .	211
7.2	Sous-indices IQA Rosemont-La-Petite-Patrie journée du 20-02-20 .	212
7.3	Sous-indices IQA Sainte-Anne-de-Bellevue journée 21-01-20	213
7.4	Caractéristiques ou dimensions communes SMA et IdO	215
A.1	Liste des bornes de stations	229
B.1	Liste des polluants de la station id 3	230

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Données et applications IdO dans une ville, source (Sameh Ben Fredj et Yoann Benoit, 2016)	9
1.2 Surcharge des applications dans IoT (comtech, 2017).	11
1.3 Modèle PASSI	17
2.1 synthèse des approches (CÉSTQ, 2017)	28
2.2 Données non traitées scénario trafic ville Dublin (Lécué et al., 2014).	38
2.3 Architecture 3 niveaux de SmartSantander (Sanchez et al., 2011).	40
2.4 Vue dedéploiement centre-ville SmartSantander (Sanchez et al., 2011).	41
2.5 Solution d'alimentation hybride pour les capteurs (Sanchez et al., 2011).	42
2.6 Composition d'une plateforme d'IdO (Fan et Chen, 2010).	44
2.7 Architecture de la plateforme issue approche SOA (Fan et Chen, 2010).	45
2.8 Processus de fusionnement de données (Kos <i>et al.</i> , 2012).	46
2.9 Plateforme d'IdO (Kos <i>et al.</i> , 2012).	47
2.10 Description capteurs plateforme d'OpenIoT (Soldatos <i>et al.</i> , 2015).	48
2.11 Présentation architecture OpenIoT (Soldatos <i>et al.</i> , 2015).	51
2.12 Architecture SMAIDoc (Boussaid <i>et al.</i> , 2003).	52
2.13 Composants fonctionnels de l'IdO (Bandyopadhyay <i>et al.</i> , 2011).	53
2.14 Vue en couches architecture middleware IdO (Bandyopadhyay <i>et al.</i> , 2011).	54

2.15	Middleware sémantique pour IdO (Katasonov <i>et al.</i> , 2008).	57
3.1	Représentation imagée d'un système multiagents (Ferber, 1995).	69
3.2	Types de mémoires de l'architecture ACT-R (Anderson <i>et al.</i> , 2004).	74
3.3	Cycle cognitif simplifié de CTS (Grouls, 2013).	77
3.4	Architecture BDI d'un agent (Taillandier <i>et al.</i> , 2012).	78
3.5	Agent peut être adapté et agi aux différentes applications IdO	79
3.6	Table des philosophes Dijkstra (Olsson et Keen, 2004).	82
3.7	Pétri table des philosophes (Besharati et Khameneh, 2021).	83
3.8	Exemple de coopération d'agents de Ferber (Ferber, 1995).	85
3.9	Architecture hiérarchique des agents (Balaji et Srinivasan, 2010a).	88
3.10	Architecture système SOHTCO forme honolique (Adam <i>et al.</i> , 2002b).	91
3.11	Architecture système de coalition (Balaji et Srinivasan, 2010a).	92
3.12	Architecture avec vue partielle des équipes (Balaji et Srinivasan, 2010a).	93
3.13	Interaction directe (Balaji et Srinivasan, 2010a).	96
3.14	Interaction indirecte (Balaji et Srinivasan, 2010a).	96
3.15	Architecture de la solution HDS (Poggi, 2010).	102
3.16	Contenu message, base des actes de communication ACL (Poggi, 2010).	103
3.17	Spécification de l'espace social (Galland <i>et al.</i> , 2014).	107
4.1	Positionnement MISMA-IdO par rapport aux autres systèmes	130
4.2	Architecture exécutable	132
4.3	Diagramme de cas d'utilisation module IQA	139
4.4	Fonctionnement et interaction des agents du module IQA	144

4.5	Diagramme de séquence module qualité d'air du système MISMA-IdO	146
4.6	Diagramme d'activité de l'agent recherche (SearchAgent)	148
4.7	Diagramme d'ontologie du domaine du module IQA	151
4.8	Diagramme d'ontologie de communication du module IQA	153
4.9	Diagramme de description des rôles du module IQA	155
4.10	Structure du module IQA	156
4.11	Structure interne de l'agent	157
4.12	SearchAgent	160
4.13	SearchAgent enregistrement au DF	161
4.14	SearchContainer	162
5.1	Configurations matérielles	172
5.2	Message ACL de l'agent d'interface à l'agent de recherche	174
5.3	Message ACL de l'agent de recherche à l'agent DF	174
5.4	Message ACL de l'agent de recherche à l'agent d'interface	175
5.5	Message ACL de l'agent de recherche à l'agent qualité d'air	176
5.6	Message ACL de l'agent de recherche à l'agent qualité d'air	177
5.7	Message ACL d'envoi d'indice	177
5.8	Interactions entre les agents	179
5.9	Structure de l'API	184
6.1	Scénario1-Test1 résultat IQA Sainte-Anne-de-Bellevue	188
6.2	Scénario1-Test2, Rosemont-La-Petite-Patrie	190
6.3	Interface de l'application AppAir	192
6.4	Scénario2-Test1, affichage de résultat IQA, Sainte-Anne-de-Bellevuee	193
6.5	Scénario2-Test1, entre 5h et 9h, Sainte-Anne-de-Bellevuee	194

6.6	Scénario2-Test2, Rivières-des-Prairies	195
6.7	Scénario2-Test2, entre 15h et 19h, Rivières-des-Prairies	196
6.8	Temps de réponse Module IQA	207
6.9	Temps de réponse ville de Montréal	207
C.1	Communication 1 avec la ville de Montréal	231
C.2	Communication 2 avec la ville de Montréal	232
D.1	Résultats cas de test Saint-Anne-de-Bellevue	233
D.2	Résultats cas de test Saint-Anne-de-Bellevue	234
E.1	Résultats cas de test Rivières-Des-Prairies	235
E.2	Résultats cas de test Rivières-Des-Prairies	236
F.1	Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 10-02-2020	237
F.2	Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 15-02-2020	238
F.3	Sainte-Anne-de-Bellevue pour la journée du 30-01-2020	239
F.4	Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 15-02-2020	240

ACRONYMES

ACPV	Agent-centred point of view
ACL	Agent Communication Language
ACPV	Agent-centred point of view
ACK	Acknowledgement (accusé de réception)
ACL	(Agent Communication Language)
ACT-R	Adaptive Control of Thought—Rational
ACC	Agent Communication System
API	Application Programming Interface
ACK	acknowledgement
AMS	Agent Management System
BI	Business Intelligence
CFP	Call for Proposal
CO	Monoxyde de carbone
CÉSTQ	Commission de l'éthique en science et en technologie du Québec
DF	Directory Facilitator
DT	Digital Twin
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FTP	File Transfer Protocol
IdO	Internet des Objets

IQA	Indice Qualité de l'air
IoA	Internet of Agents
IoT	Internet of Things
JADE	Java Agent Development Framework
JSON	JavaScript Object Notation
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
MISMA-IdO	Middleware via SMA pour des applications de l'IdO.
MQTT	Queuing Telemetry Transport
OAA	Open Agent Architecture
OCL	Object Constraint Language
O3	Ozone
M2M	Machine to Machine
MTS	Message Transport Service
NO2	Dioxyde d'azote
OCPV	Organisation centred point of view
PASSI	Process for Agent Societies (Process for Agen
PDG	Président du Conseil d'administration
PPB	Partie par milliard
PLM	Product Lifecycle Management
PM	(Particulate matter) Particules respirables
SARL	Langage de programmation modulaire orienté agent.
SOA	Service-oriented architecture
SO2	Dioxyde de soufre
SIoT	Social Internet of Things

SMA	Système Multi-Agents
TESLA	Timed Efficient Streaming Loss-tolerant
g/m ³	Microgramme/mètre cube

RÉSUMÉ

L'Internet des objets (IdO) ou internet of things (IoT) en anglais est un paradigme prometteur qui permet l'intégration de plusieurs technologies et solutions de communication. Selon la littérature consultée, Internet des objets (IdO) représente la prochaine évolution d'Internet et permet d'améliorer considérablement la capacité de rassembler, d'analyser et de restituer des données (Evans, 2011). Déjà, des services hétérogènes et distribués sont mis en place par les entreprises qui vont utiliser différents types d'applications, tous les domaines confondus. Cependant, l'IdO soulève de nombreux défis liés au nombre élevé d'objets à prendre en considération, à sa grande dynamique, ainsi qu'à la grande hétérogénéité des données et des systèmes de communications impliqués. Liu et al., nous parlent de l'existence de normes unifiées pour intégrer, stocker et traiter les données collecter à partir de différentes sources. (Liu *et al.*, 2015). Selon Gardner, les dépenses à venir dans l'IdO se trouvent au niveau de l'intégration et de l'interopérabilité des solutions applicatives, (Gartner, 2017). De ce fait, il est crucial de mettre en place de nouveaux systèmes et techniques afin de développer des applications capables de répondre aux exigences technologiques que confronte l'IdO. L'interopérabilité entre ces applications restent l'une des problématiques les plus pertinentes de l'IdO, qui nécessite d'être traitée en détail, (Miorandi *et al.*, 2012).

À cette fin, nous défendons la thèse suivante : étant donné l'énorme volume de données produites en continu par les capteurs (mesures et événements), la nature dynamique et hétérogène de ces données, nous pensons qu'une solution basée sur la technologie des systèmes multi-agents pourrait aider à résoudre les problématiques d'interopérabilité et de communication entre les applications d'Internet des objets.

Dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons présenté les problématiques autour de l'interopérabilité des applications. Par la suite, nous avons effectué une revue de littérature sur les technologies et les travaux réalisés dans différents domaines de l'IdO et du SMA, pour ensuite, présenter notre solution à travers la méthodologie PASSI. Notre contribution se résume dans la conception, le développement et la simulation d'un cadre logiciel qui permet de pallier aux problématiques d'interopérabilité et de communication au niveau des applications d'IdO dans une ville intelligente.

Mots clés : Internet des objets, Réseau de capteurs et d'actionneurs, Framework de développement d'application IdO, Middleware, Système SMA.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) or Internet of Things (IoT) in English is a promising paradigm that allows the integration of several technologies and communication solutions. According to the literature consulted, the Internet of Things (IoT) represents the next evolution of the Internet and significantly improves the ability to collect, analyze and return data (Evans, 2011). Already, heterogeneous and distributed services are being set up by companies that will use different types of applications in all fields. However, IoT raises many challenges related to the high number of objects to consider, its great dynamicity, as well as the great heterogeneity of the data and communications systems involved. Liu et al., Tell us about the existence of a unified standard to integrate, store and process data collected from different sources. (Liu et al., 2015). According to Gardner, the next expense in IoT is in the integration and interoperability of application solutions, (Gartner, 2017). Therefore, it is crucial to put in place new systems and techniques in order to develop applications capable of meeting the technological requirements of IoT. Interoperability between these applications remains one of the most relevant IoT issues, which needs to be addressed in detail (Miorandiet al., 2012).

To this end, we defend the following thesis : given the enormous volume of data continuously produced by the sensors (measurements and events), the dynamic and heterogeneous nature of these data, we believe that a solution based on the technology of multi-systems agents could help solve interoperability and communication issues between Internet of Things applications.

As part of this research project, we presented the issues around the interoperability of applications, then we carried out a literature review on the technologies and the work carried out in different fields of IoT and ADM. , and then presented our solution through the PASSI methodology. Our contribution is summed up in the design, development and simulation of a software framework that overcomes interoperability and communication issues at the level of IoT applications in a smart city.

Keywords : Internet of things, Sensor and actuator network, IoT application development framework, Middleware, SMA system.

CHAPITRE I

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

La concurrence au niveau des entreprises et l'innovation en matière technologique ont favorisé le développement des objets connectés et communicants. Cette évolution a engendré le développement de nouvelles applications et de nouveaux services à travers l'internet. Au cours des dernières années, ce qu'on appelle l'Internet des objets (IdO) a évolué à une vitesse exponentielle, permettant la connexion d'un nombre considérable d'objets hétérogènes (capteurs, actionneurs, smartphones, applications, etc.). Ainsi, (Gartner, 2017) avait déjà estimé le nombre d'objets connectés à l'IdO en 2020 à 25 milliards. Quant aux applications de l'IdO, elles sont diverses. On les rencontre dans le transport, la logistique, la santé, les environnements intelligents, la vie sociale, la domotique, les villes intelligentes, etc. La figure 1.1 montre comment les entités intelligentes peuvent être interconnectées, elle nous donne une vue globale globale sur l'ensemble des domaines qui pourraient être affectés lors d'un déploiement de l'IdO dans une ville.¹.

1. <https://blog.engineering.publicissapient.fr/2016/12/14/data-science-internet-of-things/>



Figure 1.1 Données et applications IdO dans une ville, source (Sameh Ben Fredj et Yoann Benoit, 2016)

Cependant, comme nous l'expliquerons à la prochaine section, une utilisation efficace des objets via l'Internet est largement tributaire de l'intégration, de l'interopérabilité et de l'interprétation des données qui circule à travers les objets, ce qui pose un problème particulier étant donné le nombre et la variété des objets connectés à l'IdO. Le web sémantique apparaît une technologie prometteuse pour servir de socle à l'implémentation des solutions d'internet des objets. Un des apports du web sémantique à l'IdO se situe au niveau de la transformation des données collectées par les objets (Seydoux *et al.*, 2015). Cependant, on peut se demander si le web sémantique suffira à la tâche étant donné la complexité de l'intégration, de l'interopérabilité et de l'interprétation des données en ce qui concerne l'IdO et si une autre technologie ne pourrait pas elle aussi contribuer à la solution de ce problème. Nous croyons que les systèmes multiagent (SMA) pourraient s'avérer être une telle solution et c'est ce que nous étudierons dans cette thèse. Les SMA constituent en effet aujourd'hui une des solutions les plus

utilisées pour résoudre les problèmes complexes et distribués (comme l'intégration de données, la communication) en proposant des outils essentiels qui pourraient permettre de réduire la complexité du problème. Ainsi, en distribuant les compétences entre des agents, on peut résoudre de manière coopérative une tâche donnée (Ferber, 1995).

Actuellement, les SMA sont appliqués à une grande échelle d'applications diverses, l'approche objet et agent apporte certains avantages comme la facilitation de considérer un agent comme un objet actif ayant un état mental, un objectif et une autonomie. Déjà, plusieurs modèles orientés objets comme les modèles dynamiques et fonctionnels sont utilisés pour décrire le comportement d'un système multiagent. Selon Ferber, « les SMA ont un rôle essentiel à jouer en s'inscrivant comme les possibles successeurs des systèmes à objets, en ajoutant à la localité des comportements l'autonomie et la répartition des prises de décision. On peut ainsi déjà parier que le génie logiciel de demain sera "orienté agent", comme celui d'aujourd'hui commence à être "orienté objet" » (Ferber, 1995). Les travaux de Ferber ont déjà favorisé l'existence de plusieurs plateformes de développement de systèmes multiagents comme, par exemple, Jade, Madkit, Netlogo, Gama pour n'en citer que quelques-unes.

Nos travaux de recherche se placent donc dans le contexte de l'Intelligence Artificielle Distribuée. Nous y proposons plus spécifiquement le développement des SMA comme un outil capable de faciliter l'interopérabilité et la communication des applications IdO. Les systèmes SMA sont par nature un modèle distribué qui permet de connecter et de résoudre un certain nombre de problèmes autonomes et distribués. Le SMA se base sur différents types d'agents qui peuvent communiquer entre eux dans un environnement local ou distant. Or, dans le domaine de l'IdO, les objets sont en général autonomes et distribués. Ainsi, la construction des applications d'IdO à partir des mécanismes multiagent est presque naturelle.

1.1 Problématiques

L'IdO est aujourd'hui déjà bien présent dans notre vie quotidienne. En effet, l'IdO permet de fournir aux entreprises des informations et ceci en temps réel sur son environnement. Ces informations peuvent être de natures variées comme : de l'information sur des clients d'une entreprise, des produits vendus, des machines etc., cependant, l'IdO fait face à un nombre croissant de problématiques comme la convergence des standards, la qualité des services, la sécurité, l'intégration des données, la représentation et l'interopérabilité des données, etc. (Saleh, 2017) et (Khalil *et al.*, 2020). L'enjeu principal réside dans la captation, l'intégration des données et l'interopérabilité au niveau des différentes applications d'IdO (Miorandi *et al.*, 2012). « L'Internet des Objets est avant tout l'échange de flux de données » (Olivie-Paul, 2015). En effet, réaliser la connexion des objets tout en assurant la communication entre eux exige la construction d'applications. Arriver à faire communiquer l'ensemble de ces applications reste une problématique majeure pour l'IdO. La figure 1.2 montre quelques applications possibles qui pourraient cohabiter en interconnexion dans un IdO.

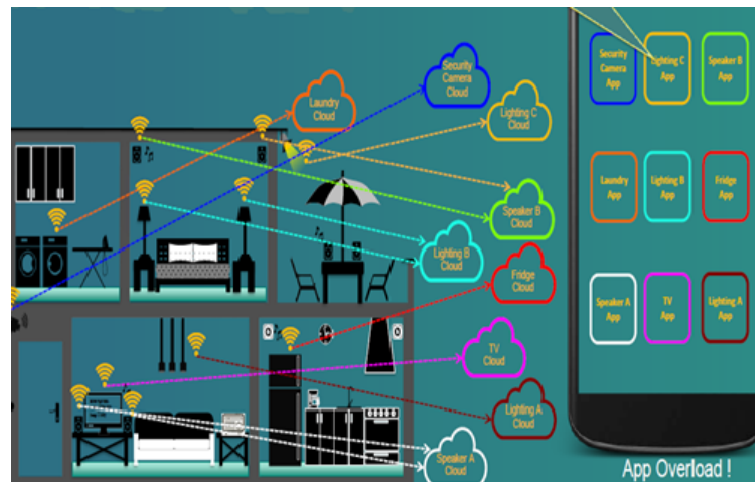


Figure 1.2 Surcharge des applications dans IoT (comtech, 2017).

Selon Oliivié-Paul, directrice associée de l'entreprise Markess, près de 40% des problèmes majeurs que rencontrent les entreprises dans la mise en œuvre de leur projet d'IdO émanent de question d'interopérabilité au niveau des différentes applications (Oliivié-Paul, 2015). Le déploiement de l'IdO permet d'envisager des applications dans divers domaines : ville intelligente, agriculture, domotique, usine intelligente, télésanté, etc. La communication entre les applications tend à poser des problèmes d'interopérabilité entre les différentes solutions, dites verticales, développées dans une approche orientée silos. Selon Gyrard, les problématiques d'interopérabilité se posent à deux niveaux : l'interopérabilité architecturale et l'interopérabilité sémantique (Gyrard *et al.*, 2015a).

Gardner, dans sa revue du guide de marché pour les solutions IdO, nous dit qu'en 2018 la moitié des dépenses en implémentations des solutions proposées sont réalisées au niveau de l'intégration et de l'interopérabilité des solutions IdO et sans l'intégration il n'y pas d'internet des objets. Ainsi, l'intégration est désignée comme étant la clé du succès de projets IdO. Les développeurs de projets parlent de l'intégration comme un défi technique majeur. Pour assurer le succès du déploiement des projets, les responsables des applications doivent comprendre que les capacités d'intégration d'internet des objets varient considérablement et que l'absence de normes ou de standards pour faciliter l'échange de différents domaines est un problème crucial pour le développement de l'IdO (Miorandi *et al.*, 2012), (Hung, 2017) et (Gartner, 2017). En effet, l'un des principaux concepts sous-jacents de l'internet des objets depuis sa naissance est d'arriver à la communication machine à machine (Machine-to-Machine en anglais, abrégé M2M). Le M2M² a souffert d'une fragmentation verticale des approches adoptées pour

2. Standard de plate-forme qui permet de collecter des données et de piloter des objets variés de manière transparente développée en 2012 par (ETSI) la première implémentation a été fournie par le LAAS (laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes).

couvrir les besoins des différents domaines d'application.

L'intégration des données de l'IdO se situe à deux niveaux qui sont respectivement le niveau de connexion et le niveau d'application. Le niveau de connexion montre comment parvenir à connecter les différentes technologies à partir des standards de connections déjà établies (MQTT³, FTP⁴, etc.). Par contre, le niveau des applications permet d'assurer une bonne interopérabilité entre les applications d'IoT du marché. Parmi les problématiques de communication des données que connaît l'IdO, celle qui nous intéresse dans le cadre de notre travail est celle de la communication des données au niveau des applications de différents domaines de l'IdO. C'est-à-dire, assurer une bonne interopérabilité des applications d'IdO par rapport aux applications issues de différents domaines, la figure 1.2 montre l'exemple d'un ensemble d'applications disponibles dans le cas d'une solution de maison intelligente.

Pour mieux aborder la problématique d'interopérabilité entre les applications IdO aux autres solutions applicatives dites verticales, nous allons nous appuyer sur la littérature de l'IdO et des domaines connexes pour retracer l'ensemble des travaux déjà réalisés dans le domaine, ce qui nous permettrait de proposer une piste de solution liée à la problématique d'interopérabilité des solutions IdO aux applications de différents domaines.

1.2 Motivation de la recherche

Les systèmes SMA se retrouvent généralement dans des applications complexes nécessitant l'interaction entre plusieurs entités homogènes ou hétérogènes. L'un

3. Protocole de messagerie léger qui facilite la transmission des données pour clients avec ressources sont limitées.

4. Protocole de communication destiné au partage de fichiers sur un réseau TCP/IP

des principaux facteurs habilitants de l'IdO est l'intégration de plusieurs technologies de l'information et de la communication dans un écosystème où des éléments peuvent automatiquement communiquer aux systèmes informatiques, aux personnes et entre eux en fournissant des services intelligents au profit de l'humanité. D'un autre côté, l'IdO représente un énorme défi d'interopérabilité, car les appareils hétérogènes devraient pouvoir collaborer entre eux dans la communication et l'échange d'informations, (Chaqfeh et Mohamed, 2012).

La motivation de cette recherche résulte du fait que l'IdO intègre plusieurs technologies différentes. De ce fait, nous pensons qu'un middleware pour l'IdO avec les mécanismes des SMA est la technologie logicielle de base qui peut favoriser la communication, l'intégration et le développement d'applications hétérogènes. Selon Amaral et al., le middleware est considéré comme une technologie habilitante qui facilite le développement d'applications distribuées, (Amaral *et al.*, 2016). Bandyopadhyay et al., nous disent que le middleware a évolué de la dissimulation des détails du réseau des applications vers des systèmes plus sophistiqués pour gérer de nombreuses exigences importantes fournissant un support pour la distribution, l'hétérogénéité, la mobilité, l'interopérabilité et la gestion des données, pour n'en nommer que quelques-uns, (Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

1.3 Questions de recherche

Les données qui sont récoltées et échangées dans l'IdO entre les divers objets (capteurs, actionneurs, serveurs, etc.) proviennent de sources disparates et sont fortement hétérogènes, elles représentent une masse de plus en plus volumineuse. Donc, une exploitation intelligente de ces données va représenter un atout concurrentiel au sein des entreprises. Les Systèmes multiagents ou SMA proposent une approche originale de conception de systèmes intelligents et coopératifs. Ils se caractérisent par la présence d'agents autonomes évoluant dans un environnement

partagé et dynamique. De plus, il existe plusieurs interdépendances entre les buts des agents, leurs capacités et les ressources qu'ils utilisent. Ainsi, d'éviter d'éventuels conflits, de favoriser la synergie des activités des agents et de partager les ressources de l'environnement commun. Reconnaisant les limites des solutions IdO aux problèmes des données et en considérant que l'IdO se trouve toujours à son stade d'expansion, ceci nous amène à soulever les deux questions de recherche suivantes :

- Est-ce qu'on pourrait utiliser les SMA pour solutionner les problèmes complexes d'interopérabilité au niveau des applications d'IdO ?
- Pourquoi est-il important de faire appel aux mécanismes SMA pour soutenir l'IdO ?

Suite à notre revue de littérature, nous allons tenter de répondre à ces questionnements, pour ensuite présenter une solution possible à la problématique d'interopérabilité des applications.

1.4 Objectifs de la recherche

Nous savons que les problématiques d'interopérabilité entre les applications de l'IdO sont importantes et peuvent nuire à l'émancipation et à l'utilisation de ce nouveau paradigme. De ce fait, nous allons :

- réaliser un outil via les mécanismes des SMA qui va agir comme middleware au niveau de la couche applicative de différents domaines de l'IdO ;
- étudier les multiples avantages que la technologie SMA peut apporter au développement d'application d'internet des objets.

Les SMA ont montré leur pertinence pour la conception d'applications distribuées. La modélisation à base d'agents (entité virtuelle) permet le développement d'ap-

plications informatiques ouvertes, adaptatives et évolutives. Elle offre des solutions originales pour la simulation de phénomènes complexes, la résolution décentralisée et collective de problèmes et l'intégration de composants hétérogènes, (JFSMA, 2017).

En effet, pour favoriser le développement d'applications dynamiques, répondre aux besoins d'applications inter domaines de gestion des données pour échanger et analyser les données et l'interopérabilité entre les applications IdO, les SMA présentent les valeurs nécessaires au développement d'applications dédiées à l'IdO (Miorandi et al., 2012).

1.5 Méthodologie

Malgré les succès du paradigme orienté-objet, les méthodes proposées pour le développement logiciel ne sont pas assez évoluées pour caractériser certains aspects spécifiques aux agents, comme : la représentation de leur état mental, le type des messages, le protocole de négociation, la dimension sociale, etc. Dès lors, il est devenu impératif de s'investir dans les méthodologies orientées-agent et autres techniques de modélisations adéquates. Selon Shehory et Sturm, une méthodologie est un ensemble d'étapes qui couvre le cycle de vie du développement d'un logiciel, elle couvre des aspects techniques et de gestion de projet. L'auteur indique qu'une méthode est vue comme « un ensemble de processus qui permet de générer divers modèles qui décrivent différents aspects d'un logiciel en cours de développement en utilisant une certaine notation bien définie » (Shehory et Sturm, 2001).

Il existe beaucoup de méthodologies, d'outils d'analyse et de conception des systèmes multi-agents tels que : Aalaadin, GAIA, MaSE, PASSI, Agent-Oriented Analysis and Design (AOAD), etc. Chaque approche prend en compte un certain aspect de conception et de développement du système. La plupart de ces outils sont inspirés, soit des méthodes orientées-objet, soit d'une extension des méthodes

à base de connaissance.

Parmi ces méthodologies, nous nous sommes appuyés sur les étapes de la méthodologie PASSI afin de développer notre solution SMA. Nous avons fait ce choix à cause de diverses similitudes que comportent la méthodologie PASSI par rapport à celles déjà rencontrées dans certaines méthodologies de développement d'applications orientées objets. La figure 1.3 de Cossentino donne une vue globale et détaillée des différentes phases de développement logiciel SMA selon la méthodologie PASSI. (Cossentino, 2012)

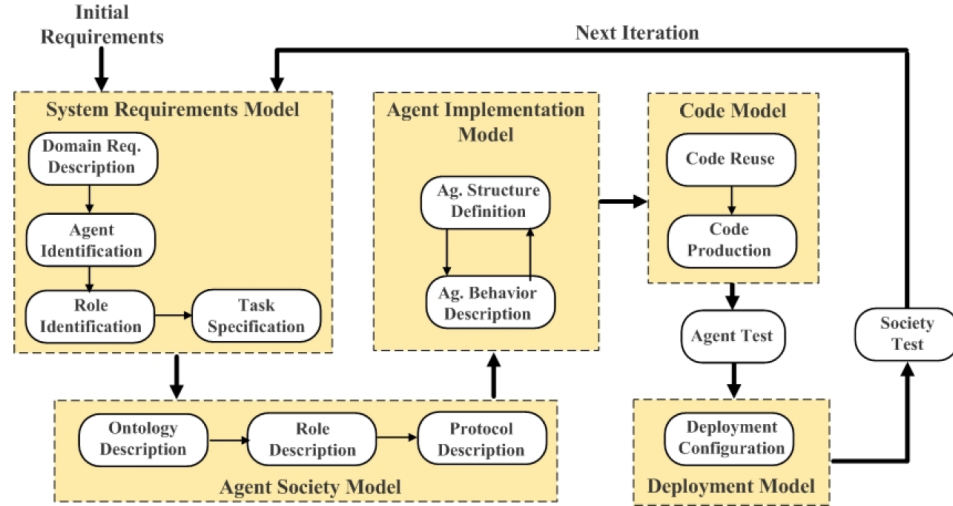


Figure 1.3 Modèle PASSI

1.6 Hypothèse

Nous savons que dans l'internet des objets, les objets sont en général autonomes, distribués et hétérogènes, les objets se communiquent entre eux pour offrir des services qui vont plus tard créer de la valeur pour les clients. L'interopérabilité des solutions IdO et l'intégration des données sont parmi les facteurs de succès les plus importants de l'IdO, (Gartner, 2017). L'IdO est de nature dynamique où chaque objet peut être considéré comme étant un agent, de nouveaux problèmes

se posent pour la coordination et la communication d'agents qui nécessitent des mécanismes de coordination adaptés au contexte spécifique d'IdO.

Nous savons que les systèmes multiagents sont par nature des modèles distribués qui permettent de connecter un certain nombre de systèmes relativement autonomes. Ces systèmes sont connus dans la résolution de problèmes complexes. Ils ont déjà fait leurs preuves dans des processus d'intégration (Boussaid *et al.*, 2003) ainsi que dans la manipulation ou l'interaction des données (Ghurbhurn, 2008). Les systèmes multiagents proposent déjà des mécanismes pour assurer efficacement la communication et l'interopérabilité des entités autonomes. Ces systèmes possèdent de bons mécanismes d'interactions sur le fonctionnement des systèmes ouverts, dynamiques et hétérogènes (Sabouret, 2009).

Selon DeLoach, les principales relations entre objets et agents sont diverses comme :

- 1) Un agent peut être considéré comme un objet actif ayant un état mental, un objectif et une autonomie, les deux paradigmes (objet et agent) utilisent l'envoi de messages pour la communication, et peuvent utiliser l'héritage et l'agrégation pour définir leurs architectures, ect.
- 2) Une classe d'agents est définie en termes de services et d'objectifs, alors qu'une classe d'objets est définie en termes d'attributs et de méthodes.
- 3) Dans le paradigme objet, les rapports entre classes d'objets sont traduits par les associations, alors que dans un diagramme d'agents, ces associations sont des conversations entre agents (DeLoach, 1999).

Notre hypothèse est la suivante : Une solution basée sur les mécanismes des systèmes multiagents permettrait une interopérabilité entre les applications destinées à l'usage de l'internet des objets. Cette hypothèse se traduit par le développement

et l'évaluation d'un SMA qui agit comme un middleware pour réduire les problématiques de communication et d'interopérabilité entre les applications d'IdO.

1.7 Organisation de la thèse

Cette thèse comporte 7 chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présentons la problématique du sujet, l'objectif et la méthodologie ;
- Dans le deuxième chapitre nous décrivons les concepts clés des domaines d'IdO et des SMA. Ensuite, nous réalisons une revue de la littérature des travaux existants dans le domaine de l'IdO et des villes intelligentes. Elle permet d'identifier non seulement les applications de l'IdO des villes intelligentes, mais également les travaux (représentatifs) de développement déjà réalisés dans le domaine des SMA ;
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les caractéristiques et les comportements propres aux SMA ;
- Une solution découlant de la problématique soulevée dans le cadre de ce projet de recherche est présentée dans le quatrième chapitre ;
- Dans le cinquième chapitre, nous présentons la stratégie adoptée pour la réalisation la validation empirique de notre solution ;
- Dans le sixième chapitre, nous présentons la vérification et la validation de la solution proposée, suivis des résultats et discussions ;
- La thèse se termine par une conclusion résumant les différentes contributions ainsi que les limites et perspectives relatives à ce travail de recherche.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART SUR LES VILLES INTELLIGENTES ET L'INTERNET DES OBJETS (IDO)

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière succincte quelques définitions des concepts clés et les recherches réalisées dans les domaines de l'IdO et des villes intelligentes, de relater leurs dimensions sociales ainsi quelques enjeux liés à la réalisation d'un projet de ville intelligente. Nous avons présenté quelques projets de villes intelligentes ainsi que quelques plateformes de déploiement d'IdO existant actuellement. Il est clair qu'une revue de littérature a pour vocation première d'expliquer les termes qui sont utilisés dans le domaine de la recherche afin d'éviter toute ambiguïté. De nos jours, la notion de ville intelligente prend toute sa place dans les sociétés et l'évolution de l'IdO et de la ville intelligente se situe à différents niveaux conduisant à des définitions différentes d'un chercheur à l'autre. Une autre vocation de cette revue de littérature est de comprendre et d'identifier les bases afin de concevoir des projets de villes intelligentes mures qui répondent à la maturité des services et des technologies d'IdO.

Apporter une définition réelle au concept de villes intelligentes n'est pas chose aisée, car pour le moment il n'existe pas vraiment de consensus clair auprès des chercheurs sur cette définition. De ce fait, nous pensons que deux voies de défini-

tions s’ouvrent à cette terminologie : un point de vue macro qui couvre des définitions plus théoriques et philosophiques, et un point de vue micro, plus pratique et qui s’intéresse aux projets qui touchent les infrastructures de développement d’une ville intelligente.

2.2 Les concepts de base et définition de l’IdO

Nous présentons dans ce chapitre quelques concepts de base qui serviront à clarifier les termes utilisés tout au long du document.

(SMA) systèmes multiagents : Issu de l’intelligence artificielle distribuée, ce système représente un ensemble d’agents qui interagissent en mode de coopération, de compétition et/ou de coexistence.

Machine-to-Machine : M2M, ce terme désigne la communication machine à machine (Machine-to-Machine) en anglais.

Services Web : Technologie qui permet à des applications de dialoguer à distance via l’internet, indépendamment des plates-formes et des langages. Ces services s’appuient sur un ensemble de protocoles Internet très répandus (XML, HTTP).

IdO ou IoT : L’Internet of Things (IoT) est vu comme étant un réseau qui relie et combine les objets avec l’Internet, en suivant les protocoles qui assurent leurs communications et échanges d’informations à travers une variété de dispositifs (Al-Fuqaha *et al.*, 2015).

SIoT : Est une imitation des réseaux sociaux entre les humains et les objets. Des objets comme les humains sont considérés comme intelligents et sociaux. Ils créent leur réseau social pour atteindre leurs objectifs communs, tels que l’amélioration des fonctionnalités, des performances et de l’efficacité et la satisfaction des services requis, (Malekshahi Rad *et al.*, 2020) .

Web of Things (WoT) : De nos jours le Web et ses technologies sont largement disponibles et populaires, la prochaine étape logique consiste alors à les utiliser comme plateforme de communication pour les objets intelligents, c'est-à-dire arriver à lier des objets aux pages Web. Le web des objets désigne l'intégration de tout appareil interrogeable ou contrôlable à distance, dans le monde du World Wide Web.

Le Web Sémantique des objets (SWoT) : C'est l'autonomisation du Web des objets via les technologies du web sémantique. Le web sémantique fournit les bases qui facilitent la circulation des flux d'information à travers le World Wide Web, afin que le contenu soit appréhendé et exploité par des machines. Le but est de fournir des services plus aboutis à ses utilisateurs, (Berners-Lee, 1992).

Agent : Selon Russell et Norvig « On appelle agent toute entité qui peut être considérée comme percevant son environnement grâce à des capteurs et qui agit sur cet environnement via des effecteurs. », (Russell et Norvig, 1995).

Interopérabilité :

Selon Knowles et al., l'interopérabilité « est capacité de pouvoir opérer en conjonction » (Knowles *et al.*, 1999). Elle fait donc ressortir la notion de relation réciproque dans l'accomplissement d'une ou de plusieurs opérations (actions).

Selon IEEE, l'interopérabilité est « la capacité permettant à plusieurs systèmes ou composants d'échanger des informations et de pouvoir utiliser les informations échangées » (Geraci, 1991).

Ces définitions de base mettent en avant les éléments essentiels à la compréhension de ce qu'est l'interopérabilité à savoir :

1. la présence de plusieurs acteurs ;

2. l'aptitude à communiquer des données propres aux acteurs, qu'elles soient identiques ou radicalement différentes, et à les utiliser ;
3. la réalisation d'une action.

2.3 Villes intelligentes : définitions et concepts fondamentaux

2.3.1 Définition du point de vue macro

La définition macro de la ville intelligente se concentre sur l'étude des éléments historiques et théoriques qui ont conduit à la constitution du concept de « ville intelligente ». Ce concept trouve sa gestation dans les courants urbanistiques, suite à des résultats sur des réflexions autour de la ville du futur. Dans les pays occidentaux, le concept de ville intelligente a connu un essor considérable avec le projet de recherche de la firme de Cisco qui souhaitait évaluer les possibilités de mettre en place des structures d'urbanisme intelligent, c'est-à-dire l'utilisation des outils technologiques, pour rendre les villes intelligentes (Sadowski et Bendor, 2019). Dès le début de 2008, IBM a également mis en œuvre un programme dénommé « Smarter Cities ». Dans ce programme, l'entreprise réalise des tests empiriques sur des projets de villes intelligentes afin de démontrer que la combinaison entre l'utilisation de l'Internet des objets et la mise en œuvre du modèle d'innovation ouverte au sein des villes intelligentes a changé le développement des zones urbaines et a affecté la capacité d'innovation des entreprises. De plus, IBM s'est permis de proposer différentes solutions au développement durable des villes, par sa vision de « smart city » comme système de système. Dès lors, le terme « smart city » devient une image de marketing et un sujet permettant aux candidats de rehausser leur capital politique (Scuotto *et al.*, 2016).

La littérature nous dit que le concept de ville intelligente a fait l'objet de bien des définitions et soulève de nombreuses questions auprès des acteurs municipaux ou des chercheurs en sciences sociales, en urbanisme, etc. Albino *et al.*, dans leur

article a émis une définition de ville intelligente à savoir : « la ville est un espace qui intègre des enjeux : transport, éducation, énergie, santé, à partir de ce constat, on peut dégager des domaines et des sous-domaines, véritables leviers dans le processus d'intelligence d'une ville » (Batty, 1990). L'urbaniste Batty nous dit qu'en Europe, l'un des tous premiers projets à avoir mentionné le concept de ville intelligente est celui de Singapour. Ce projet consistait en la mise en place d'une infrastructure pouvant permettre de centraliser les informations de la ville afin de permettre la prise de meilleures décisions. Ce dernier définit la notion de ville intelligente comme étant « une ville entièrement équipée d'un réseau de TIC pour gagner un avantage compétitif » (Batty, 1990).

En 2012, Batty définit une ville intelligente comme une « constellation d'instruments placés à différentes échelles qui connectent les données provenant de réseaux différents et qui fournissent des données en continu sur les mouvements des individus et l'évolution de matériel physique afin de permettre de prendre des décisions dans la ville » (Batty, 2012). Il insiste sur la compréhension des impacts que peut avoir l'intégration des nouvelles technologies dans les services émergents des villes intelligentes sur les sociétés de nos jours. Dans un autre article plus récent, Batty estime que son approche dans les années 1990 ne prenait pas en compte l'impact que les TIC ont sur les activités d'une ville. Il met l'accent sur le lien qui existe entre les technologies de l'IdO et l'évolution des services de la ville à partir des données récoltées : « *We make our technologies and then they make us* » (Batty, 2013).

Souvent, on rencontre des terminologies comme « digital city » qui prônent les interconnexions entre tous les éléments de la ville et de tous les acteurs. Donc, la question de la définition de ville intelligente est un exercice difficile mais, dans un souci de clarté, il est tout de même important de s'arrêter sur une définition de la ville intelligente et nous proposons celle-ci : « Une ville intelligente est une

ville utilisant les technologies de l'information et de la communication (T.I.C.) afin de garantir un contexte favorable à son développement économique, social et d'améliorer les services urbains en réduisant leurs coûts ».

2.3.2 Définition du point de vue micro

La définition micro de la ville intelligente se concentre sur l'étude des domaines d'application des différents projets de cette ville. L'intelligence d'une ville se définit en fonction du nombre d'applications intelligentes que soutiennent celle-ci. On retrouve ces applications dans différents domaines qui supportent nos sociétés. Des chercheurs ont déterminé six grands domaines pour exprimer « l'intelligence » d'une ville. Giffinger and Gudrun (2010), dans leur article ont présenté les grands domaines de l'intelligence d'une ville à savoir « *Smart economy (SE)*, *Smart people (SP)*, *Smart governance (SG)*, *Smart mobility (SM)*, *Smart environment (SEn)* et *Smart Living (SL)* » (Giffinger *et al.*, 2007). Ces domaines se définissent comme suit :

- 1) Le domaine de l'économie intelligente ou *Smart economy* se concentre sur des services et applications qui augmentent la compétitivité économique de la ville. Des services qui concernent des projets d'innovations, d'entrepreneuriat, d'implication de la ville sur le marché international, etc., comme par exemple la mise en place d'un outil de création d'entreprises en ligne au Québec (Registraire des entreprises).
- 2) Le domaine de "l'individu intelligent" ou *Smart People* est centré sur des services qui développent les qualifications et l'éducation des citoyens, ainsi qu'une meilleure interaction sociale, comme l'utilisation du tableau blanc interactif dans les écoles publiques, la mise en place de projets d'*e-learning* permettant la réalisation en ligne d'activités éducatives, etc. (Beauchamp Parkinson, 2005).

- 3) Le domaine de la gouvernance intelligente ou *Smart Governance* prend en compte les applications développées afin de favoriser un niveau de transparence dans les services publics ainsi que l'implication des citoyens dans les décisions prises par la ville, par exemple les projets de données ouvertes de la ville de Montréal, qui permettent aux citoyens d'accéder aux données de la ville à n'importe quelle heure de la journée.
- 4) Le domaine de la mobilité intelligente ou *Smart Mobility* prend en compte les services de mobilité urbaine et les services d'accès aux TIC. Les services de mobilité urbaine assurent les besoins de mobilité de la population par exemple l'affichage des horaires aux arrêts de bus, le dispositif de partage de vélo Bixi à Montréal. Les services d'accès aux TIC se concentrent plutôt sur des infrastructures TI ou d'accès à l'information, comme la mise à disposition des bornes WiFi gratuit pour la population, par exemple l'initiative Zap dont la mission est de promouvoir le déploiement de points d'accès Internet public sans-fil et gratuit dans de nombreuses villes du Québec.
- 5) Le domaine de l'environnement intelligent ou *Smart Environnement* concerne des applications de gestion des ressources naturelles comme les parcs, les forêts, de l'eau, l'éclairage, la qualité de l'air, le sonomètre, etc. On peut penser par exemple aux systèmes d'éclairage à détection automatique véhicules qui réduisent la consommation en énergie en détectant la présence des véhicules sur la route. Un autre exemple est le projet pilote des villes de Montréal et de Saint-Lambert, avec la Société du parc Jean-Drapeau, visant à mieux connaître les niveaux sonores autour des activités du parc.
- 6) Enfin le domaine de l'immutique ou *Smart Living* concerne des projets qui améliorent les édifices utilisés par les citoyens, que ce soit les endroits habitables, les lieux de travail ou de loisirs. Parmi ces applications, on retrouve de la télésurveillance et la construction de bâtiments de zéro émission (Car-

rière et Faure, 2015). Ces applications soutiennent souvent la sécurité et la qualité de vie offertes aux citoyens.

Les travaux de Batty insistent sur le fait qu’une ville intelligente repose généralement sur l’exploitation des données récoltées à partir de différents domaines de services qui composent la ville. Les TICs sont au cœur de la collecte des données avec l’émergence du nouveau concept dénommé IdO. De ce fait, nous allons y consacrer quelques paragraphes de la revue de littérature afin de mieux comprendre quelques composants qui caractérisent la constitution de l’IdO et la dimension sociale de ses objets.

2.4 Approches et logiques d’adoption d’une ville intelligente

La Commission de l’éthique en science et en technologie du Québec (CÉSTQ) propose de distinguer plusieurs approches qui permettent de légitimer des changements à apporter à la gestion urbaine d’une ville, ces approches sont : technologique, innovante, participative et inclusive :

Par exemple, l’approche technologique permet de répondre aux défis nouveaux auxquels font face les villes sur le plan urbain, démographique, économique et environnemental qui fort souvent requièrent l’utilisation des outils technologiques. Pour l’approche innovante, les données et les outils technologiques sont vus comme des éléments transformateurs de la gouvernance urbaine. Finalement, l’approche participative et inclusive insiste sur le potentiel allégué de soutien aux pratiques démocratiques présenté par le numérique ainsi que sur des visées de développement social (CÉSTQ, 2017). Le tableau 2.1 présente une synthèse de ces trois approches.

Il ressort des travaux de cette commission que deux catégories de logique poussent le développement et l’adoption de solutions TIC dans l’émergence de villes intelligentes : une logique de l’offre et une de la demande .(CÉSTQ, 2017).

	Technologique	Innovante	Participative et inclusive
Logique d'adoption	Logique de l'offre technologique	Logique de l'offre technologique Logique de la demande	Logique de la demande collective, axée sur les besoins
Dimension priorisée	Numérique	Numérique et sociale	Sociale
Enjeux ciblés	Croissance démographique Efficience dans la gestion et la prestation des services Exigence d'une « révolution numérique »	Efficience dans la gestion et les communications Développement économique et attractivité Modes de gestion à renouveler Manque de transparence Services au citoyen-client	Engagement citoyen Développement social Fracture numérique Perte de confiance dans les institutions
Rôle des TIC	Solutions technologiques aux problèmes	Technologies porteuses d'un changement de culture	Outils de communication et de mobilisation
Type de gouvernance	Gestion pilotée par l'information Partenariats public-privé Entreprises de TIC gestionnaires des infrastructures urbaines	Soutien aux entreprises (environnement propice à l'innovation) Mobilisation d'une pluralité d'acteurs (communauté) Gouvernance technocratique ou collaborative	Gouvernance démocratique Consultations publiques Cocréation des politiques avec la société civile

Figure 2.1 synthèse des approches (CÉSTQ, 2017)

- Pour la logique de l'offre, les entreprises de haute technologie influencent beaucoup les villes intelligentes via leurs discours. Donc, la technologie est vue comme le principal moteur en matière de changement. Cette logique atteint son paroxysme dans des villes intelligentes d'Asie du Sud-Est comme Songdo, en Corée du Sud.
- Pour la logique de la demande, elle est plutôt influencée par les besoins et les préférences des individus, des organisations ou des sociétés en général qui sont le moteur du développement des technologies et de leur implantation (demand-pull). Cette logique se présente sur deux axes distincts : l'un orienté sur les préférences des individus et l'autre sur les besoins.
- Dans l'axe individualiste, les moteurs de l'intégration des TIC sont menés par les individus, par leurs initiatives et leurs actions non coordonnées. Tandis que pour l'axe des besoins, la logique de la demande prend en considération les besoins des citoyens, les enjeux sociaux et politiques auxquels font face les villes (CÉSTQ, 2017).

2.5 Perspectives des villes intelligentes

Deux grandes perspectives de la ville intelligente sont à prioriser (Batty, 2012) : la perspective sociale et la perspective numérique.

- 1) La perspective sociale prend en compte le vécu et l'aspiration de la société, cette dernière se définit par les besoins de ses citoyens et par des finalités politiques, comme avec des slogans :
 - une ville à l'écoute de ses citoyens ;
 - Une ville avec des infrastructures modernes ;
 - Une ville où l'on se sent en sécurité, etc.
- 2) Concernant la perspective numérique, cette dernière priorise les connaissances numériques, non seulement de ses citoyens mais aussi de l'ensemble de ses dispositifs et des innovations technologiques qui caractérisent une ville intelligente, comme :
 - Un mobilier urbain connecté ;
 - Des données en libre accès ;
 - Un réseau de transmission des données et des décisions publiques fondées sur ces données, etc.

2.6 L'internet des objets (IdO)

Pour Seydoux et al., l'IdO désigne un réseau d'objets connectés entre eux et communiquant de manière automatique, (Seydoux *et al.*, 2015). Weiser dans sa perspective d'avenir d'une nouvelle ère informatique avait déjà prédit la possibilité de communication et d'interaction de manière autonome des objets. L'auteur parle d'une informatique dite « ubiquitaire » destinée à se « dissoudre dans la trame de notre vie quotidienne au point de ne plus en être discernable » (Weiser, 1991).

Weiser rêvait de l'informatique ubiquitaire comme un monde physique rempli de capteurs, d'actuateurs, d'écrans et d'éléments computationnels embarqués "sans couture" (seamlessly) dans les objets de nos vies quotidiennes et connectés dans un réseau continu et persistant.» (Weiser *et al.*, 1999). Rendre les relations entre l'homme et le monde opérationnel, tel pourrait être le leitmotiv de l'avenir de l'informatique prophétisé à la fin des années 1980 par le directeur de recherche du Xerox PARC (Palo Alto Research Center) Mark Weiser.

2.6.1 Composantes de l'internet des objets

L'IdO est composé de différentes technologies qui travaillent ensemble afin d'accomplir une tâche déterminée. Les auteurs Al Fuqaha et al., ont découpé l'IdO en six éléments principaux nécessaires qui mettent en relief différents pôles de fonctionnement de l'IdO, comme l'identification, la capture, la communication, le calcul, les services, la sémantique (Al-Fuqaha *et al.*, 2015).

- 1) L'identification d'un objet dans l'IdO permet de nommer l'objet et lui donner une adresse. De nombreuses méthodes d'identification sont disponibles pour l'IoT telles que les codes de produits électroniques (EPC) et les codes ubiquitaires (uCode), etc. De plus, l'adressage des objets IdO est essentiel pour différencier l'ID d'objet de son adresse. Connaître le nom de l'objet n'est pas suffisant pour l'identifier de manière unique, à cette identification il faut également ajouter une adresse au sein du réseau de communication. À l'heure actuelle, les méthodes d'adressage des objets sont principalement l'IPv4 et l'IPv6.
- 2) La capture pour l'IdO permet de collecter les données des objets connectés. Une fois les données recueillies, elles sont analysées et traitées. Les capteurs peuvent avoir une multitude de formes comme des tags RFID, des capteurs intelligents ou des vêtements intelligents.

- 3) La communication dans l'IdO c'est le processus de connexion de l'ensemble des objets hétérogènes afin d'offrir un service spécifique. Nombreux sont les protocoles de communication, comme : Le Bluetooth, la RFID, le WIFI ou les réseaux cellulaires sont les plus répandus sur le marché et les plus matures. Le choix de la technologie de communication dépend souvent des besoins du projet.
- 4) Le calcul (computation) se définit comme étant la combinaison du matériel et du logiciel qui analyse les données récoltées. De nos jours, on retrouve plusieurs matériels disponibles sur le marché tels que l' Arduino, l'Intel Galileo ou le Raspberry PI, etc. ils sont connus pour leurs coûts d'utilisation modestes. Au niveau du logiciel, de nombreuses plateformes existent comme les systèmes d'exploitation en temps réel (RTOS), TinyOS, LiteOS et RIoT OS qui offrent un système d'exploitation léger conçu pour les environnements IdO. des simulateurs comme Cooja qui permet aux chercheurs et aux développeurs de simuler et d'émuler des applications IoT et de réseau de capteurs sans fil (WSN), etc.
- 5) Les services font référence à l'utilisation faite par l'IdO à partir des données collectées. Nombreux sont les types de services IdO de nos jours, ces derniers varient selon le degré de manipulation et de disponibilité des données captées, parmi les types de services on peut citer :
 - Identity-related Services : services qui permettent d'identifier un objet réel dans le monde virtuel ;
 - Information Aggregation services : services de collecte des données brutes à des fins d'analyse et de traitement.
 - Collaborative-Aware Services : services d'utilisation des données agrégées pour la prise de décision et des transactions ;

- Ubiquitous Services : services Collaborative-Aware qui répond à la demande à n'importe quel moment, n'importe où, il souvent utilisé dans la prise de décision intelligente dans le domaine de l'IdO (Gigli et Koo, 2011).
- 6) La sémantique est la capacité qui permet d'extraire des connaissances à partir des données collectées afin de fournir un service. Le processus d'extraction de connaissances comprend la découverte et l'utilisation des ressources et la modélisation d'informations. De ce fait, la sémantique représente le cerveau de l'IdO. Cette exigence est prise en charge par les technologies du Web sémantique telles que le Resource Description Framework (RDF) et du Web Ontology Language (Owl), etc.

l'IdO est en constante évolution et gagne en maturité dans le marché (Bendavid *et al.*, 2013). Khan *et al.*, estiment que « le développement de l'IdO dépend principalement des progrès technologiques et du design des différentes applications qui sont créés » (Khan *et al.*, 2012). Dans le cadre des villes intelligentes, les nouveaux services proposés aux citoyens doivent prendre en compte non seulement l'évolution technologique mais aussi le besoin de la ville et la demande de ses citoyens afin de bien comprendre la relation qui existe entre la ville intelligente et l'IdO. Une relation de coévolution qui permettra de mieux cerner les enjeux qui existent entre une ville intelligente et l'IdO.

2.7 Coévolution de la ville intelligente et de l'internet des objets

Bien comprendre l'intégration de l'IdO dans les villes intelligentes favorise fort souvent le succès des projets de ville intelligente, car les besoins de la ville et la demande de ses citoyens doivent être pris en considération. Par exemple, la ville Nice (4e ville la plus «intelligente» selon Juniper) avait lancé en 2013 un système de stationnement qui permet d'orienter en temps réel les automobilistes

vers les places de stationnement disponibles, pour un coût de 13 millions d’euros (Noisette, 2013). Grâce à des capteurs installés sur le trottoir et grâce à un système de géolocalisation, les Niçois pouvaient repérer facilement les places de parking disponibles, 3 ans plus tard, en raison d’un manque d’utilisation, le dispositif est abandonné et les 291 bornes de paiement sont mises hors service au profit du retour des anciens horodateurs (Frenois, 2016).

La stratégie d’IdO peut varier d’une ville à une autre selon son degré d’acceptation de la technologie par la population de cette ville, son niveau de volontarisme vers le déploiement de nouveaux services IdO, les potentialités existantes et la taille de la ville. Trois approches possibles font surface :

- L’approche selon le besoin ;
- L’approche selon le développement économique ;
- Et l’approche selon le marketing territorial.

«Quelle que soit l’approche retenue, une étape nécessaire à la réussite du projet est l’identification et la caractérisation du besoin. Elle doit être faite de façon minutieuse en s’appuyant sur les spécificités de la ville, de ses collectivités et doit déboucher sur l’identification d’une solution technique avec ou sans expérimentation préalable. Cette étape est plus ou moins complexe à mener, et peut varier selon le degré de maturité du cas d’usage et de la technologie associée» (Benda *et al.*, 2018).

2.7.1 Dimension « sociale » de l’IdO (SIoT)

Selon Atzori, c’est le Suédois Lars Erik Holmquist et ses cochercheurs qui ont été les premiers à introduire la relation sociale au sein des objets connectés (Atzori *et al.*, 2012), un extrait du résumé de leur article publié en 2001 parle de :

« Ubiquitous computing is associated with a vision of everything being connected to everything. However, for successful applications to emerge, it will not be the quantity but the quality and usefulness of connections that will matter. Our concern is how qualitative relations and more selective connections can be established between smart artefacts, and how users can retain control over artefact interconnection. We propose context proximity for selective artefact communication, using the context of artefacts for matchmaking » (Holmquist et al., 2001).

Fayon dans sa thèse nous parle de réification du social par les objets connectés, il met en évidence un ensemble de règles qui guident la conception de l'IdO à savoir (Fayon, 2021) :

- Un objet est un agent au sens où son existence physique se double d'une existence logicielle. L'agent est l'alter ego de l'objet, il ne se confond pas techniquement avec lui, mais se confond dans le rapport à l'humain. De son côté, l'humain est un agent et les deux termes s'équivalent dans ce cas.
- Le caractère social se rattache à l'objet en tant que propriété dérivée ou bien intrinsèque.
- Le rapport social entre objets ou entre objets et humains est de nature diverse : amitié, collaboration, compétition, agression, délégation. Possède plusieurs propriétés : incertain, signifiant, récursif, égoïste. Repose sur la confiance à partir d'une évaluation de la réputation
- Le rapport entre objets aussi bien qu'entre objets et êtres humains s'inscrit dans un espace conçu à travers la notion de « mobilité ».

Atzori avance que « l'objet est social dans la mesure où il est le produit des rapports de personnes au sein d'un regroupement. Il doit son existence sociale par l'appropriation qu'un groupe quelconque en fait et qui dépend de sa plus ou moins grande compatibilité avec sa vie sociale présente ».

« En suivant une approche inspirée des « relations sociales » humaines et des « modèles relationnels », les choses imitent le comportement humain juste pour interagir efficacement les unes avec les autres. Plus largement, les objets sont sociaux parce qu'ils participent à la vie quotidienne et professionnelle des gens. Enfin, le méta objectif assigné à tout objet, celui d'agir pour le bien commun des humains les rend sociaux (Atzori *et al.*, 2012).

En effet, nous pensons que les objets héritent de manière naturelle la propriété « sociale » au moment qu'ils se mettent à interagir avec d'autres objets. Ils deviennent sociaux de manière automatique dès qu'ils ont accès aux réseaux sociaux, tels que Facebook ou Twitter. De plus, un objet acquiert également cette propriété à partir du moment où il permet une activité quelconque à un ensemble d'êtres humains, cette relation de socialisation entre les objets permet aux humains, d'être encore plus sociaux que d'habitude.

Concernant la dimension sociale des villes intelligentes, nous pensons que cette dernière cherche à répondre au déficit démocratique dans les villes et aux enjeux de justice sociale, en ce qui a trait aux fractures numériques. C'est-à-dire, aux inégalités d'accès et d'utilisation liées aux technologies numériques de divers citoyens.

Nous pensons que les problèmes qui relèvent des pressions démographiques et qui dominent tous les jours les discours technologiques sur les villes intelligentes sont plutôt éloignés de la situation de certaines communautés des villes intelligentes. À travers le monde, plusieurs communautés de plusieurs villes souffrent de problèmes socio-économiques qui sont souvent ignorés par les besoins les plus basiques. Donc, des solutions associées à la ville intelligente sont évidemment les bienvenues mais ne feront que pallier les problèmes sociaux auxquels les citoyens de la ville sont confrontés.

2.8 Enjeux entre ville intelligente et IdO

De la qualité de l'air à la circulation des véhicules, en passant par la gestion des énergies et des déchets, la ville intelligente prend en compte l'ensemble du fonctionnement de la ville. Donc, avoir une bonne compréhension de ces enjeux se révèle être un élément important afin de pouvoir gérer de manière efficace le déploiement d'un tel projet.

- L'un des principaux enjeux liés à celle-ci est la gestion et le stockage de l'ensemble des données en provenance des objets connectés de la ville.
- Le second enjeu important pour les villes intelligentes est la consommation d'énergie et la pollution engendrées par les objets connectés ainsi que les serveurs de stockage. Les objets connectés sont certes différents, mais ils partagent un point commun qui est la consommation d'énergie électrique, ce qui pourrait non seulement faire grimper la facture mais avoir un impact sur l'environnement.
- Aussi, dès qu'on parle de systèmes intégrés, d'Internet des objets et de collecte de données, la cybersécurité et les questions éthiques deviennent liées à la collecte des données et au traitement de nombreuses données sur les habitants de la ville.
- Les enjeux techniques : souvent, les systèmes à connecter sont des équipements historiques en place depuis des années. Donc, on peut facilement confronter à des systèmes informatiques caducs, des protocoles particuliers ou qui ne sont plus supportés, et qui non pas été conçus pour l'IdO, etc.

2.9 Projets de villes intelligentes

Les nouvelles technologies changent le monde, les villes et leurs citoyens n'échappent pas à cette tendance. La notion de ville intelligente prend toute sa place dans les sociétés. Par définition, la ville intelligente est une ville qui s'appuie sur les TIC et les mécanismes de collecte et de gestion de données pour garantir un contexte favorable à son développement économique, social, tout en offrant une meilleure qualité de vie aux citoyens. Ainsi, une bonne interopérabilité entre les applications de ces différents domaines est nécessaire pour garantir le succès d'un tel projet. Il existe plusieurs projets de villes intelligentes déjà concrétisés comme : le projet Star-City, SmartSantander, etc.

Le projet STAR-CITY est un projet de ville intelligente déployé dans plusieurs villes comme : Dublin, Bologne, Miami, etc. STAR-CITY est un système qui soutient le trafic dans plusieurs villes en Europe. Ce système a été conçu pour donner un aperçu des conditions de circulation en temps réel, ainsi que des historiques de circulation tout en soutenant une planification urbaine efficace. Le captage des données vient de six (6) sources hétérogènes : (1) des conditions météorologiques routières, (2) des informations météorologiques, (3) des flottes de bus de la ville, (4) des médias sociaux, (5) des informations de planification des travaux d'entretien routiers et (6) des sources de renseignement des événements de la ville.

Le projet STAR-CITY est tourné vers l'utilisation des technologies du web sémantique pour décrire ses scénarios. Ainsi, la connaissance et la sémantique du flux de données sont fournies par une ontologie, encodée en OWL. Des mécanismes basés sur des règles ont été définis pour capturer et déduire l'état du trafic par le SWRL2 (Semantic Web Rule Language Version 2). Toutes les fonctionnalités de STAR-CITY sont exposées via les services REST. L'interface utilisateur Web :

STAR-CITY s'appuie fortement sur HTML, CSS, Javascript (toolkit Dojo, bibliothèques D3, JQuery) pour produire une interface utilisateur attrayante. Le déploiement s'est réalisé sur IBM InfoSphere Streams pour l'enrichissement et le traitement de flux de données, IBM WebSphere comme serveur HTTP / Application Server et des composants de pointe tels que pssh pour la distribution parallèle du raisonnement, Jena TDB7 comme magasin RDF, etc (Lécué *et al.*, 2014).

STAR-CITY a été conçu pour agréger des données hétérogènes, réaliser l'analyse contextuelle, le diagnostic, l'exploration, et la prédiction des conditions de circulation dans les villes de Dublin et de Bologne. La pile technologie du Web sémantique a été profondément utilisée pour décrire et intégrer des données urbaines hétérogènes, et raisonner sur ces données. (Gyrard, 2015). La figure 2.2 nous présente une vue globale des différentes sources de données hétérogènes du système de STAR-CITY pour la ville de Dublin, les lignes en gris sont des ensembles de données non utilisés pour le diagnostic du trafic.

Type	Sensing	Data Source	Description	Format	Temporal Frequency (s)	Size per day (GBytes)	Data Provider (all open data)
Stream Data	Static	Journey times across Dublin City (47 routes)	Dublin Traffic Department's TRIPS system	CSV	60	0.1	Dublin City Council via dublinked.ie
		Road Weather Condition (11 stations)		CSV	600	0.1	NRA
		Real-time Weather Information (19 stations)		CSV	[5, 600] (depending on stations)	[0.050, 1.5] (depending on stations)	Wunderground
	Dynamic	Dublin Bus Stream	Vehicle activity (GPS location, line number, delay, stop flag)	SIRI: XML-based	20	4-6	Dublin City Council via dublinked.ie
		Social-Media Related Feeds	Reputable sources of road traffic conditions in Dublin City	Tweets	600	0.001 (approx. 150 tweets per day)	LiveDrive Aaroadwatch GardaTraffic
Quasi Stream	Dynamic	Road Works and Maintenance		PDF	Updated once a week	0.001	Dublin City Council
		Events in Dublin City	Planned events with small attendance	XML	Updated once a day	0.001	Eventbrite
			Planned events with large attendance			0.05	Eventful
	Static	Dublin City Map (listing of type, junctions, GPS coordinate)		ESRI SHAPE	No	0.1	Open StreetMap

Figure 2.2 Données non traitées scénario trafic ville Dublin (Lécué *et al.*, 2014).

2.10 Projet SmartSantander ville intelligente

Dans ce projet 20.000 capteurs ont été déployés mesurant la température, l'humidité, la surveillance des parcs, les systèmes d'irrigation des parcs et des jardins, etc. Ces capteurs ont été déployés dans six villes : Santander, Melbourne, Lubeck, Guildford, Belgrade et Arhus, (Sanchez *et al.*, 2011). Le projet SmartSantander a proposé un ensemble d'exigences qui doivent être respectées dans le cadre de déploiement d'une ville intelligente comme :

- la mise à l'échelle des réseaux de capteurs qui ont la particularité de grandir très vite.
- l'hétérogénéité, l'IdO se compose d'une grande variété d'équipements intégrés à d'autres infrastructures et de plateformes d'approvisionnement et services divers.
- la mobilité, l'IdO se compose d'appareils fixes et mobiles qui peuvent également interagir les uns avec les autres dans des scénarios de la vie réelle. Voir la figure 2.3 ci-dessous qui présente les trois couches de périphériques et de services qui constituent l'infrastructure SmartSantander.

SmartSantander apporte un soutien à la mobilité réaliste en déployant une partie de son infrastructure sur des entités du monde réel, comme : les autobus, les véhicules de service public ou les taxis. La plateforme SmartSantander suit une approche d'architecture composée de trois niveaux : un niveau d'équipement, un niveau de passerelle (GW) et un niveau de serveur.

Le nœud IdO fournit le mécanisme d'alimentation nécessaire au fonctionnement des dispositifs IdO. Ce nœud représente la majorité des dispositifs utilisés dans le système. En raison de leur déploiement extérieur ces appareils sont soumis à tous les types de conditions météorologiques. Ces périphériques sont déployées dans

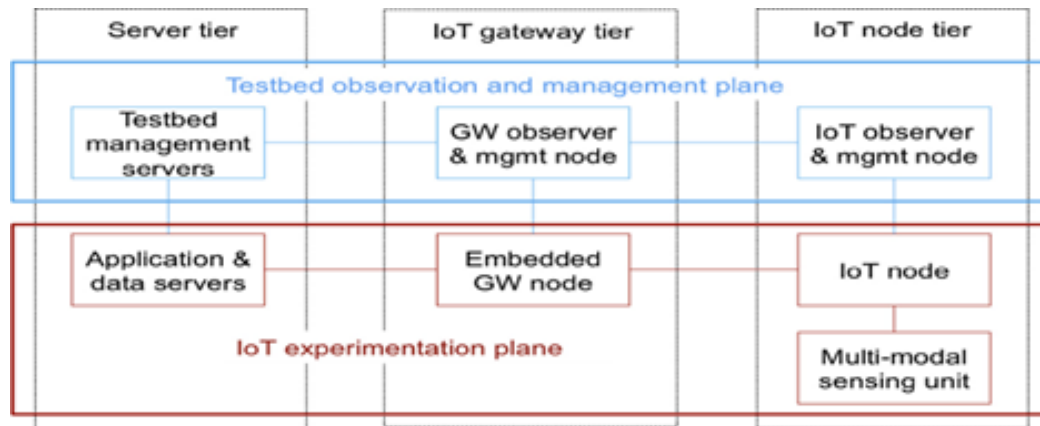


Figure 2.3 Architecture 3 niveaux de SmartSantander (Sanchez et al., 2011).

des endroits difficiles d'accès pour minimiser les dommages dus aux vandalisme. La fiabilité d'alimentation est assurée avec deux sources d'alimentations (Réseau de distribution électrique combiné avec des batteries). Pour la fiabilité, plusieurs chemins de communication vers une passerelle sont activés. Pour la lecture des capteurs et leur entretien, un ensemble de procédures de gestion est mis en œuvre pour assurer la détection rapide de nœuds défectueux.

Le nœud de passerelles relie les dispositifs IdO à bord du réseau à une infrastructure de réseau de base. Les nœuds du niveau GW font aussi partie du niveau programmable afin de permettre l'intégration de dispositifs IdO avec les éléments de réseau. La figure 2.4 nous montre un extrait du déploiement du centre-ville de Santander. Les différentes icônes représentent le déploiement des nœuds de différents capteurs de monoxyde de carbone (CO), de l'intensité lumineuse, du bruit, de la température et de détecteurs de présence de voiture, etc.



Figure 2.4 Vue dedéploiement centre-ville SmartSantander (Sanchez et al., 2011).

Le niveau serveur permet aux différents périphériques serveur de se connecter directement à l'infrastructure du réseau de base. Les serveurs sont utilisés pour héberger des référentiels de données IdO, les serveurs d'applications sont configurés pour réaliser une variété de tâches liées aux services et applications IdO ou pour des approches d'extraction de données dans le monde réel et d'ingénierie des connaissances. Ce niveau bénéficie de la virtualisation et une infrastructure Cloud, assurant une haute fiabilité et la disponibilité de tous ses composants et services.

Une solution hybride aux besoins d'alimentation des nœuds a été adoptée. Pour répondre au besoin de proximité d'une source d'alimentation, des dispositifs de détection ont été installés à des lampadaires publics. Les capteurs sont également dotés de piles et d'un circuit de charge. étant donné que le jour les lampadaires sont éteints, les nœuds tirent leur alimentation des batteries qui sont chargées la nuit lorsque les lampadaires sont activés. La partie (a) de la figure 2.5 nous montre un exemple du type de solutions employées pour l'installation et le placement des différents capteurs.

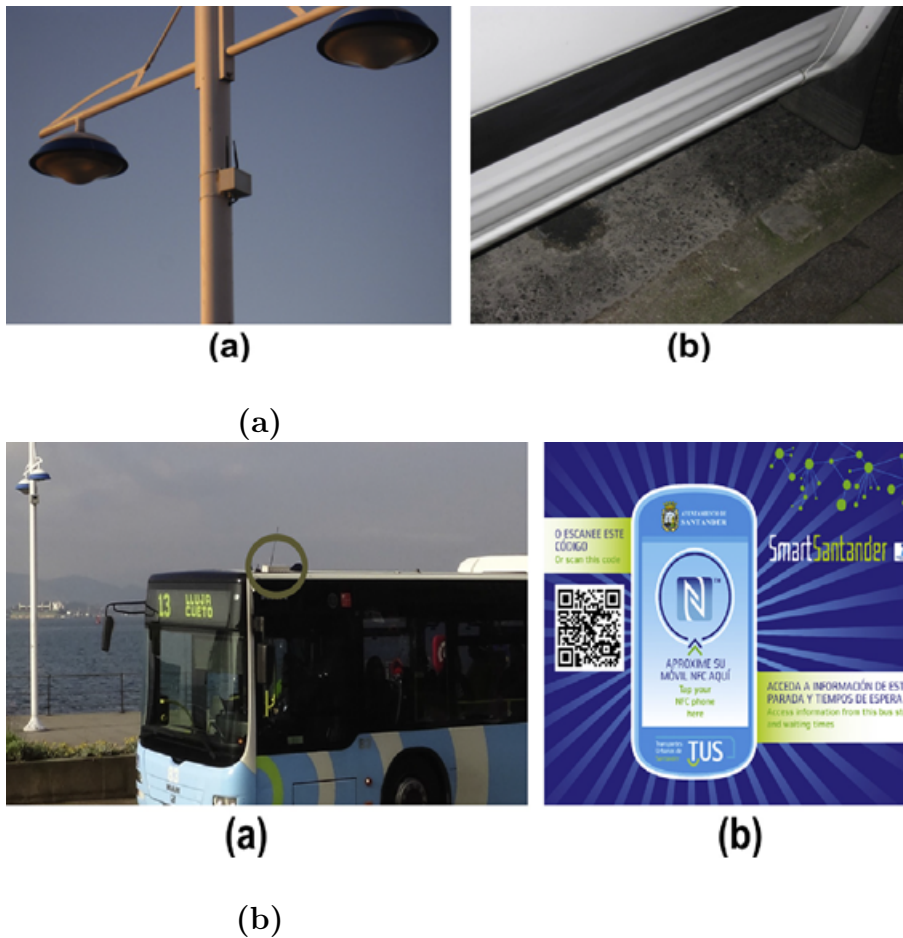


Figure 2.5 Solution d'alimentation hybride pour les capteurs (Sanchez et al., 2011).

Pour assurer la mobilité au sein du réseau, le projet Santander a déployé une bonne partie de son infrastructure sur le déplacement d'entités du monde réel. Une application mobile sensing a été développée dans le projet SmartSantander afin de permettre aux citoyens d'alimenter le réseau via leur appareil mobile en fonction de leurs observations en envoyant des textes, images et vidéos. La partie (b) de la figure 2.5 nous montre un exemple du type de solutions employées par la ville pour déployer son infrastructure mobile.

2.11 Quelques problématiques retrouvées dans l'IdO

Aujourd'hui, les applications de l'IdO se retrouvent pratiquement dans tous les domaines. Cette présence dans différents domaines de la vie quotidienne place l'IdO au centre des problématiques de tous genres comme : des problématiques d'éthique, des problèmes d'authenticité et de sécurité pour l'utilisateur, et avec les données produites. Plus les objets augmentent et sont dotés d'algorithmes intelligents pour percevoir et agir, plus ils deviennent autonomes, ils augmentent les problèmes liés à la vie privée (COM, 2009) et (Saleh, 2017).

D'après Liu et al., le développement rapide de l'Internet des objets a reçu une large attention des milieux sociaux et universitaires. Ces auteurs parlent de l'intégrité des données comme étant un facteur important dans presque tous les contextes liés aux données et aux calculs. Selon eux, la prolifération du cloud computing et les besoins croissants en analyse de mégadonnées telles que les données générées par l'Internet des objets, la vérification de l'intégrité et l'interopérabilité des données devient de plus en plus importante. Cependant, il n'existe pas de norme unifiée pour intégrer, stocker et traiter les données, les systèmes restent très indépendants et l'interconnexion est difficile à réaliser (Liu *et al.*, 2015).

Moriandi et al. (2012) décrivent le besoin d'applications inter-domaines, l'interopérabilité sémantique et la gestion des données pour échanger et analyser les données (IoT/M2M) afin de déduire des informations utiles et assurer l'interopérabilité entre les applications IoT, (Miorandi *et al.*, 2012).

Patel et Cassou (2015) décrivent le défi pour faciliter le développement d'applications dédiées aux applications IdO. Ils proposent un outil pour facilement développer des applications IdO, mais les développeurs d'applications vont encore avoir besoin de programmer la couche logique de l'application et les auteurs n'expliquent pas la manière d'interpréter les données du capteur, (Patel et Cassou,

2015).

2.12 Les plateformes IdO

Fan et Chen dans leur travail ont proposé une approche SOA¹ qui analyse les données à partir d'une plateforme basée sur les services web. Ils avancent que selon la composition et la fonction de l'IdO, on peut le diviser en cinq grandes couches : la couche de perception, la couche de gestion des données, la couche réseau, la couche logique d'affaires et la couche d'application. La figure 2.6 nous donne une vue d'ensemble des composants de la plateforme IdO issue de l'approche SOA (Fan et Chen, 2010).

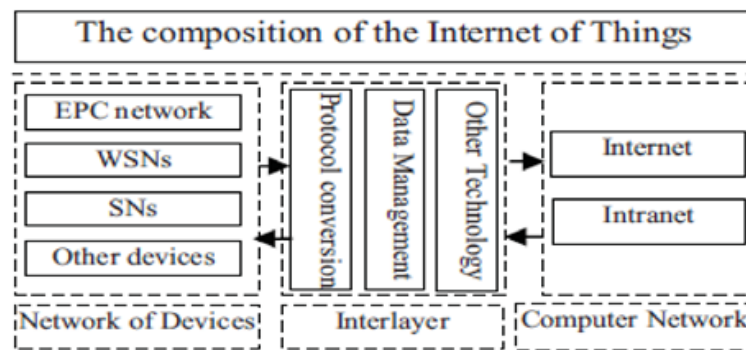


Figure 2.6 Composition d'une plateforme d'IdO (Fan et Chen, 2010).

L'architecture de cette plateforme est divisée en plusieurs couches, présentons quelques-unes de ces couches comme la couche de collecte de données. Celle-ci est divisée en plusieurs sous-services qui sont : la captation des données, le nettoyage des données et la description des données. Au niveau de cette couche, chaque périphérique est considéré comme une source de données. Avec le format XML, une description unifiée des données est réalisée après chaque processus de nettoyage.

1. service-oriented architecture

Kos et al., propose une plateforme de communication ouverte et intelligente qui peut être utilisée pour prendre en charge divers scénarios d'utilisation liés à l'Internet des objets. Cette plateforme permet l'intégration de grandes quantités de données, quelle que soit leur source ou structure et elle fournit aux utilisateurs ou aux dispositifs, des données sémantiquement analysées et enrichies en fonction de leurs besoins et de leur contexte (Kos *et al.*, 2012).

L'une des principales fonctionnalités clés de cette plateforme est la possibilité de fusionner des données provenant de différentes sources. Les auteurs nous disent que cette dernière permet l'intégration des données ouvertes, c'est-à-dire qu'elle permet l'utilisation de logiciels open source ainsi que des interfaces interne et externe de haut niveau et de bas niveau, ce qui permet d'assurer une meilleure exploitation des données de cette plateforme IdO. La figure 2.8 nous montre le processus de fusionnement de données à partir de plusieurs sources. (Kos *et al.*, 2012).

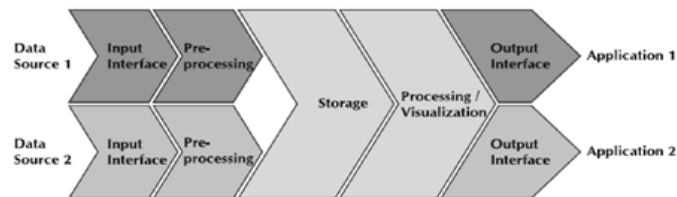


Figure 2.8 Processus de fusionnement de données (Kos *et al.*, 2012).

Les entrées de la plateforme sont considérées comme des sources de données et d'événements, elles contiennent des capteurs et des dispositifs qui récupèrent et transmettent les données directement dans la plateforme. Les applications orientées services sont basées sur des systèmes hérités de services événementiels, et des sources de données externes fiables, comme des bases de données. Les événements sont placés dans un canal d'événements ou ils sont envoyés au noyau de traitement des événements et à la base de données. Le noyau de traitement d'évé-

nements fournit le filtrage d'événements, l'identification d'événements à déclarer, d'appariement de modèles, de séries temporelles afin d'analyser les corrélations existant entre ces événements pour pouvoir les classer par la suite. La figure 2.9 nous donne une vue d'ensemble des différents composants de cette plateforme IdO (Kos *et al.*, 2012).

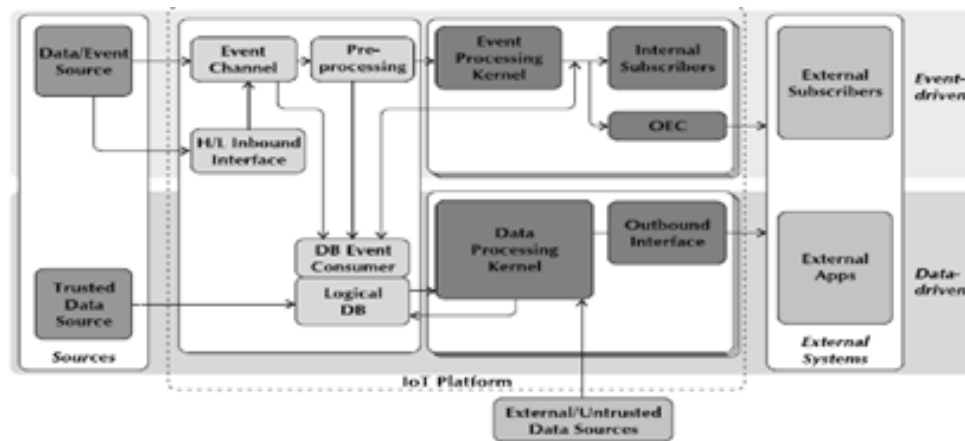


Figure 2.9 Plateforme d'IdO (Kos *et al.*, 2012).

2.13 Plateforme OpenIoT

OpenIoT² est une plateforme open source d'Internet of Things qui en 2013 a gagné le titre de meilleure solution d'interopérabilité sémantique pour l'intégration de capteurs à l'IdO. OpenIoT explore des méthodes efficaces d'utilisation et de gestion des environnements Cloud pour les «entités» et les ressources IoT telles que les capteurs, les actionneurs et les appareils intelligents. La figure 2.9 présente la description de quelques capteurs de la plateforme d'OpenIoT. OpenIoT fournit les moyens pour formuler et gérer des environnements avec des ressources nécessaires permettant de fournir des services d'IdO.

2. <http://www.openiot.eu/>

La plateforme OpenIoT est pertinente pour un large éventail de domaines scientifiques et technologiques interdépendants couvrant :

1. middleware pour capteurs et réseaux de capteurs,
2. Ontologies, modèles sémantiques et annotations pour représenter les objets connectés à Internet, ainsi que des techniques sémantiques de données ouvertes Cloud / Utility, y compris les systèmes de sécurité et de protection de la vie privée.

D'un point de vue technique, l'infrastructure middleware OpenIoT permet une configuration et un déploiement flexibles d'algorithmes de collecte et de filtrage de flux d'informations issus des objets connectés à l'internet, tout en générant et traitant des événements d'entreprise / applications importantes. OpenIoT fournit des instantiations de services de détection basés sur le Cloud et sur l'utilitaire permettant le concept de "Sensing-as-a-Service", via une infrastructure de middleware adaptatif pour le déploiement et la fourniture de services dans les environnements Cloud. La figure 2.10 présente la description d'un capteur de température et de l'humidité de l'air suivant l'ontologie d'OpenIoT.

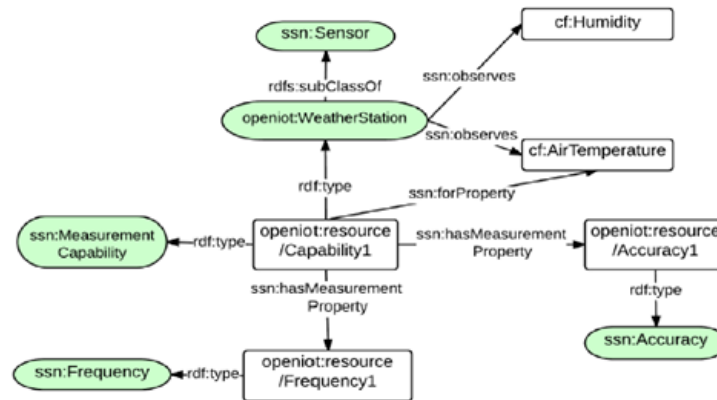


Figure 2.10 Description capteurs plateforme d'OpenIoT (Soldatos *et al.*, 2015).

La figure 2.11 présente l'architecture OpenIoT via ses sept éléments principaux :

1. Le Sensor Middleware (Extended Global Sensor Networks, X-GSN) collecte, filtre et combine les flux de données provenant de capteurs virtuels ou de dispositifs physiques. Le Sensor Middleware est déployé sur la base d'une ou plusieurs instances distribuées
2. Le Cloud Data Storage (Linked Stream Middleware Light, LSM-Light) agit comme une base de données cloud qui permet de stocker les flux de données issus du middleware du capteur. L'infrastructure cloud stocke également les métadonnées nécessaires au fonctionnement d'OpenIoT. L'implémentation du prototype OpenIoT utilise le Linked Stream Middleware (LSM), avec une fonctionnalité de données push-pull et des interfaces cloud.
3. Le Scheduler traite les demandes de déploiement de services à la demande et assure leur bon accès aux ressources (par exemple, les flux de données) dont ils ont besoin. Il découvre les capteurs et les flux de données associés qui peuvent contribuer à un service donné. Il gère également un service et active les ressources impliquées dans sa fourniture.
4. Le Service Delivery Utility Manager (SDUM) combine les flux de données indiqués par les workflows de service au sein du système OpenIoT afin de fournir le service demandé (généralement exprimé sous la forme d'une requête SPARQL). Le SDUM agit également en tant qu'installation de mesure de service qui assure le suivi des mesures des services publics pour chaque service.
5. Le composant Request Definition permet la spécification à la volée des demandes de service à la plateforme OpenIoT. Il comprend un ensemble de services permettant de spécifier et de formuler de telles requêtes, tout en les soumettant au Scheduler. Ce composant est supporté par une GUI (Graphical User Interface).

6. Le composant Request Presentation est en charge de la visualisation des sorties d'un service. Ce composant sélectionne des mash-ups à partir d'une bibliothèque appropriée afin de faciliter la présentation du service.
7. Le composant de configuration et de surveillance permet la gestion visuelle et la configuration des fonctionnalités sur les capteurs et les services qui sont déployés au sein de la plateforme OpenIoT (Soldatos *et al.*, 2015).

OpenIoT gère l'enregistrement, l'acquisition de données et le déploiement de capteurs et d'objets interconnectés, via X-GSN. X-GSN est une extension du GSN qui prend en charge l'annotation sémantique des données de capteur et des métadonnées. Le concept fondamental de base dans X-GSN est le capteur virtuel, qui peut représenter non seulement des appareils physiques, mais en général toute entité abstraite ou concrète qui observe des caractéristiques de toute sorte. Un capteur virtuel peut également être une agrégation ou un calcul sur d'autres capteurs virtuels, ou même représenter un modèle mathématique d'un environnement de détection.

Pour propager ses données au reste de la plateforme OpenIoT, chaque capteur virtuel doit s'enregistrer dans le LSM, afin que d'autres applications et utilisateurs puissent le découvrir et accéder à ses données. Le capteur est enregistré via X-GSN et publie une représentation sémantiquement annotée de ses métadonnées. X-GSN s'occupe de créer les annotations sémantiques en RDF, selon l'ontologie OpenIoT, et de les publier dans le référentiel du magasin cloud LSM (Soldatos *et al.*, 2015).

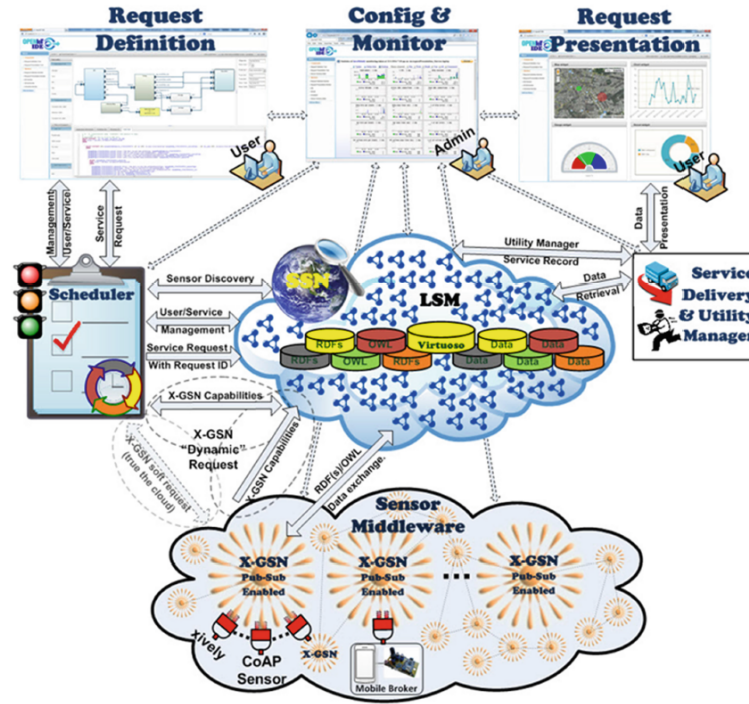


Figure 2.11 Présentation architecture OpenIoT (Soldatos *et al.*, 2015).

Boussaid et al., nous a présenté une nouvelle approche d'intégration de données complexes basée à la fois sur l'entreposage de données et sur les systèmes multia-gents (SMA). Cette approche repose sur une architecture évolutive dans laquelle on peut ajouter, modifier ou supprimer des services, voire créer de nouveaux agents (Boussaid *et al.*, 2003). Dans cette nouvelle approche, différentes tâches du proces-sus d'intégration des données complexe sont effectuées par un ensemble d'agents dans une base de données (ETL). Ils nous ont présenté le système SMAIDoC, un système qui aborde l'intégration de données complexes déjà recueillies grâce aux agents (DataAgent et WrapperAgent) qui modélisent des données sous forme d'objets complexes. Ensuite, l'agent (XMLCreator) traduit les données en docu-ments XML pour que l'agent XML2RDBAgent stocke ces données dans la base de données. La figure 2.12 présente l'architecture globale du système SMAIDoC basée sur une plateforme d'agents génériques. (Boussaid *et al.*, 2003).

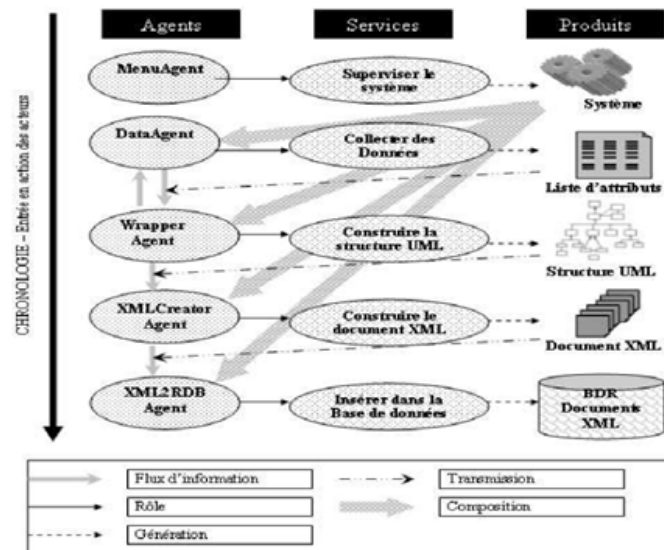


Figure 2.12 Architecture SMAIDoc (Boussaid *et al.*, 2003).

2.14 Importance du middleware pour IdO

Les auteurs Bandyopadhyay *et al.*, indiquent l'importance d'un middleware pour IdO. Selon eux, pour l'IdO le middleware agit comme un lien joignant les domaines hétérogènes des applications qui communiquent sur des interfaces hétérogènes. Ils présentent une vue globale des systèmes middleware existants pour l'IdO (Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

De plus, ils évoquent des raisons d'avoir un middleware pour l'IdO, qui sont :

- Difficulté de définir et d'appliquer une norme commune à tous les divers appareils appartenant à un domaine diversifié d'IdO.
- Le middleware agit comme une liaison reliant les composants hétérogènes entre eux.
- Les applications de divers domaines nécessitent une couche d'abstraction / d'adaptation.

- Le middleware fournit une API (interface de programmation d'application) pour la couche physique de communication et les services requis pour les applications, cachant tous les détails de la diversité.

La figure 2.13 présente les composants fonctionnels du middleware. Dans cette figure, le cercle plein montre les blocs fonctionnels. Le deuxième cercle englobe la division supplémentaire des blocs fonctionnels et le troisième cercle montre les modules importants interagissant avec les différents composants fonctionnels. Ci-dessous une liste non exhaustive des besoins divers des composants fonctionnels qu'un middleware d'un IdO doit prendre en charge comme :

- l'interopération ;
- la détection de contexte ;
- la découverte et gestion des appareils ;
- la sécurité et la confidentialité ;
- la gestion du volume de données.

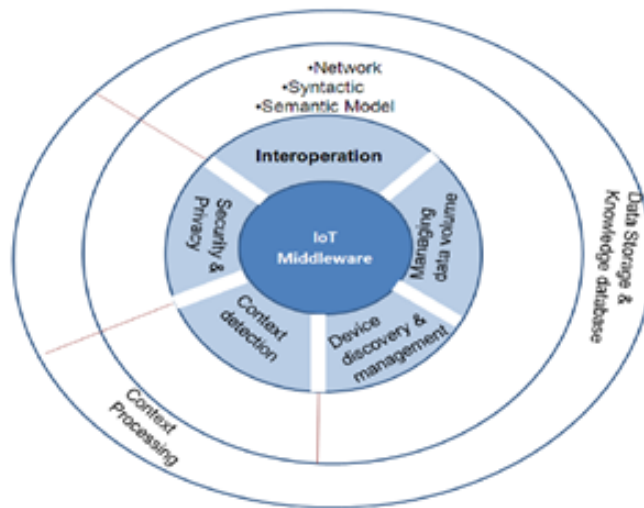


Figure 2.13 Composants fonctionnels de l'IdO (Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

La figure 2.14 présente une vue en couches des composants fonctionnels de l'architecture du middleware pour l'IdO. Les couches fondamentales sont les protocoles d'interface, l'abstraction des appareils chargée de fournir l'interopérabilité, de résoudre la syntaxe et la sémantique associées aux appareils, le module central et de gestion est le composant central, qui effectue la découverte, la gestion et la détection du contexte des appareils. Le module d'abstraction d'application fournit l'interface avec l'application locale et distante. Les applications locales fonctionnent principalement comme des services événementiels. Les autres composants, tels que, l'analyse de contexte, la base de données de connaissances peuvent résider dans un système distant générant essentiellement un besoin d'architecture distribuée (Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

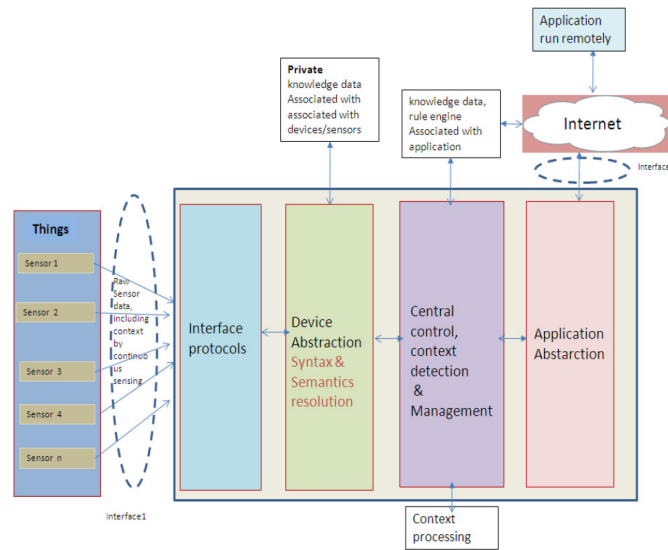


Figure 2.14 Vue en couches architecture middleware IdO (Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

Les tableaux 2.1 et 2.2 montrent les classifications de divers systèmes middleware IdO en fonction de leurs fonctionnalités et de la prise en charge de leurs protocoles d'interface.

IoT Middleware	Features of Middleware				
	Device Management	Interoperation	Platform Portability	Context Awareness	Security and Privacy
HYDRA	✓	✓	✓	✓	✓
ISMB	✓	✗	✓	✗	✗
ASPIRE	✓	✗	✓	✗	✗
UBIWARE	✓	✗	✓	✓	✗
UBISOAP	✓	✓	✓	✗	✗
UBIROAD	✓	✓	✓	✓	✓
GSN	✓	✗	✓	✗	✓
SMEPP	✓	✗	✓	✓	✓
SOCRADES	✓	✓	✓	✗	✓
SIRENA	✓	✓	✓	✗	✓
WHEREX	✓	✓	✓	✗	✗

Tableau 2.1 Fonctionnalités des middleware(Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

IoT Middleware	Interface protocols				
	Zigbee	RFID	WiFi	Bluetooth	Sensor (others)
HYDRA	✓	✓	✓	✓	✓
ISMB	✗	✓	✗	✗	✓
ASPIRE	✗	✓	✗	✗	✗
UBIWARE	✗	✓	✓	✗	✓
UBISOAP	✗	✓	✓	✗	✓
UBIROAD	✗	✓	✓	✓	✓
GSN	✗	✓	✓	✗	✓ IEEE-1451
SMEPP	✗	✗	✓	✓	✓
SOCRADES	✗	✓	✗	✗	✓
SIRENA	✗	✓	✗	✓	✓
WHEREX	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 2.2 interface des middleware(Bandyopadhyay *et al.*, 2011).

Les auteurs Katasonov et al., ont présenté leur vision générale d'un middleware sémantique intelligent pour soutenir l'Internet des objets. Selon ces auteurs, les tâches d'intégration, d'orchestration et de composition automatiques de systèmes complexes sur l'Internet des objets seront impossibles de manière centralisée en raison de l'évolutivité et d'autres problèmes. Par conséquent, « les composantes de tels systèmes devraient être dans une certaine mesure autonomes et proactives. En d'autres termes, l'utilisation des technologies d'agent est nécessaire pour permettre une communication et une coordination flexibles des composants. Les technologies d'agent permettent également la mobilité des composants de service entre différentes plateformes, la découverte de services décentralisés, etc. » (Katasonov *et al.*, 2008).

Dans leur vision, illustrée dans la figure 2.15, chaque ressource est connectée à un représentant qui est un agent logiciel (un "acteur" proactif dans certains scénarios d'intégration). Cet agent est supposé être capable de surveiller l'état de la ressource, prendre des décisions au nom de la ressource, de demander et d'utiliser une aide extérieure si nécessaire. La connexion entre la ressource elle-même et son agent est organisée par la médiation sémantique d'un adaptateur ou d'une interface. Un tel adaptateur peut inclure des capteurs à sortie numérique, une structuration des données (par exemple XML), des composants d'adaptateur sémantique (conversion en une représentation sémantique si nécessaire) et des actionneurs. Selon cette vision, chaque composant pertinent d'un système ubiquitaire doit devenir une ressource intelligente proactive et autogérée. La hiérarchie des ressources peut même entraîner une hiérarchie correspondante des agents (Katasonov *et al.*, 2008).

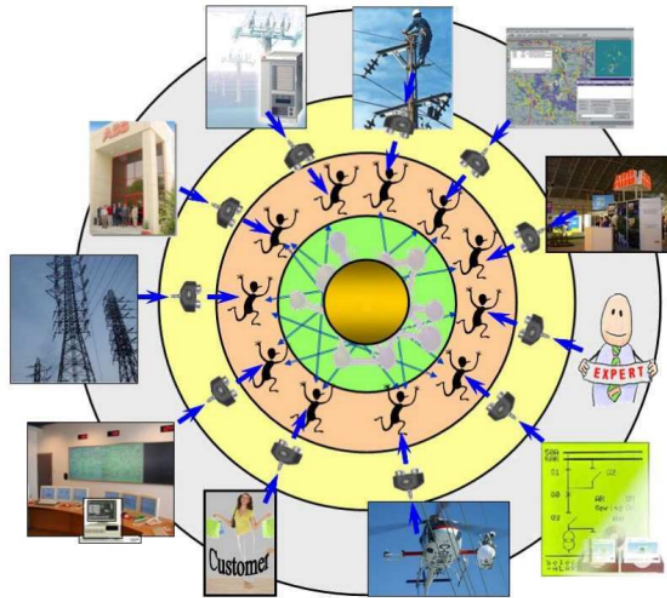


Figure 2.15 Middleware sémantique pour IdO (Katasonov *et al.*, 2008).

Chaqfeh et Mohamed., proposent une liste des principaux défis techniques qui doivent être traités par des solutions middleware pour l'IdO comme : l'interopérabilité, l'évolutivité, la fourniture d'abstraction, l'interaction spontanée, l'infrastructure non fixée, la multiplicité, etc. (Chaqfeh et Mohamed, 2012).

Les solutions middleware qui soutiennent l'IdO peuvent être classées selon les domaines en trois grandes catégories. Le tableau 2.3 illustre la manière dont chaque domaine peut prendre en charge des solutions middleware pour l'IdO, en mettant en évidence la liste des défis pris en compte par différentes approches (Chaqfeh et Mohamed, 2012).

Domain		Semantic web and web services				Sensor networks and RFID		Robotics	
Approach		Task Computing Framework	Triple space-based	UBIWARE	SOA approach	GSN	Fosstrak	TinyREST	
Addressed Challenges	Interoperability	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
	Scalability			✓	✓	✓	✓	✓	
	Abstraction	I/O hardware devices		✓	✓	✓			✓
		H/S Interfaces			✓	✓			✓
		data streams	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Physicality	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Development process			✓	✓	✓	✓	
	Spontaneous Interaction		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Unfixed Infrastructure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Multiplicity	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Security and Privacy		✓		✓					

Tableau 2.3 Défis dans les middleware(Chaqfeh et Mohamed, 2012).

Une plateforme middleware pour l'IdO fournit une couche abstraite interposée entre l'infrastructure informatique et les applications. Cette couche vise à masquer les détails technologiques pour permettre aux développeurs d'applications de se concentrer sur le développement des applications IdO, (Atzori *et al.*, 2010). Malgré les efforts de recherche considérables dans le domaine des environnements intelligents et de l'IdO, aucun middleware n'a encore été normalisé. Une solution unique pouvant s'adapter à tous les environnements n'existera probablement pas (Roalter *et al.*, 2010).

2.15 Déploiement de l’IdO : quelques technologies à considérer

De nouveaux paradigmes sont à considérer dans le développement rapide des technologies d’Internet des Objets tels que Jumeau numérique (DT) et Big Data, Lac de données, Cloud Computing, etc. Il est clair que tous ces nouveaux paradigmes peuvent largement contribuer dans l’adoption et le déploiement massif de l’IdO.

Comment l’IdO et le Jumeau numérique (DT) ou Big Data et le Cloud Computing, peuvent-ils coopérer ?

2.15.1 **Coopération Jumeau numérique et l’IdO**

Le concept Jumeau numérique remonte à 2002, lorsque Michael Grieves, de l’université du Michigan aux États-Unis, propose le terme de «jumeau numérique» pour la création d’un centre de gestion du cycle de vie des produits (Product Lifecycle Management ou PLM). Selon le chercheur, un jumeau numérique dénommé en anglais « Digital Twin ou DT » est « un ensemble de constructions d’informations virtuelles qui décrit entièrement un produit manufacturé physique potentiel ou réel, du niveau microatomique au niveau macro géométrique. De manière optimale, toute information qui pourrait être obtenue lors de l’inspection d’un produit manufacturé physique peut être obtenue à partir de son jumeau numérique » (Grieves et Vickers, 2017).

En raison de la complexité des systèmes physiques et processus, il est essentiel de construire un modèle DT réalisable qui peut représenter correctement les conditions réelles associées avec un système physique et assurer une correspondance correcte entre le système physique d’origine et le modèle DT construit. Grieves précise qu’un jumeau numérique «repose sur l’idée qu’une construction informationnelle numérique sur un système physique pourrait être créée comme une entité à part entière. Cette information numérique serait un “jumeau” de l’information

intégré au système physique lui-même et serait lié à ce système physique tout au long du cycle de vie du système » (Grieves et Vickers, 2017).

Ce nouveau paradigme a été largement utilisé pour la modélisation, la simulation et le développement de système pour soutenir la conception ou pour valider les propriétés du système dans l'optimisation de la fabrication des processus et services et dans les prédictions des défaillances, etc. (Tao *et al.*, 2019) et (Detzner *et al.*, 2018), sachant que la technologie de jumeau numérique est un modèle virtuel d'un objet physique, c'est-à-dire le double numérique d'un processus, d'un produit ou de n'importe quel objet. Lorsque cet objet en question est doté de capteurs IdO, cela permet de remonter à la donnée en temps réel. On obtient alors une copie virtuelle du monde physique, qui donne accès à une multitude d'informations sans même se déplacer. Par l'intermédiaire du jumeau numérique, les données offrent un niveau de suivi et de connaissance avancé du produit physique : informations techniques, documentaires et réglementaires, comme son état, un dysfonctionnement ou sa localisation (Al-Ali *et al.*, 2020).

Cette technique a pour tâche d'unifier à la fois un objet d'un lieu physique dans un espace réel à son jumeau numérique dans un espace virtuel et l'ensemble des informations qui relient les deux. Le produit physique, ou encore le lieu, comme une usine qui envoie des flux d'informations provenant de capteurs, de senseurs et de dispositifs électroniques qui mettent à jour le jumeau numérique, ouvrant ainsi la voie à de nombreux services innovants notamment basés sur la simulation .

Le cabinet Gartner prévoit ainsi que « deux tiers des entreprises ayant une stratégie dans l'internet des objets vont exploiter, d'ici à 2022, les technologies de jumeau numérique » (Julien et Martin, 2020).

2.15.2 Coopération Big Data, Lac de données et l'IdO

Le développement massif des objets connectés permet, ainsi, l'émergence de nouvelles technologies comme le jumeau numérique, l'Internet industriel des objets (IIoO) comme sous-domaine de l'IdO, etc. Cela nous amène à comprendre qu'un déluge de données est à prévoir dans les années à venir. Les utilisateurs de réseaux sociaux et l'Internet des objets, pour ne citer que ceux-là, génèrent déjà de grands volumes de données variées qui devront être transmises, enregistrées et traitées à grande vitesse. Selon plusieurs rapports, l'internet des objets est parmi les domaines les plus générateurs de Big Data, mais aussi l'un des domaines à potentiel économique énorme (LAIADI, 2020).

Le Big Data est vu comme un ensemble de données qui ne peuvent pas être perçues, acquises, gérées et traitées par les outils matériels et logiciels traditionnels en un temps tolérable (Chen *et al.*, 2014). Il est caractérisé par les 5V12 : Volume, Vitesse, Variété, Valeur et Véracité (Jaiswal *et al.*, 2020).

- **Volume** : les données sont produites d'une manière significativement plus grande que les systèmes classiques ont l'habitude de gérer.
- **Vitesse** : le rythme de génération des données.
- **Variété** : les données sont générées depuis des sources différentes et ayant des formats divers.
- **Valeur** : la transformation des données massives pour extraire l'information.
- **Véracité** : Elle mesure l'incertitude et l'inconsistance des données.

Les objets génèrent une grande quantité et une variété de données en temps réel qu'on appelle Big Data. Il n'y a pas d'IdO sans Big Data, et le Big Data atteint la position la plus élevée lorsqu'il est utilisé pour l'IdO (Poudel, 2016). À chaque seconde les objets génèrent une masse importante de données hétérogènes, ce qui

fait que contrôler l'accès à ces données est un sujet de préoccupation majeure non encore résolu. Omar a proposé un modèle de contrôle d'accès basé sur la méthode de chiffrement, qui est une technique prometteuse pour contrôler le big data, combinée avec le protocole de micro TESLA³ pour authentifier les données en temps réel.

Bansal et al., dans leur article, analysent les travaux académiques de pointes en matière de gestion de l'IdO et du Big Data dans divers domaines. Ils proposent une taxonomie pour la gestion de l'loTBD. Ensuite, ils explorent le portefeuille IdO des principaux fournisseurs de cloud et fournissent une classification des services des fournisseurs pour l'intégration de l'loT et de l'loTBD sur leurs plateformes cloud. Ils ont identifié les défis de «l'loTBD» et parle de «l'loTBD» comme « Big Data 2.0 » (Bansal *et al.*, 2020)

Au niveau de l'IdO, les données de toutes sortes sont générées par les objets à la seconde, le volume de ces données stockées au niveau du Big Data a donné naissance au nouveau concept « Lac de Données », ce dernier est basé sur des technologies à faibles coûts tout en permettant : la capture, le raffinement, l'archivage et l'exploitation des données brutes au sein de l'entreprise. Il regroupe des données brutes non structurées ou multi structurées, qui ont dans la plupart du temps une valeur non encore connue par l'entreprise » (Fang, 2015).

L'idée du lac de données a été initiée par le PDG⁴ de Pentaho, James Dixon. Selon l'auteur, si un entrepôt de données ou un magasin de données est comme une bouteille d'eau nettoyée et prête à être consommée, alors "Data Lake" est un lac entier de données qui est nettoyé pour être prêt à l'emploi (Dixon, 2010).

3. Timed Efficient Streaming Loss-tolerant Authentication

4. Président Directeur général

La littérature a décrit le Lac de Données comme étant « un entrepôt de stockage de données hétérogènes brutes et structurées qui proviennent de sources diverses (locales ou externes à l’organisation), ces données sont stockées dans leur format natif, et le traitement de ces données est effectué selon différents besoins, les accès aux données sont disponibles aux différents utilisateurs (scientifiques de données, analystes de données, professionnels de la BI⁵) pour des fins d’analyse statistique, d’apprentissage automatique, etc.» (Hassan *et al.*, 2022).

La logique de base du Lac de données est simple, c’est-à-dire que toutes les données émises par l’organisation seront stockées dans une structure de données unique appelée Lac de données. Les données seront stockées dans le lac dans leur format d’origine. Le prétraitement et la transformation des données en entrepôts de données seront éliminés. Les coûts initiaux de l’intégration de données peuvent également être réduits. Une fois les données placées dans le lac, elles sont disponibles pour analyse par tous les membres de l’organisation (Khine et Wang, 2018).

Huang et al., ont proposé un système turbocompressé de mégadonnées pour une gestion efficace des données IdO à partir d’une architecture issue du lac de données. Ils ont présenté une méthode d’intégration de données parallèles multi-threading pour intégrer en parallèle les données de différentes sources d’IdO. Toutes les données générées par une organisation, quels que soient leurs types, structures ou formats, sont archivées dans un environnement interactif unifié basé sur SQL pour permettre l’exploration des données d’IdO en tirant parti de la capacité de traitement d’Apache Spark (Huang *et al.*, 2021).

5. Business Intelligence

2.15.3 **Coopération Cloud Computing et l'IdO : le duo incontournable**

Les écrits nous disent que l'IdO génère de nombreuses données et les services Cloud Computing ouvrent la voie à la circulation de ces données. Qu'est-ce que le Cloud Computing ou informatique en nuage ?

C'est une infrastructure dans laquelle la puissance de calcul et le stockage sont gérés par des serveurs distants auxquels les usagers se connectent via une liaison Internet sécurisée. Cette infrastructure a été proposée en 1961 par John McCarthy dans un discours au MIT selon lequel "l'informatique peut être vendue comme un service public, comme l'eau et l'électricité" (Elwessabi, 2014). Ensuite, ce concept est apparu comme un nouveau paradigme informatique qui vise à fournir des environnements informatiques fiables, personnalisés et dynamiques axés vers une meilleure qualité de service et disponibilité de l'infrastructure (Elwessabi, 2014).

En 2002, Amazon⁶ a lancé Amazon Web Services (AWS), pour le le stockage et le calcul sur Internet. En 2006, Amazon lance Elastic Compute Cloud Commercial Service, accessible à tous. Après cela, en 2009, vient Google Play, ainsi que Microsoft lance Microsoft Azure. D'autres sociétés comme Alibaba, IBM, Oracle, HP présentent également leurs services Cloud. De nos jours, le Cloud Computing est devenu une compétence très populaire et importante.

Stergiuo et al., ont présenté une enquête sur l'IdO et le Cloud Computing qui met l'accent sur les problèmes de sécurité de ces deux technologies. Plus précisément, ils ont combiné les deux technologies susmentionnées afin d'examiner les caractéristiques communes et de découvrir les avantages de leur cohabitation. Ils présentent de manière détaillée la contribution du Cloud Computing à la techno-

6. <https://www.geeksforgeeks.org/history-of-cloud-computing/>

logie IdO, et comment la technologie Cloud Computing améliore la fonctionnalité de l'IdO (Stergiou *et al.*, 2018).

Il existe multiples défis ouverts dans le domaine de la gestion et de l'analyse du Big Data industriel basé sur l'IdO dans des environnements Cloud, ces défis proviennent surtout dans des domaines d'apprentissage automatique dans les infrastructures Cloud, A.I. Les auteurs Stergiou et Psannis ont proposé un système intelligent de jumeau numérique pour l'internet industriel de gestion et l'analyse de données volumineuses basées sur les objets dans le cloud. Selon ces auteurs, «les données IdO pourraient être intégrées à des techniques d'apprentissage afin de réaliser un scénario de jumeau numérique, pour la représentation virtuelle du Big Data industriel basé sur les données de températures des machines et des pièces d'IdO» (Stergiou et Psannis, 2022).

Park, dans son article, parle de l'informatique du futur (FC) qui est une technologie de l'Internet des objets du monde réel sur le cloud computing. Le terme informatique du futur est utilisé pour englober le cloud, les mégadonnées et les centres de données cloud qui sont les mégatendances de l'industrie informatique (Park, 2018).

Aazam et al., parlent de l'omniprésence de l'Internet des objets. De ce fait, ils proposent d'intégrer l'IdO au cloud computing en raison de la quantité de données que génère l'IdO et des possibilités d'utilisation des technologies virtuelles comme le Jumeau numérique ainsi de la capacité de stockage du cloud (Big data, Lac de données), toutes ces technologies permettent de créer plus d'utilité et de développer des applications plus intelligentes ce qui, permet de créer davantage de services aux utilisateurs. Cette intégration de l'IdO et du cloud computing est appelée « Cloud of Things ». Dans leur article, Aazam et al., exposent les problèmes clés ainsi que leurs solutions potentielles à l'intégration de ces deux

technologies à savoir, l’IdO et du cloud computing (Aazam *et al.*, 2014).

2.16 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons effectué une revue de littérature portant principalement sur la définition des villes intelligentes et l’IdO. Ensuite, nous avons présenté quelques enjeux de coévolutions existant entre les deux. De plus, nous avons présenté quelques projets déjà réalisés sur les villes intelligentes et les plateformes d’intégration de données d’IdO. Parmi les projets réalisés, on peut citer ceux de STAR-CITY et de SmartSantande, d’OpenIoT. Aussi, nous nous sommes focalisés sur le rôle qu’un middleware pourrait jouer au niveau de l’interopérabilité des applications IdO.

En effet, les travaux de Bandyopadhyay *et al.*, nous ont montré l’importance qu’un middleware pourrait avoir pour l’IdO. Pour l’IdO le middleware agit comme un lien joignant les domaines hétérogènes des applications qui communiquent sur des interfaces hétérogènes. Dans leur article, ils ont présenté une architecture en couche de leur solution middleware, (Bandyopadhyay *et al.*, 2011). Les travaux de Chaqfeh et Mohamed., nous donnent une liste des principaux défis techniques qui doivent être traités par les solutions middleware pour l’IdO comme : l’interopérabilité, l’évolutivité, la fourniture d’abstraction, l’interaction spontanée, l’infrastructure non fixée, la multiplicité, etc. (Chaqfeh et Mohamed, 2012).

Batty nous dit que deux grandes dimensions de la ville intelligente sont à prioriser : la dimension sociale et la dimension numérique (Batty, 2012). Nous avons rencontré cette même dimension sociale chez l’auteur Atzori, ce dernier nous dit que l’objet est social dans la mesure où il est le produit des rapports de personnes au sein d’un regroupement, il doit son existence sociale par l’appropriation d’un groupe quelconque (Atzori *et al.*, 2012).

CHAPITRE III

ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES MULTIAGENTS (SMA)

3.1 INTRODUCTION

L'intelligence artificielle distribuée (IAD) a proposé de nombreuses solutions à des problèmes industriels. La recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée a porté principalement sur trois domaines différents : l'intelligence artificielle parallèle (IAP), la résolution distribuée des problèmes (RDP) et les systèmes multi-agents (SMA). L'IAP fait principalement référence aux méthodologies utilisées pour faciliter les techniques classiques de l'intelligence artificielle. Elle est souvent appliquée à des architectures matérielles distribuées. L'IAP se concentre sur l'augmentation de la vitesse d'opération et le fonctionnement des threads parallèles afin de parvenir à une solution globale pour un problème particulier.

La RDP examine comment un problème peut être résolu en partageant les ressources et les connaissances entre un grand nombre de modules coopérants (entités informatiques). Dans la résolution de problèmes distribuée, la communication entre les entités informatiques et la quantité d'informations partagées sont prédéterminées et intégrées dans la conception de l'entité informatique. Les systèmes multiagents traitent du comportement des entités informatiques disponibles pour résoudre un problème donné. Un système multiagents peut être défini comme un réseau d'agents individuels qui partagent des connaissances et communiquent

entre eux afin de résoudre un problème qui dépasse le cadre d'un seul agent, (Balaji et Srinivasan, 2010a). Alors que, l'intelligence artificielle classique modélise le comportement intelligent d'un seul agent, l'IAD permet de passer du comportement individuel aux comportements collectifs afin de pouvoir résoudre non seulement des problèmes complexes, mais aussi de distribuer l'intelligence sur plusieurs entités ou agents (Drogoul, 1993).

Dans ce chapitre, une brève étude des systèmes multi-agents est présentée. L'objectif est de fournir une référence rapide facilitant la conception de systèmes multi-agents. Cet objectif se justifie par le fait que notre hypothèse vient du fait « qu'une solution basée sur les mécanismes des systèmes multi-agents pourrait simplifier la communication entre les applications d'IdO ».

3.2 Les systèmes multiagents

La figure 3.1 présente une vue globale d'une situation imagée d'un système multi-agents. Selon Ferber, ces systèmes portent sur la résolution distribuée de problèmes qui divise le problème en sous-problèmes pour trouver un moyen de partager la connaissance de ce problème afin d'obtenir une solution, (Ferber, 1996). Les SMA privilégient une approche décentralisée en modélisant les comportements intelligents des agents, (Weiss, 1999).

D'une manière générale, un système multiagents (SMA) peut être défini comme un ensemble d'agents qui se trouvent dans un environnement commun et qui interagissent selon une certaine forme d'organisation. Selon Ferber, un SMA est composé des éléments suivants :

- 1) Un environnement, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- 2) Un ensemble d'objets, dont chacun à un moment donné est associé à une

position dans l'environnement. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.

- 3) Un ensemble d'agents, qui sont des objets particuliers représentant, les entités actives du système.
- 4) Un ensemble de relations qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- 5) Un ensemble d'opérations qui permettent aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets.
- 6) Des opérateurs chargés de représenter l'application des opérations et leurs effets sur l'environnement. Ces opérateurs modélisent les lois de l'univers.

Pour mieux décrire les SMA, Ferber met l'accent sur deux points fondamentaux à savoir :

- un système doit être composé de plusieurs agents autonomes qui ont un but ou tous les agents peuvent fonctionner en parallèles.
- les agents doivent disposer d'une composante permettant les interactions avec d'autres agents, comme un protocole de communication (Ferber, 1995).

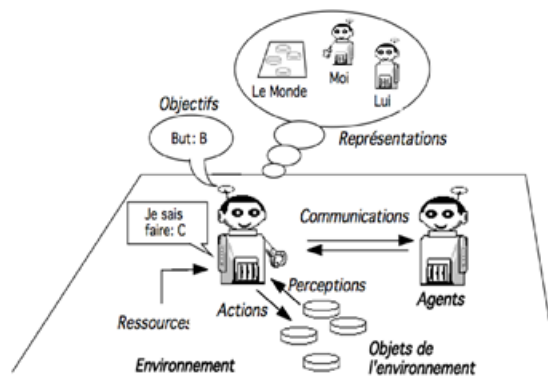


Figure 3.1 Représentation imagée d'un système multiagents (Ferber, 1995).

3.3 Les composantes principales d'un système multiagent

3.3.1 Les agents

3.3.1.1 Définitions

Plusieurs définitions ont été avancées pour le concept d'agent. Selon Ferber, un agent est une « entité physique ou virtuelle, capable d'agir dans son environnement, qui peut communiquer directement avec d'autres agents, qui possède des ressources propres, qui est capable d'agir dans son environnement, qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement, qui possède des compétences et des offres de services, qui peut éventuellement se reproduire, en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit. » (Ferber, 1995).

Pour Russell et Norvig, un agent est « toute entité qui peut être considérée comme percevant son environnement grâce à des capteurs et qui agit sur celui-ci via des effecteurs. » (Russell et Norvig, 1995). Les éléments fondamentaux autour de tout système multiagents tournent autour des agents eux-mêmes, c'est-à-dire, leurs typologies, leurs architectures, leurs modes d'organisations, leurs interactions, leurs environnements ainsi que leurs stratégies de coordination.

3.3.1.2 Caractéristiques d'un agent

La proactivité est une autre propriété qui différencie l'agent des objets. Il est généralement admis qu'un agent intelligent est un logiciel qui comprend les caractéristiques suivantes :

- Autonome - être indépendant, non contrôlé de l'extérieur.
- Situé - exister dans un environnement.

- Proactif - poursuivre constamment ses objectifs.
- Réactif - réagir (en temps voulu) aux changements de son environnement.
- Robuste - récupérer de l'échec.
- Social - interagir avec d'autres agents.
- Flexible - se plier aux diverses circonstances, aux influences, plusieurs façons d'atteindre ses objectifs.
- Capable d'inférer (de raisonner) : pouvoir agir sur des spécifications de tâches abstraites.
- Capable de communiquer : communiquer avec d'autres agents.
- Potentiellement mobile : pouvoir se déplacer, possibilité de migrer de manière autonome d'une plateforme hôte à une autre.
- Potentiellement personnifié : manifester les attributs, caractère d'un humain crédible.
- Temporellement continu : persister sur l'identité et de l'état sur de longues périodes.

Outre ces propriétés, il en existe d'autres comme la rationalité chez l'agent. Pour atteindre certains objectifs, il est peut être nécessaire que les agents soient rationnels. C'est-à-dire, d'opter de raison, ce qui permettra à l'agent d'être non seulement plus intelligent, mais aussi de pouvoir résoudre des situations conflictuelles. (Jennings et Wooldridge, 1998) et (Abuarafah *et al.*, 2013).

3.3.1.3 Typologies d'agents

Il existe différentes catégories d'agents ainsi que différents types de comportements propres à chaque catégorie d'agent. Les deux catégories d'agents les plus populaires sont : les agents réactifs et les agents cognitifs. Il est à noter qu'on peut toujours avoir recours à des agents qui possèdent des caractéristiques des deux catégories (agents hybrides).

Pour les agents réactifs Brooks, nous dit que la représentation de l'environnement de ces agents vient seulement de leurs perceptions à l'instant même et qu'il n'existe aucun raisonnement chez ces agents, (Brooks, 1991). Ces types d'agents permettent la construction de systèmes composés de nombreux petits agents, comme des automates. Les agents cognitifs, quant à eux, possèdent une représentation symbolique de l'environnement sur lequel ils peuvent raisonner. On peut compter plusieurs sous-types d'agents cognitifs comme : des agents intelligents, des agents coopératifs, etc.

D'autres types d'agents sont apparus au fil des années comme :

Les agents collaboratifs, ce sont des agents cognitifs, ils sont dotés de capacité leur permettant de négocier avec d'autres agents ou utilisateurs et ils peuvent aussi apprendre.

Les agents mobiles, ils proviennent directement du domaine des réseaux. Ces agents sont autonomes et auto-adaptables ; ils sont capables de se déplacer dans le réseau. Ils ont la possibilité de migrer d'un site à un autre et de suspendre ou changer leur comportement selon les événements et les circonstances qu'ils rencontrent (Azzouzi *et al.*, 2010).

3.3.1.4 Architecture interne des agents cognitifs

Dans la littérature, on parle souvent de trois grandes catégories d’architectures d’agents qui sont BDI¹, ACT-R², IDA³, LIDA⁴, CTS⁵, etc. ACT-R est une architecture cognitive créée et maintenue par J. R. Anderson depuis 1998. Cette architecture est une évolution de la théorie cognitive ACT de J. R. Anderson développée dans les années 70, sur laquelle il ajoute le concept de la rationalité inhérente à la cognition humaine (Anderson et Bower, 2014). ACT -R a pour but de définir ces opérations atomiques afin de créer des systèmes décisionnels s’approchant de la cognition humaine, en termes de raisonnement et de prise de décision.

ACT-R distingue trois types de structures de mémoire : mémoire déclarative, mémoire de procédure et mémoire de travail. Dans l’architecture ACT-R, toute connaissance commence comme une information déclarative ; la connaissance procédurale est apprise en faisant des déductions à partir de connaissances factuelles déjà existantes. ACT-R prend en charge trois types d’apprentissage : la généralisation, dans laquelle les domaines d’application sont plus vastes, la discrimination, dans laquelle les productions se rétrécissent, et le renforcement, dans lequel certaines productions sont appliquées plus souvent. La figure 3.2 nous présente les trois types de mémoire de l’architecture ACT-R (Anderson *et al.*, 2004).

-
1. Deliberative agent architectures
 2. Adaptive Control of Thought—Rational
 3. Intelligent Distribution Agent
 4. Learning IDA ou Learning Intelligent Dispatch Agent
 5. Conscious Tutoring System

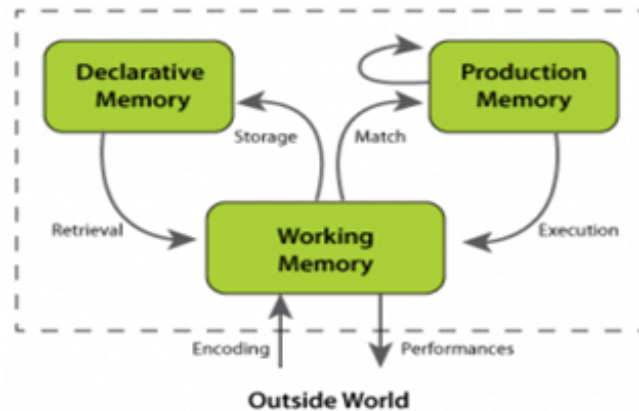


Figure 3.2 Types de mémoires de l'architecture ACT-R (Anderson *et al.*, 2004).

IDA est une architecture tirée d'une théorie psychologique de la conscience appelée atelier global (Global Workspace Theory de Baars). Selon la théorie de Baars et Franklin :

1. l'esprit peut être vu comme une collection de réseaux spécialisés distribués (processeurs) ;
2. la conscience est associée à un atelier global dans le cerveau, une capacité de mémoire éphémère dont le contenu est largement diffusé à de nombreux réseaux spécialisés inconscients ;
3. inversement, l'atelier global sert aussi à intégrer plusieurs réseaux d'entrée compétitifs et collaborateurs ;
4. certains réseaux inconscients, appelés contextes, influencent les contenus conscients ;
5. Les contextes collaborent pour contraindre les événements conscients ;
6. les motifs et les émotions peuvent être vus comme des contextes de buts ;
7. les fonctions supérieures constituent des hiérarchies de contextes de buts.

Le but de IDA est de concevoir des agents logiciels dotés d'un niveau de conscience. La conscience maintient l'aspect séquentiel des décisions de l'agent, ainsi que l'ordre des règles à appliquer, afin d'assurer la cohérence des comportements de l'agent, (Baars et Franklin, 2003)

L'architecture LIDA est le prolongement significatif d'IDA, le projet LIDA (Learning IDA) ajoute plusieurs types d'apprentissage. LIDA est une architecture cognitive large et complète qui tente de modéliser le fonctionnement du cerveau humain. L'architecture LIDA comprend des modules pour la perception, mécanisme de « conscience », basé sur la théorie de l'espace de travail global, de divers types de mémoire, etc. (Franklin, 2000). Le traitement cognitif dans LIDA consiste en des traversées continuellement répétées à travers les étapes d'un cycle cognitif (Baars et Franklin, 2003).

Le cycle cognitif dans l'architecture LIDA peut être présenté en trois parties :

1. La phase de compréhension, qui englobe la perception, l'activation des mémoires et les associations, responsable de créer chez l'agent une représentation symbolique .
2. La phase d'attention, ou la conscience, qui manipule les représentations symboliques et se focalisant sur les données sensorielles identifiées comme liées à ces représentation, afin d'activer l'apprentissage à partir des différentes mémoires.
3. La phase d'action et d'apprentissage, qui sélectionne le comportement le plus adapté en réalisant l'apprentissage via les actions sur l'environnement interne de l'agent.

CTS, de l'anglais « Conscious Tutoring System », est une architecture dédiée pour un système tutoriel avec une conscience dite d'accès. Dubois et al., ont élaboré cette architecture à partir du modèle IDA, et plus particulièrement LIDA (Dubois *et al.*, 2008).

De ce fait, l'architecture CTS dispose du même cycle cognitif que l'architecture IDA et est aussi basée sur la même théorie de Baars (Baars *et al.*, 1997). La principale différence entre CTS et IDA est que CTS a été conçu pour être un agent tutoriel, c'est-à-dire un agent spécialisé dans la formation d'apprenant. Pour cela, la dimension émotionnelle est utilisée, et cette notion est fortement liée à la cognition, et donc à la conscience⁶ d'accès dans cette architecture.

La figure 3.3 présente le cycle cognitif volontairement simplifié de l'agent, il comporte huit étapes qui ont été numérotées selon les routes décisionnelles : Les stimuli sont perçus par les mécanismes (1) de perception. Les percepts deviennent (2) une partie de la mémoire de travail tandis que la mémoire déclarative (3) récupère des informations correspondantes. S'engage alors une compétition (4) pour l'accès à la conscience au sein de la mémoire de travail, puis la conscience d'accès diffuse (5) la plus forte. Ensuite les ressources comportementales (comme les codelets sont appelés (6), puis sélectionnés (7) afin d'en exécuter (8) les actes définis (Grouls, 2013).

6. Ici la conscience d'un agent est vue comme un mécanisme qui lui permet d'avoir une compréhension de son existence, d'avoir une représentation de lui-même.

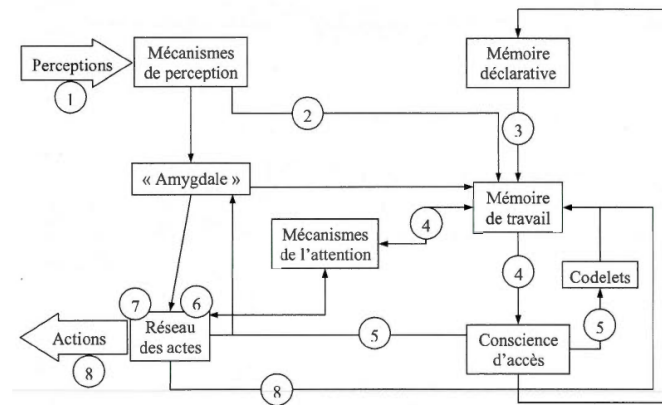


Figure 3.3 Cycle cognitif simplifié de CTS (Grouls, 2013).

L'architecture BDI permet aux agents de mieux s'adapter à l'environnement en prenant en compte tous les types de changement en fonction de leurs croyances qui forment le modèle que l'agent se fait de son environnement ; c'est l'ensemble des faits qu'il présume vrais. Ses désirs sont l'ensemble des options (désirables) qui s'offrent à l'agent. Ses intentions sont l'ensemble des options que l'agent a décidé de poursuivre sur son environnement (Taillandier *et al.*, 2012).

L'architecture BDI est basée sur trois concepts, qui sont : la croyance, le désir et l'intention. Ces trois concepts déterminent la rationalité particulière de ce type d'agent qu'on peut qualifier d'intelligent, (Bratman *et al.*, 1987). La figure 3.4 montre l'architecture de base d'un agent cognitif BDI⁷.

L'architecture est composée de quatre bases de données, qui sont les plans, les croyances, les intentions et les désirs :

Plans : Ils comportent la vision stratégique de l'agent, c'est-à-dire qui comporte l'ensemble des plans stratégiques que peut suivre l'agent. Il est composé de 3 élé-

7. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00742874>

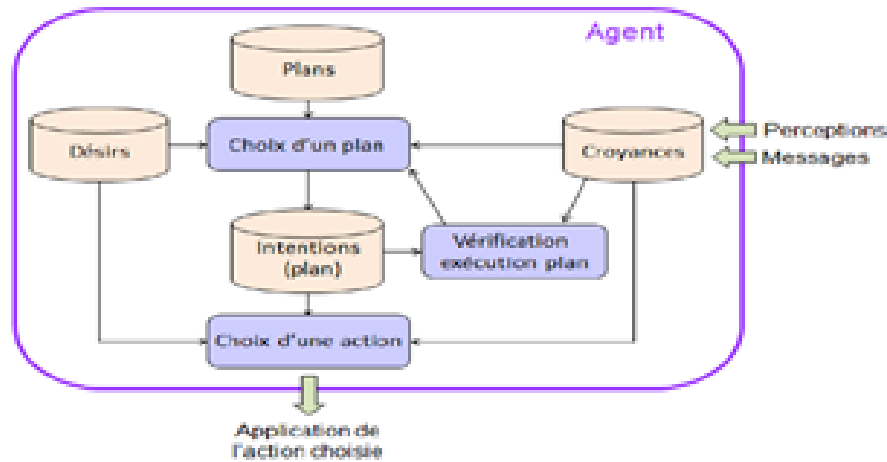


Figure 3.4 Architecture BDI d'un agent (Taillandier *et al.*, 2012).

ments de base : Ensemble de séquences d'actions, Règles d'exécution des actions, Règles de mise à jour du plan.

Croyances : Les croyances de l'agent concernent le fonctionnement du système, les actions que l'agent va entreprendre. Ces croyances englobent aussi une fonction de révision de croyances, qui prend une entrée perceptuelle et les croyances actuelles de l'agent pour déterminer un nouvel ensemble de croyances, etc.

Intentions : Les intentions correspondent au plan choisi. Quand un agent acquiert de nouvelles informations (par ses propres moyens de perception ou par des messages envoyés par d'autres agents), il met automatiquement à jour sa base de croyances. Lorsque l'agent n'a pas de plan à exécuter, la base d'intentions est vide.

Désirs : Les désirs de l'agent sont formalisés sous la forme d'un ensemble de critères qui seront utilisés pour évaluer les plans.

Comme toute entité autonome, ces agents se dotent de différents types de comportements : réactif ou réflexe et téléonomique. Pour le comportement réactif, il

est le plus simple dans la mesure où l'action provient d'un stimulus, sans raisonnement, mais elle est exécutée en fonction d'une règle que l'agent possède ou peut apprendre. Tandis que le téléonomique est en totale opposition avec le comportement réactif; il découle directement d'un objectif à atteindre par l'agent, de son intention, de sa finalité. C'est-à-dire que l'agent a une perception provoquée par un stimulus, et qu'avant d'agir il raisonne pour prendre d'autres informations venant des autres agents ou de son environnement. La figure 3.5 montre comment un agent qui s'adapte en fonction de ses croyances, intentions ou désirs peut interagir sur son environnement grâce à ses capteurs et ses réflecteurs.

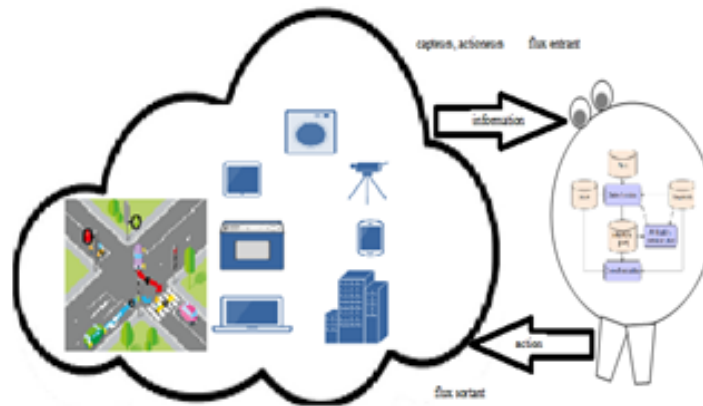


Figure 3.5 Agent peut être adapté et agi aux différentes applications IdO

Un agent acquiert des informations au moyen de sa perception ou par des messages envoyés par d'autres agents qui lui permettent de mettre à jour sa base de croyances. Quand l'agent n'a pas de plan à exécuter, il commence par évaluer chacun des plans disponibles selon ses désirs et ses croyances. Il sélectionne ensuite un plan par le biais d'un processus de décision multicritères basé sur la théorie des fonctions de ses croyances. Ce plan est ensuite entré dans la base des intentions. L'agent dispose ainsi d'une vision stratégique de son comportement qui va lui permettre d'exécuter des actions en fonction du contexte, c'est-à-dire ses croyances,

ses désirs et l'état de son environnement à tout moment, le plan sélectionné peut être remis en cause à travers un processus de vérification de plan. Ce processus de vérification de plan est basé sur la définition du plan (qui doit stipuler des conditions de remise en cause) et des croyances de l'agent. Les agents ne sont pas limités à des capteurs ou à des actionneurs particuliers. L'idée principale est de développer des applications (agents) qui perçoivent les données de capteur d'un périphérique quelconque et d'effectuer des actions vers des actionneurs d'un autre périphérique.

Il existe plusieurs autres architectures cognitives à travers la littérature comme : les modèles en couches, l'architecture neuromimétique, pour ne citer que cela.

Les modèles en couches (le modèle horizontal et vertical) sont très simples en termes de conception : les percepts arrivent et sont traités par différentes couches pour ensuite sortir sous forme d'actions., le plus célèbre est celui de Ferguson, appelé *TouringMachine* (Ferguson, 1992).

L'architecture neuromimétique, est une architecture qui a été implémentée à l'aide de réseaux de neurones artificiels qui sont des approximateurs universels de fonctions. Ils sont constitués d'unités de calcul (les neurones formels) qui communiquent entre elles via des connexions (Bougrain et Boniface, 2000).

3.3.2 L'environnement

L'environnement pour un système multiagents désigne l'univers virtuel dans lequel les agents évoluent. Cet environnement se résume à tout ce qui entoure les agents, c'est-à-dire les objets et d'autres agents. La nature d'un problème influence grandement la description d'un environnement SMA. Russell et Norvig parlent d'un ensemble de propriétés importantes d'un environnement SMA comme :

L'environnement physique correspond à tous les objets que l'agent peut percevoir

ou sur lesquels il peut réagir. Par exemple, si on suppose qu'une fourmi est un agent, son environnement physique est alors composé de L'environnement social correspond aux agents avec lesquels un agent est en interaction. Par exemple, l'envoi de messages entre les agents.

Pour l'environnement observable, l'agent peut percevoir l'intégralité de son environnement nécessaire à la prise de décisions. L'environnement peut être aussi partiellement observable, c'est-à-dire que l'agent perçoit une information partielle. Par exemple, l'environnement d'un échiquier est observable, vu que son état complet est accessible. Tandis que, lors d'un voyage en autobus, le pays traversé n'est que partiellement observable.

L'environnement peut être continu ou discret, c'est-à-dire capable de passer d'un état à un autre tout en nécessitant une séquence d'états intermédiaires (continu). Pour un environnement discret le nombre d'actions et leurs perceptions sont fixes et finies. Selon Russell et Norvig, la conduite d'un taxi se réfère à un environnement continu, tandis qu'un jeu d'échec est un exemple d'un environnement discret, (Russell et Norvig, 1995).

Dans l'environnement déterministe, un agent peut déterminer le prochain état de l'environnement suivant l'état courant et des actions planifiées. Donc, une même action posée aura toujours le même effet.

Pour l'environnement dynamique, les propriétés sont susceptibles d'être modifiées à n'importe quel moment, plus l'agent a accès à l'environnement, plus il sera capable de prendre la meilleure décision. D'une manière générale, on peut dire que les environnements complexes sont des environnements partiellement observables, non déterministes, dynamiques, continus et les caractéristiques de l'environnement ont une incidence sur la conception de l'agent, (Helleboogh *et al.*, 2007).

3.4 CARACTÉRISTIQUES DES SYSTÈMES MULTIAGENTS

3.4.1 Interaction

L'interaction est l'une des notions fondamentales dans un système multiagents. Ferber nous dit «qu'une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par l'intermédiaire d'actions réciproques» (Ferber, 1995). Le cas des ressources partagées entre les agents du dîner des philosophes orientaux est typique pour expliquer une des formes d'interaction entre les agents :

« Cinq philosophes orientaux partagent leur temps entre l'étude et la venue au réfectoire pour manger un bol de riz. La salle ne comprend qu'une table ronde sur laquelle sont disposés cinq bols de riz, et cinq baguettes »(Olsson et Keen, 2004). La figure 3.6 nous montre la table des philosophes de Dijkstra.



Figure 3.6 Table des philosophes Dijkstra (Olsson et Keen, 2004).

Une modélisation du problème des philosophes orientaux est présentée à la figure 3.7. Dans cet exemple, la place f_i représente le fait que l' i ème philosophe a faim,

il ne mange pas. M_i signifie qu'il est en train de manger et B_i indique que l' i -ème baguette est utilisée. Dans ce cas, les philosophes 1 à 4 sont en train de manger, les autres patientent et la baguette 2 est inutilisée.

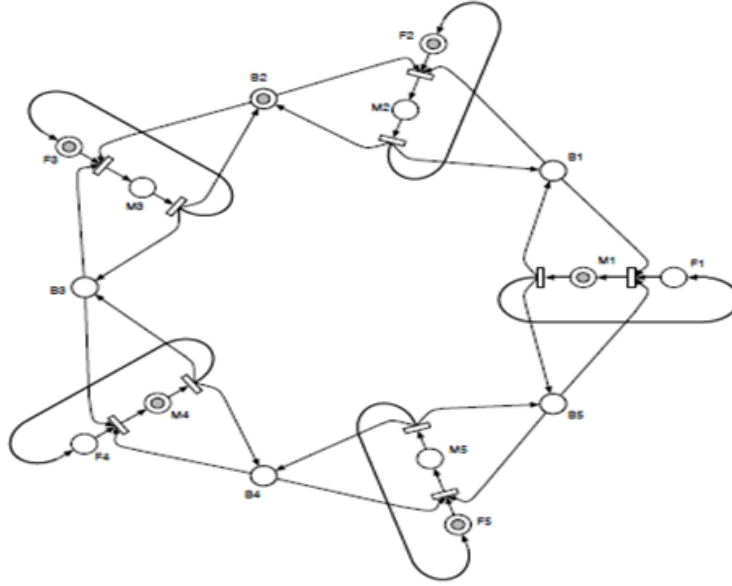


Figure 3.7 Pétri table des philosophes (Besharati et Khameneh, 2021).

Ainsi, le philosophe qui prend les deux baguettes autour de son bol empêche son voisin affamé de s'en emparer. C'est-à-dire, ce dernier devra attendre que l'autre baguette soit disponible. Les baguettes sont considérées comme étant des ressources partagées qui permettent l'interaction entre les philosophes (qui peuvent être considérés comme des agents) de la table. Dans ce cas, on parle d'interaction entre les agents, mais pas de communication, à moins que les philosophes se soient mis d'accord sur un protocole d'utilisation de baguettes communes.

D'une manière générale, il existe deux formes d'interactions :

1. L'interaction indirecte qui s'effectue par l'intermédiaire d'un autre agent ou de l'environnement.

2. L'interaction directe qui s'effectue au moyen de communication afin de permettre un échange de messages entre les agents suivant un protocole de communication.

Les messages sont régis par un langage de communication, indépendant du langage de programmation, de la plateforme utilisée pour l'implémentation des agents. Voir la section 3.6 pour plus d'explication sur la communication dans les systèmes multi-agents.

3.4.2 Coopération

On parle de coopération entre agents dans un environnement si et seulement si (1) les agents interagissent entre eux et (2) ils sont dotés de buts. Dans un environnement SMA coopératif, les agents possèdent un modèle, ils tiennent compte les uns des autres pour déterminer leurs comportements. Les activités conjointes des agents donnent au SMA un comportement global. Très souvent la coopération implique une coordination (Legras 2016). C'est la forme de coopération qui nécessite une coordination d'actions qui nous intéresse le plus, on laisse de côté des coopérations neutres et de compétitions. Selon Ferber, avec «cette forme de coopération les agents ayant des objectifs distincts mais dépendants des autres peuvent satisfaire leurs objectifs et accomplir leur tâche en tirant partie de cette dépendance». La figure 3.8 nous montre deux agents qui réalisent un empilement de cubes en déplaçant un cube à la fois.

Les auteurs Balaji et Srinivasan proposent une liste non exhaustive de quelques caractéristiques importantes d'un agent :

Autonomie : Il s'agit de la capacité d'un agent à choisir ses actions sans l'intervention externe d'autres agents du réseau ou d'interférences humaines. Cet attribut protège les états internes de l'agent contre l'influence externe. Il isole l'agent de

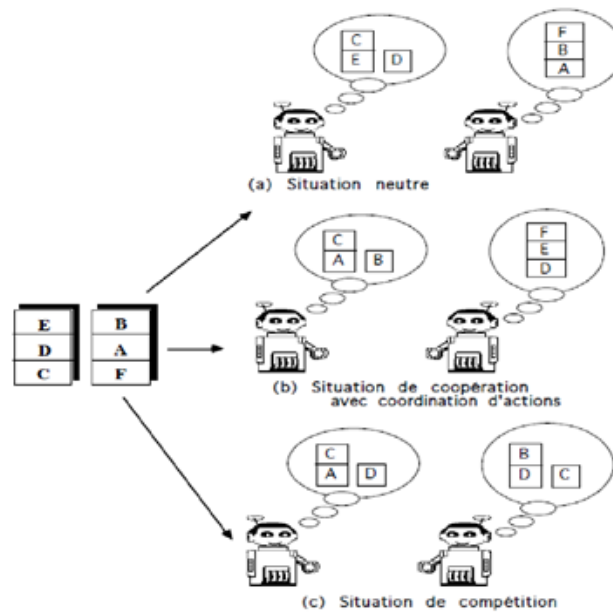


Figure 3.8 Exemple de coopération d'agents de Ferber (Ferber, 1995).

l'instabilité causée par des perturbations externes.

Capacité inférentielle : il s'agit de la capacité d'un agent à travailler sur des spécifications d'objectifs abstraites, telles que la déduction d'une observation en généralisant les informations. Cela pourrait être fait en utilisant le contenu pertinent des informations disponibles.

Proactivité : l'agent doit faire preuve d'une bonne réaction face à un comportement opportuniste. Ceci dans le but d'améliorer les actions qui sont dirigées vers un objectif plutôt que de simplement réagir à un changement spécifique de l'environnement. Il doit avoir la capacité de s'adapter à tout changement dans l'environnement dynamique.

Comportement social : même si la décision de l'agent doit être dépourvue d'intervention externe, il doit néanmoins être en mesure d'interagir avec les sources externes lorsque le besoin se fait sentir afin d'atteindre un objectif spécifique. Il

doit également pouvoir partager ces connaissances et aider les autres agents du SMA à résoudre un problème spécifique, (Balaji et Srinivasan, 2010b).

3.4.3 Collaboration et coordination chez les agents

La collaboration et la coordination sont des formes d'interaction entre les agents. La collaboration indique comment répartir les tâches entre plusieurs agents. Une collaboration entre agents dans un environnement existe si et seulement si (1) les agents coopèrent et (2), ils sont dotés de buts communs. Dans les SMA, on parle souvent d'un ensemble d'agents collaboratifs comme pour un sport collectif une équipe de football (Séguran, 2004).

La coordination, quant à elle, analyse la manière dont les actions des agents doivent être organisées dans le temps et l'espace, de manière à atteindre les objectifs. On parle de coordination dans un ensemble d'agents, s'il existe dans un premier temps de l'interaction chez ces agents et au moins l'une de ces interactions prend la forme de transmission d'information dans un langage articulé ou par d'autres codes. Crish explique la coordination via les abeilles qui utilisent les mouvements de leurs corps pour indiquer à leurs congénères la position de sources de nourriture. Il a fallu du temps avant de comprendre que ces étranges danses constituent un véritable langage (Crist, 2004). La coordination peut être vue comme une notion liée aux capacités cognitives des agents, un simple transfert d'information dans le cas des abeilles.

3.4.4 Architecture interne SMA (Homogène/Hétérogène)

On parle d'homogénéité dans les systèmes multi-agents quand les agents sont uniquement construits sur le même modèle et la même architecture. On rencontre ce type de système généralement dans le cas des agents réactifs. Tous les agents formant le système multiagents ont la même architecture interne. Selon Hsia et So-

derstrand, l'architecture interne fait référence aux objectifs locaux, aux capacités des capteurs, aux états internes, au mécanisme d'inférence et aux actions possibles (Hsia et Soderstrand, 1996). Tandis qu'un système multi-agents est qualifié d'hétérogène lorsqu'il est composé d'agents différents au niveau de leurs modèles et de leur granularité (Raje *et al.*, 2002). Une architecture hétérogène permet de rapprocher les applications de modélisation du monde réel. Chaque agent peut avoir différents objectifs locaux qui peuvent être en contradiction avec ceux d'autres agents (Lajunen *et al.*, 1999).

3.4.5 SMA ouvert/fermé

Un système multi-agents peut être ouvert ou fermé. Le SMA est dit ouvert quand il permet l'ajout et le retrait d'éléments de manière dynamique, c'est-à-dire les agents y entrent et en sortent librement, par exemple une station de service avec des véhicules. À l'inverse d'un système fermé, l'ensemble des agents reste le même. Par exemple, un match de football (Vercouter, 2001).

3.5 Organisation globale des agents dans un SMA

3.5.1 Organisation hiérarchique

Selon Damba, l'organisation hiérarchique est l'une des premières conceptions organisationnelles de systèmes multiagents. L'architecture hiérarchique a été appliquée à un grand nombre de problèmes distribués. Dans l'architecture hiérarchique des agents, les agents sont disposés dans une structure typique en forme d'arborescence. Les agents de l'arborescence ont différents niveaux d'autonomie. Les données des niveaux inférieurs de la hiérarchie sont généralement transmises aux agents ayant une hiérarchie supérieure. Le signal de commande ou les signaux de surveillance passent d'une hiérarchie supérieure à une hiérarchie inférieure. La figure 3.9 présente l'architecture hiérarchique des agents sur trois (3) niveaux

(Damba, 2010) et (Balaji et Srinivasan, 2010a).

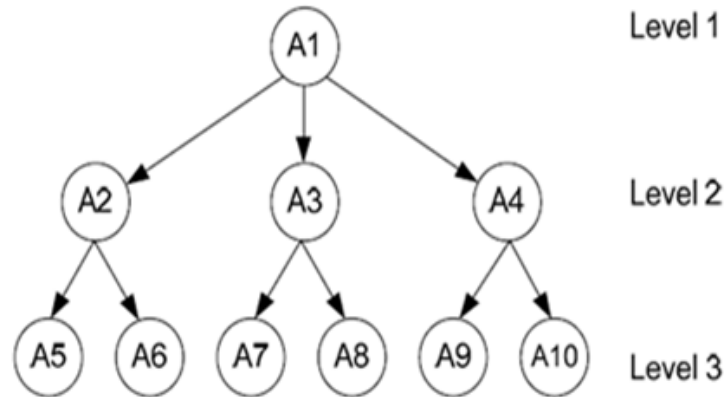


Figure 3.9 Architecture hiérarchique des agents (Balaji et Srinivasan, 2010a).

3.5.2 Hiérarchie simple

Dans une structure de hiérarchie simple, le pouvoir décisionnel est attribué à l'aide d'un seul agent du plus haut niveau de la hiérarchie. Le problème avec une hiérarchie simple est qu'une défaillance ponctuelle de l'agent dans la hiérarchie la plus élevée peut entraîner la défaillance de l'ensemble du système d'agents, (Balaji et Srinivasan, 2010a).

3.5.3 Hiérarchie uniforme

Dans une hiérarchie uniforme, l'autorité est répartie entre les différents agents afin d'accroître l'efficacité, la tolérance aux pannes présentant une dégradation progressive en cas de défaillance mono et multipoints. Les décisions sont prises par des agents disposant des informations appropriées. Ces décisions sont envoyées dans la hiérarchie uniquement en cas de conflit d'intérêt entre des agents appartenant à une hiérarchie différente. Cette structure fait référence à une société démocratique où le pouvoir est réparti entre les institutions et les décisions peuvent être prises

par plusieurs citoyens (agents) en fonction de leurs rôles (Balaji et Srinivasan, 2010a).

3.5.4 Organisation des agents holoniques

Pour expliquer le concept de comportement social de certaines espèces biologiques, Koestler a présenté le concept de Holon. Il a été défini par Koestler « comme une partie d'un tout ou d'une organisation plus large, répondant strictement à trois conditions : être stable, avoir une capacité d'autonomie et être capable de coopérer ». Pour Koestler, l'autonomie veut dire qu'un holon est capable de s'autogérer lorsqu'il est soumis à des sollicitations, afin de réaliser ses tâches. La stabilité se réfère à la capacité d'un holon de faire face et réagir lorsqu'il est sujet à des sollicitations fortes ou à des perturbations. La capacité de coopérer sous-entend qu'un holon est en mesure de coexister avec d'autres holons ou d'autres couches d'holons et est capables de travailler sur des tâches ou des objectifs communs (Mella, 2009), (Koestler, 1967).

Koestler définit un système multiagents holonique à partir d'une série de règles regroupées autour de dix ensembles qu'il appelle « Systèmes Hiérarchiques Ouverts (SHO) ». De ces règles nous avons jugé bon de vous présenter le premier et le quatrième ensemble de règles sur la dualité entre l'autonomie et l'intégration des parties. De ces règles, on peut déduire que dans une organisation holonique, les agents sont agencés selon une organisation hiérarchique, l'organisation en elle-même ne peut être réduite à un super agent ou à une somme d'agents. Cela rejoint l'idée que le tout est plus grand que la somme des parties, ce concept est souvent rencontré dans le domaine des organisations émergentes.

D'autres règles comme la deuxième et la sixième sont relatives à la nature arborescente de l'organisation holonique. L'organisation est constituée de plusieurs hiérarchies imbriquées dont les nœuds sont constitués d'agents holoniques. Chaque

agent holonique peut être responsable d'un ensemble d'agents holoniques (on appelle couche cet ensemble d'agents) (Koestler, 1967).

Dans un système multiagents holonique, un agent apparaît comme une entité unique qui peut être composée de plusieurs sous-agents liés entre eux par des engagements. Chaque holon désigne ou sélectionne un agent principal pouvant communiquer avec l'environnement ou avec d'autres agents situés dans l'environnement. La sélection de l'agent principal est généralement basée sur la disponibilité des ressources, la capacité de communication et l'architecture interne de chaque agent (Balaji et Srinivasan, 2010a).

Dans un système multiagents d'architecture homogène, la sélection peut être aléatoire et une stratégie de rotation similaire à celle utilisée avec les réseaux de capteurs distribués sans fil pourrait être utilisée. Pour une architecture hétérogène, la sélection est basée sur les connaissances de l'agent. Les holons se regroupent pour former une structure cohérente. Ils forment des super holons (Leitao *et al.*, 2009). La figure 3.10 présente un exemple de l'architecture du système hiérarchique de SOHTCO. Elle nous montre que « Les agents experts sont regroupés en couches, supervisés par les responsables de poste. Chaque sous-ensemble communique par l'intermédiaire de ses agents exécutants : l'émetteur et le récepteur. Toutes les couches sont au même niveau hiérarchique, mais le holon situé en haut de la figure est bien 'holarchiquement' supérieur à tous les holons du système (il possède un niveau d'abstraction des connaissances plus élevé) » (Adam *et al.*, 2002b).

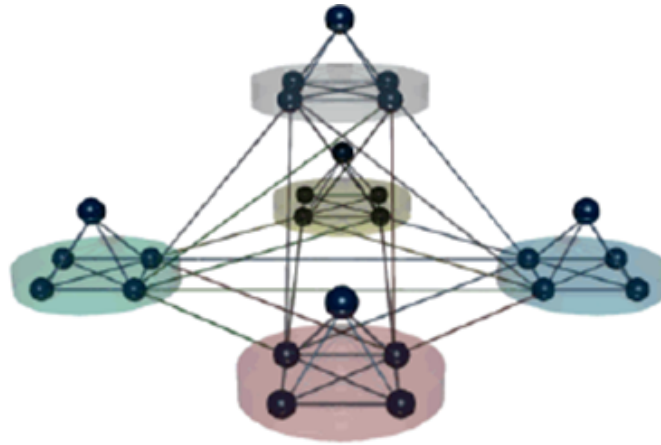


Figure 3.10 Architecture système SOHTCO forme honolique (Adam *et al.*, 2002b).

3.5.5 Organisation de coalitions

Dans ce type d'architecture un groupe d'agents se réunit pour une période donnée afin d'accroître l'utilité ou la performance des agents individuels. La coalition cesse d'exister lorsque l'objectif de performance est atteint. L'architecture des agents peut être plate ou hiérarchique. Même dans une architecture plate il est possible d'avoir un agent principal qui agit comme le représentant du groupe de coalition.

La coalition n'est pas trop recommandée dans un environnement dynamique, car elle est difficile à maintenir en raison du changement de performance du groupe. Le chevauchement des agents entre les groupes de la coalition est autorisé, car cela augmente la connaissance commune au sein du groupe de la coalition. Cela aide à construire un modèle de croyance (Balaji et Srinivasan, 2010a). La figure 3.11 illustre un système multi-agents d'architecture de coalition typique.

Selon Vijsel et Anderson, les groupes de la coalition se réorganisent et se regroupent de manière dynamique. L'inconvénient est la complexité informatique accrue liée à la création d'ensembles ou de groupes de coalition. L'architecture de coalition dans un SMA peut avoir une meilleure performance à court terme que

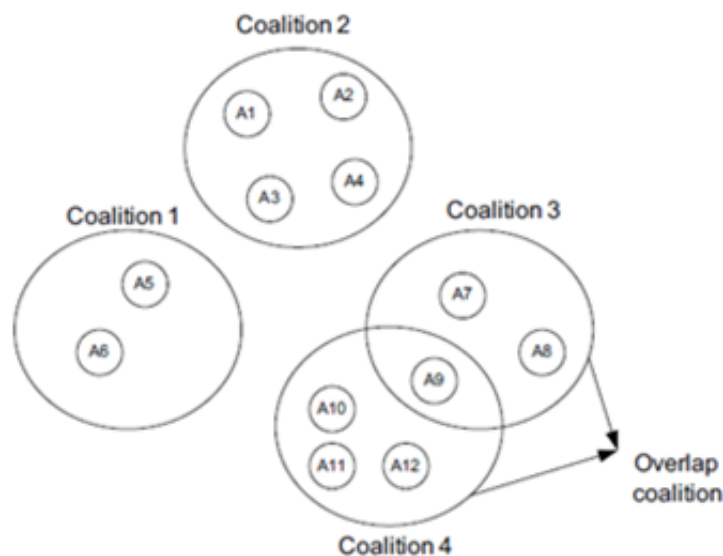


Figure 3.11 Architecture système de coalition(Balaji et Srinivasan, 2010a).

les autres architectures d'agent (Van De Vissel et Anderson, 2004).

3.5.6 Organisation d'équipes

L'architecture de l'organisation d'un système multiagents en équipes est presque similaire à l'architecture de coalition au niveau de leurs conceptions, à la différence que les agents d'une équipe travaillent ensemble pour améliorer les performances globales de leur équipe, plutôt que de travailler chacun en tant qu'agent individuel. Les interactions au sein des agents d'une équipe peuvent être assez arbitraires et les objectifs ou les rôles attribués à chacun des agents peuvent varier avec le temps en fonction des améliorations résultant des performances de l'équipe (Horling et Lesser, 2004).

Balaji et Srinivasan indiquent qu'il est important de considérer la taille des équipes qui peuvent être un avantage ou un inconvénient, « car une grande équipe offre une meilleure visibilité de l'environnement et une plus grande quantité d'informations

pertinentes. Cependant, l'apprentissage ou l'intégration des expériences d'agents individuels dans une seule équipe peut être affecté. Avec une taille réduite, l'équipe offre des possibilités d'apprentissage plus rapides, mais aboutit à des performances sous-optimales en raison d'une vision limitée de l'environnement ». Des compromis entre apprentissage et performance doivent être faits dans la sélection de la taille optimale de l'équipe. Cela augmente les coûts de calcul bien plus que ceux de l'architecture de système multi-agents de coalition. La figure 3.12 montre une équipe basée sur une architecture avec une vue partielle. Les équipes 1 et 3 peuvent se voir mais pas les équipes 2 et 4 et inversement. Le comportement interne des agents et leurs rôles sont arbitraires et varient selon les équipes, même dans une structure d'agent homogène (Balaji et Srinivasan, 2010b).

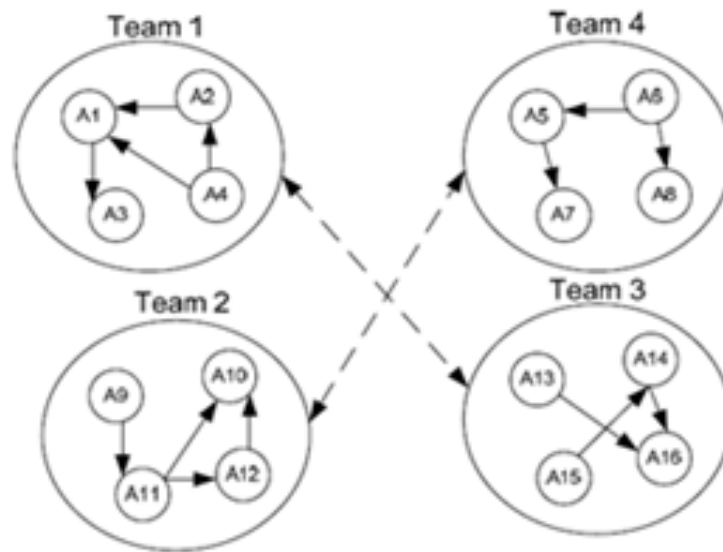


Figure 3.12 Architecture avec vue partielle des équipes (Balaji et Srinivasan, 2010a).

Hübner dans sa démarche d'organisation des systèmes multiagents présente le modèle MOISE (Model of Organization for multi-agent Systems) un modèle centré-organisation, qui organise, autour d'une spécification structurelle, une spécifica-

tion fonctionnelle reliée au schéma central par une spécification déontique pour expliciter la manière dont une organisation collabore pour satisfaire des buts communs. Chacune de ces dimensions peut être spécifiée indépendamment les unes des autres (Hübner *et al.*, 2007).

Demazeau a présenté un modèle formel préliminaire pour les systèmes multiagents avec des organisations dynamiques. Selon l’auteur, le concept de dynamique d’organisation des systèmes SMA peut être vu en termes de structure population-organisation. Par dynamique d’organisation, il expose l’ensemble des changements auxquels l’organisation d’un système ouvert multiagents peut être soumise en cours de fonctionnement comme : les contraintes fonctionnelles, les changements d’environnement, l’entrée et le départ d’agents dans sa structure, ou l’intervention du concepteur ou de l’utilisateur, etc. De plus, l’auteur présente l’approche boîte à outils, pour la programmation orientée agent. Cette approche est surtout utilisée pour définir l’architecture interne des agents (Demazeau et Costa, 1996).

Pour Boissier *et al.*, l’organisation peut être soit centrée agent ou centrée organisation. Du point de vue centré agent ACPV⁸, on considère les agents comme étant le “moteur” de l’organisation. Les organisations n’existent que tant que les phénomènes émergents, observables établissent une vision globale, objective et ascendante des schémas de coopération entre les agents (Boissier *et al.*, 2013), (Picard G, 2009). Du point de vue centré organisation OCPV⁹, la notion centrale de dynamique des organisations est considérée, tandis que dans ACPV, cette notion correspond à des phénomènes ascendants et émergents qui sont regroupés sous le terme général d’auto-organisation. Dans OCPV, cette notion d’organisation nourrit un large panel de travaux relatifs à la réorganisation formelle et des-

8. Agent-centred point of view

9. Organisation centred point of view

cendante d'organisations préexistantes installées dans le SMA, (Boissier *et al.*, 2013), (Picard G, 2009).

3.6 La communication dans un SMA

3.6.1 Rôle de la communication dans un SMA

La communication joue un rôle de premier plan dans les systèmes multi-agents. Elle est généralement classée en deux types d'interactions entre les agents qui sont l'interaction directe ou la communication locale (transmission de messages), dans laquelle les agents s'envoient des messages structurés pour communiquer (à travers le MTS¹⁰). C'est l'approche mise en avant par la FIPA¹¹, ce type d'interaction permet aux agents d'échanger explicitement des informations quand ils le décident et quand ils en ont besoin (Sabouret, 2009). La communication locale n'a pas d'endroit où stocker les informations et il n'existe aucun moyen de communication intermédiaire pour jouer le rôle de facilitateur. Le terme transmission de message est généralement utilisé pour souligner la communication directe entre les agents. La figure 3.13 présente un exemple de l'interaction directe entre les agents.

10. Service défini par FIPA, MTS (Message Transport Service) est responsable de la communication entre les agents

11. <http://www.fipa.org>



Figure 3.13 Interaction directe (Balaji et Srinivasan, 2010a).

L'interaction indirecte ou communication réseau (Blackboard), dans laquelle les agents ne s'envoient pas de message, mais déposent des informations dans l'environnement (action) et observent l'environnement (perception), c'est l'approche mise en avant par les modèles d'agents réactifs fondés sur la stigmergie (Weyns et Parunak, 2005). Dans cette approche, l'accent est mis sur l'émergence d'un comportement en l'absence d'intention de communication explicite dans le système. La figure 3.14 présente un exemple de communication indirecte.

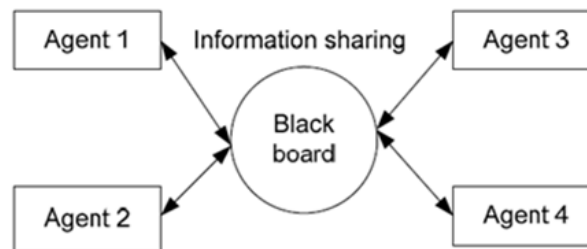


Figure 3.14 Interaction indirecte (Balaji et Srinivasan, 2010a).

3.6.2 Langage de communication de l'agent

Pour que les agents puissent coordonner leurs comportement et action, il faut qu'ils communiquent entre eux. Pour arriver à communiquer, il est nécessaire de mettre en place un cadre commun, un format d'échange facilitant l'interaction et

le partage des informations entre les agents. Ce format d'échange est fourni par ACL¹². Selon Robert et Flores-Mendez, dans ACL il existe trois éléments clés qui sont :

- un langage et un protocole de communication d'agent commun,
- un format commun pour le contenu de la communication,
- une ontologie partagée dans laquelle le message communiqué a la même signification dans tous les contextes et suit une sémantique indépendante de l'agent.

Pour ALC il existe deux grandes approches. La première approche est procédurale, où la communication est basée sur un contenu exécutable. Cela pourrait être accompli en utilisant des langages de programmation tels que Java, TCL¹³, Applescript, par exemple l'un des principaux inconvénients de l'approche procédurale est le besoin de fournir des informations sur l'agent destinataire quoiqu'elles soient fort souvent inconnues ou partiellement connues. Donc, une hypothèse mal construite pour cette approche peut être néfaste pour les performances des agents. La seconde préoccupation majeure est la fusion de scripts de procédure partagés en un seul script important exécutable pour l'agent. Tous ces inconvénients font que l'approche procédurale n'est pas la méthode privilégiée pour concevoir un langage de communication entre agents (Balaji et Srinivasan, 2010b) et (FIPA00003, 2000).

La deuxième approche est déclarative, c'est-à-dire que la communication y est basée sous la forme déclaratives, telles que des définitions, des hypothèses, etc. Probablement en raison des limitations des approches procédurales (par exemple,

12. Agent Communication Language

13. Tool Command Language

le contenu exécutable est difficile à contrôler, à coordonner et à fusionner), les langages déclaratifs ont été préférés pour la conception des langages de communication d'agent. Les déclarations doivent être courtes et précises, l'augmentation de la longueur affecte le coût de la communication ainsi que la probabilité de corruption de l'information. Les déclarations doivent également être assez simples pour éviter l'utilisation d'un langage de haut niveau, (Balaji et Srinivasan, 2010b).

La plupart des implémentations de langage déclaratif sont basées sur des actes illocutoires, tels que demander ou commander, des actions communément appelées performatives. KQML¹⁴ compte parmi les plus populaires de ces langages, (Flores-Mendez, 1999). KQML a été conçu à la fois comme format de message et protocole de traitement de message pour prendre en charge le partage de connaissances en temps réel entre agents. La structure du langage KQML est faite en trois couches :

- Une couche de communication, cette dernière décrit les paramètres de communication de bas niveau, tels que les identifiants d'expéditeur, de destinataire et de communication.
- Une couche de message qui contient un interprétatif et indique le protocole d'interprétation.
- Une couche de contenu qui contient des informations relatives au performatif soumis.

Dans la couche de contenu, on retrouve le contenu réel du message. La couche de communication décrit les paramètres de communication de niveau inférieur, tels que l'identité de l'expéditeur et du destinataire. La couche de message représente le noyau de KQML et détermine les types d'interactions qu'un agent peut avoir avec un autre. La syntaxe de KQML est basée sur une liste de parenthèses équi-

14. Knowledge Query and Manipulation Language

brées. L'élément initial est appelé « le performatif » les éléments restants sont les arguments performatifs, voir l'exemple dans le tableau 3.1.

: tell
: sender customer
: content (123 456 7890)
: receiver retailer
: in-reply-to credit-card-number
: language LPROLOG
: ontology NYSE-TICKS

Tableau 3.1 message KQML

Dans ce message, la performative KQML est «tell». Le contenu est «123 456 7890», il s'agit du niveau de contenu. Les valeurs des mots-clés : sender : receiver : in-reply-to forment la couche de communication. Le performatif, avec les contenus de : language et : ontology forment la couche message.

3.6.3 Langage KIF

Pour communiquer et comprendre le contenu des messages, les agents ont besoin d'un langage commun, c'est le rôle du KIF (Knowledge Interchange Format). Ce dernier permet de représenter le contenu des messages par des prédicats et la logique du premier ordre (Ginsberg, 1991). Donc, il intervient directement dans l'échange de connaissances entre les agents. On peut compter deux parties dans la

description du langage KIF qui sont : la spécification de la syntaxe (comment se présente une information en particulier), et la représentation de cette information. De plus, le langage possède des méthodes pour la représentation de la «méta-connaissance» celles-ci peuvent servir de liens entre les bases de connaissances et des langages de représentation des connaissances comme PROLOG et LISP.

3.6.4 Ontologies

Gruber parle d'Ontolingua, comme étant un système qui fournit un vocabulaire permettant de définir les ontologies réutilisables, portables et pouvant être partagées (Gruber, 1993). De nos jours, on parle de OWL¹⁵, le langage Ontologique a beaucoup évolué et est désormais formalisé et standardisé (OWL 1 et 2) (Ghorbel *et al.*, 2008). L'objectif du développement des ontologies est de fournir des vocabulaires spécifiques dépendants du domaine d'application dans le but de garantir la communication entre les différents agents du système. Une ontologie définit les concepts et les relations qui existent entre les mots d'un vocabulaire des agents. Donc, dans un SMA, les agents partagent la même ontologie, c'est-à-dire les mêmes vocabulaires, mais pas forcément les bases de connaissances. Les agents doivent partager le même vocabulaire et connaître les mêmes concepts s'ils veulent communiquer d'une façon cohérente et consistante (Flores-Mendez, 1999).

3.6.5 Framework logiciel adapté à la réalisation des SMA

Il existe plusieurs frameworks logiciel adaptés au développement des SMA comme : Mdakit, JADE, FIPA pour ne citer que ceux-là. Poggi (2010) dans son article présente un cadre logiciel, appelé HDS (Heterogeneous Distributed System), pour la réalisation d'applications distribués en fusionnant les paradigmes client-serveur et peer-to-peer et en implémentant toutes les interactions entre les processus d'un

15. Ontologie Web Language

système par l'échange de messages et l'utilisation de filtres de composition pour piloter et adapter dynamiquement le comportement du système. Ce Framework logiciel permet la réalisation de systèmes basés sur deux types de processus : les acteurs et les serveurs. Les acteurs ont leur propre fil d'exécution et effectuent des tâches d'interaction, si nécessaire, avec d'autres processus à travers des messages synchrones et asynchrones. Les serveurs effectuent des tâches à la demande d'autres processus en composant, si nécessaire, les services offerts par d'autres processus via des messages synchrones (Poggi, 2010).

L'architecture logicielle d'une application HDS peut être décrite à travers les trois modèles différents : Le modèle de concurrence qui décrit comment les processus d'un nœud d'exécution peuvent interagir et partager des ressources, le modèle d'exécution, qui décrit les services disponibles pour gérer les processus d'une application et le modèle de distribution, qui décrit comment les processus de différents nœuds d'exécution peuvent communiquer. La figure 3.15 présente l'architecture de la solution HDS dans laquelle les acteurs et les serveurs sont distribués sur un réseau (hétérogène) de nœuds de calcul (appelés nœuds d'exécution) pour la réalisation de différents types d'application.

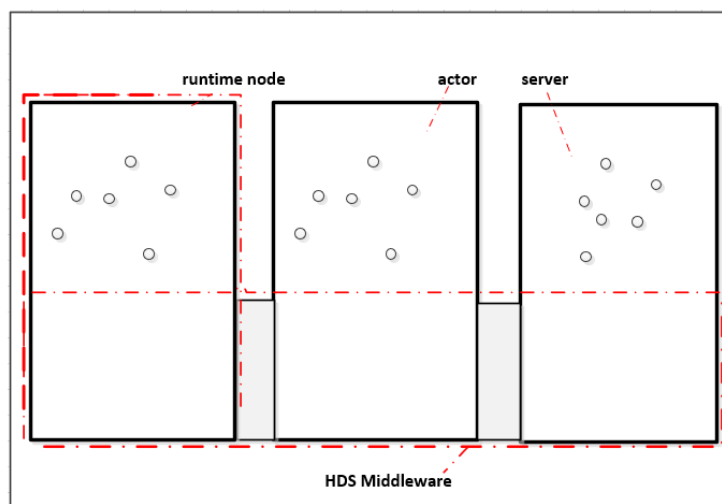


Figure 3.15 Architecture de la solution HDS (Poggi, 2010).

Le module de communication prend partiellement profiter de la classification des messages ACL sur la base de leurs performatives en affinant le concept de contenu de message à travers une hiérarchie d'interfaces Java. Les processus interagissent à travers des messages pouvant être considérés comme typés en raison de leur contenu. Les messages typés permettent de coupler la signification des actes de communication ACL avec la signification des concepts exprimés par l'ontologie du domaine. En fait, une première hiérarchie d'interfaces Java peut permettre de diviser les messages sur la base de leur Acte de communication ACL, c'est-à-dire, leurs performatifs, puis d'autres interfaces et des classes concrètes peuvent spécialiser ces interfaces pour définir l'ontologie d'un domaine d'application spécifique, c'est-à-dire les messages échangés lors de l'exécution des tâches d'un domaine d'application. La figure 3.16 nous montre la hiérarchie de l'interface classant le contenu du message sur la base des actes de communication ACL.

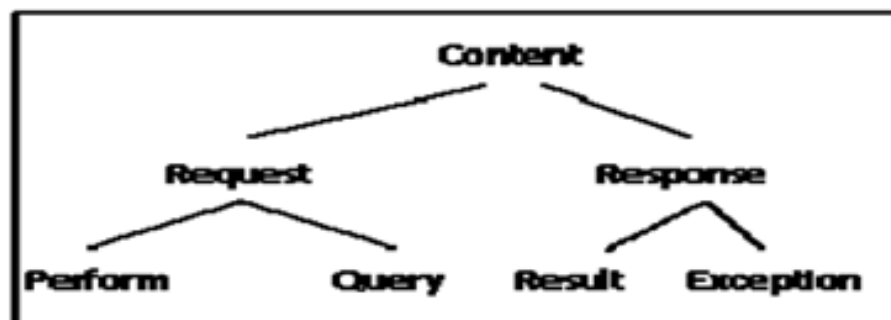


Figure 3.16 Contenu message, base des actes de communication ACL (Poggi, 2010).

3.7 Les SMA sont-ils des systèmes cognitifs ?

Selon la littérature, les éléments qui caractérisent les SMA sont généralement de nature cognitive, car à la base, les agents sont appelés à communiquer, à collaborer, à interagir, à prendre des décisions, à avoir un comportement qui émerge, à socialiser, etc. Pour mieux corroborer nos dires, nous allons parcourir la littérature afin de présenter dans cette section quelques aspects cognitifs de ces éléments qu'on retrouve dans les SMA.

3.7.1 Emergence dans les systèmes multiagents

L'émergence est un sujet brûlant de la recherche actuelle. On la retrouve surtout dans le domaine des systèmes complexes, qui sont souvent en lien avec la modélisation et la simulation de grands systèmes comprenant une multitude de composantes en interaction, comme les systèmes multiagents. Plusieurs auteurs soutiennent qu'elle est présente dans les systèmes naturels comme les colonies de fourmis, les essaims de guêpes, etc. (Johnson, 2002). Dans leurs travaux, ces chercheurs tentent de définir les différentes formes et exigences des propriétés émergentes dans le contexte des systèmes cognitifs multiagents (Morowitz, 2004). Dans

les systèmes multiagents, la structure émergente découle des actions des agents et de leur changement d'état. De nombreux exemples d'émergence dans les systèmes multiagents concernent la notion d'auto-organisation, et les deux concepts (émergence et auto-organisation) sont souvent considérés comme synonymes en raison de caractéristiques communes comme le contrôle décentralisé, la flexibilité et la robustesse (Heylighen *et al.*, 2001)

Les auteurs Poirier et Chicoisne (2006) utilisent l'expression «cognition distribuée» pour décrire l'émergence cognitive qui émane du comportement collectif des agents. Ils se sont basés sur l'intelligence en essaim afin d'appuyer leur thèse, c'est-à-dire une intelligence provenant du comportement global de grands groupes d'agents artificiels ou d'animaux qui interagissent localement, tels que les abeilles construisant leur ruche ou les fourmis en quête de nourriture. Ces capacités locales, entièrement responsables du comportement émergent du système, déterminent complètement leurs moyens d'interaction entre elles et avec leur environnement (Poirier et Chicoisne, 2006).

Le cas de la cognition distribuée devient controversé lorsque l'on dit que des propriétés cognitives émergent du comportement collectif des agents. Selon Harnad, les sciences cognitives ne peuvent vérifier que des hypothèses concernant les processus capables de générer des comportements, c'est ce qu'on appelle le test de Turing. Ce test ne peut pas tester si un processus peut générer des sentiments, de la pensée, mais seulement s'il peut générer des actions. Les processus qui génèrent la pensée et le savoir-faire sont «répartis» dans les têtes des penseurs, mais pas entre les têtes des penseurs. Il n'y aurait pas selon lui de cognition distribuée, seulement de la cognition collaborative. Dans ses travaux, pour mieux expliquer la notion de cognition collaborative, il prend l'exemple du courrier électronique et du Web. Ces derniers ont engendré une nouvelle forme de cognition qui émerge, c'est la cognition collaborative qui s'appuie sur le potentiel interactif en temps

réel des cerveaux individuels d'une manière qui n'était pas possible dans les interactions orales, écrites ou imprimées (Harnad, 2005). Cependant, si on se limite au test de Turing comme il le soutient, il n'y a pas de raison de distinguer cognition collective et cognition collaborative si le comportement intelligent émerge réellement de l'interaction des agents.

Pour Vygotsky et Minsky, des choses spéciales pourraient se produire dans les systèmes de traitement distribué, que ces processeurs soient des neurones, des nœuds connexionnistes, des zones du cerveau, des agents, etc. C'est ce qu'ils appellent « Society of Mind » (Vygotsky et Cole, 1978) et (Minsky, 1988).

3.7.2 Communication dans les systèmes multiagents

La communication est l'une des dimensions cognitives les plus fondamentales dans toutes les sociétés. La communication dans les systèmes multiagents est vue comme une forme d'interaction cognitive entre les agents du système. Elle permet l'échange des informations et donc de connaissances. La communication rend également possible la coopération entre agents. Bien entendu, pour que la communication soit effective chez les agents, il faut qu'ils adoptent un ensemble de règles communes, respectent une grammaire ou arrivent à parler le même langage. Selon Chomsky, cette connaissance commune émerge de l'interaction entre la langue parlée localement et ce qu'il appelle dans ses travaux sur le langage et la cognition une « grammaire générative » (Chomsky et Schaff, 1997) et (Chomsky, 1984).

Dans le cas des SMA, ces langages de communication entre agents qui permettent les échanges de messages et les diverses interactions dans le système sont connus sous le nom de « protocole », dont il existe différents types, comme : protocoles de communication, d'interaction, de coopération, de négociation, etc (FIPA00003, 2000). Selon les théories cognitives sur le langage ces types de messages ACLs sont

appelés des actes de langage (Searle, 1969) et (Sperber et Wilson, 1986).

Selon Searle, il existe plusieurs catégories de tels actes (Searle, 1969) :

- assertifs : pour donner une information ;
- directifs : pour donner des ordres ;
- promissifs : pour s’engager sur une action à venir ;
- expressifs : pour exprimer ses sentiments ou ses croyances ;
- déclaratifs : pour énoncer un fait ;
- interrogatifs : pour demander une information

Les auteurs Sperber et Wilson dans leur approche cognitive parlent des trois actes de langage (Sperber et Wilson, 1986) :

- Dire que : assertions, promesses, prédictions
- Dire de : impératif, ordres, conseils
- Demander si : interrogatif, demande d’information

3.7.3 Sociabilité des agents

Une des dimensions cognitives importantes entre les SMA qui est fort souvent négligée est la dimension sociale. « La sociabilité désigne la capacité d’un agent à s’engager dans une interaction et la collaboration avec d’autres agents et entités non-agents. Par exemple, un agent peut avoir besoin d’exécuter une tâche qui ne peut être effectuée que d’une manière collaborative. Pour collaborer, un agent doit être capable de comprendre les agents qui l’entourent. Il peut également avoir besoin de négocier, de coordonner et de partager des ressources » (Dignum *et al.*, 2004).

Galland et al., (2014), dans leur travaux sur la contextualisation de l'interaction entre les agents dans un SMA, discutent des dimensions physique et sociale des SMA comme éléments nécessaires pouvant garantir une meilleure interaction dans les agents. Selon ces auteurs, la dimension physique fait référence à l'ancrage spatial et à l'activité des agents, tandis que la dimension sociale fait référence à l'aspect communicationnel des agents (Galland *et al.*, 2014). Ils ont proposé un modèle unifié assurant la combinaison des dimensions physiques et sociales pour la mise en œuvre d'interactions contextualisées entre agents. Ce modèle est développé avec le langage multiagent SARL. Ce langage (SARL) permet de prendre en compte la définition d'un type particulier d'espace appelé «SocialSpace» qui fournit un support aux interactions sociales entre les agents. Dans ce type d'espace, les agents communiquent en échangeant des messages. La figure 3.17 montre la définition de l'espace social (SocialSpace) et une implantation de l'environnement possible (SocialSpaceImpl) basée sur les outils de SARL en Java (Galland *et al.*, 2014).

```

1 | public interface SocialSpace extends Space {
2 |     public void emit(Message e, Scope<?> scope);
3 |     public Address register(Agent agent);
4 |     public void unregister(Address agentAddress);
5 | }
6 | public class SocialSpaceImpl extends
   |     EventSpaceImpl implements SocialSpace {
7 |     private CombinedEnvironment env;
8 |     public void emit(Message e, Scope<?> scope) {
9 |         e.destination = scope;
10 |         super.emit(e, new Scope(env));
11 |     }
12 | }

```

Figure 3.17 Spécification de l'espace social (Galland *et al.*, 2014).

Demazeau, dans ses travaux sur les systèmes multiagents, a proposé l'approche MAGMA pour les agents cognitifs ainsi que leurs interactions. Il a aussi présenté une gamme de protocoles d'interaction simples. MAGMA se concentre sur l'étude, le développement et l'utilisation d'agents cognitifs au niveau d'un SMA pour résoudre des problèmes qui traitent d'une préoccupation ou d'un problème social.

Son objectif est de produire des agents autonomes utiles aux citoyens, afin de résoudre des problèmes du monde réel (Demazeau et Müller, 1990).

Selon cet auteur, les agents cognitifs dans un SMA ont une utilité sociale, mais l'étude et le développement de ces agents posent plusieurs défis scientifiques qui doivent être relevés :

- Analyse, modélisation et réplique des raisonnements humains, des comportements sociaux et des facteurs émotionnels,
- Représentation et formalisation des agents artificiels,
- Personnalisation des agents artificiels et des groupes d'agents,
- Représentation des relations à long terme entre compagnons humains et artificiels (robots sociaux ou personnages virtuels),
- Création et validation de modèles basés sur des agents bien ancrés,
- Développement d'une compréhension de la société comme un système complexe, incluant l'émergence de phénomènes collectifs et d'intelligence collective, et la conception de systèmes socio-techniques robustes et résilients,
- Développement des algorithmes de planification adaptatifs/humains,
- Garantir la vie privée des agents et la confidentialité des données, etc. (Demazeau, 1995).

3.8 Bilan des SMA

Dans cette partie du document, nous avons présenté Un état des lieux se rapportant aux caractéristiques dans les systèmes multi-agents. Nous avons pu à travers cette étude dégager le bilan de constats suivants :

- Les SMA possèdent des caractéristiques fonctionnelles propres qui font leurs différences avec les systèmes informatiques classiques et qui rendent leur analyse plus ardue.
- Les travaux existants sur l'évaluation des SMA se concentrent fort souvent sur les cadres conceptuels et exécutifs. La plupart des travaux s'intéressent à l'intégration des données, des méthodologies de conception et des plateformes d'exécution, bien que peu d'autres traitent la validation et la vérification de modèles multiagents.
- Les SMA permettent de passer du comportement individuel aux comportements collectifs ce qui leur permet de résoudre des problèmes complexes, mais aussi de distribuer l'intelligence sur plusieurs entités ou agents.
- Les travaux d'évaluation des applications multiagents indépendamment de la méthodologie et de la plateforme sont peu nombreux.
- Les solutions existantes pour l'évaluation des applications multiagents sont très liées au domaine d'application ou au problème traité par le SMA en question et ne peuvent donc pas être généralisées.
- Les SMA sont des systèmes autonomes dynamiques, ils sont très utilisés dans la manipulation des données distribuées et hétérogènes.

SMA ouvert à la technologie de Jumeau numérique

Nous pensons que le concept de jumeau numérique vient compléter la technologie des SMA surtout lorsqu'il s'agit de recourir à la connaissance, de découvrir et d'accéder aux données. Déjà plusieurs travaux à travers la littérature nous parlent d'une cohabitation naturelle de ces deux concepts comme les travaux de Zhen et al. Ainsi : Dans ces travaux, les auteurs ont proposé une méthode de modélisation du jumeau numérique qui prend en compte les principaux éléments liés à la qualité du

produit, comme le matériau, le processus de production, les fonctions du produit, etc.

Les auteurs se concentrent sur le contrôle de la qualité pendant les processus de fabrication du produit et fournissent des solutions pour recueillir des informations pertinentes et analyser les influences correspondantes sur la qualité des produits. Dans le modèle qu'ils ont présenté, ils incluent un composant basé sur les SMA afin de collecter des informations relatives à différents aspects du produit via des agents autonomes et coopératifs. De plus, à travers ce composant ils ont introduit un module de gestion des connaissances basé sur des ontologies du produit afin de soutenir les interactions entre ces différents agents (Zheng *et al.*, 2020).

Lorente *et al.*, proposent un système de jumeau numérique pour la prise de décision, basé sur un système multiagents pour soutenir la coordination des activités de maintenance et fournir une meilleure connaissance de la situation. Le jumeau numérique génère de la cognition aux multiagents, qui implique des processus de prise de décision holistiques ou holoniques (c'est-à-dire, en tenant compte de tous les états et informations disponibles du système). Dans ce cas, le jumeau numérique prescrit les recommandations à chaque agent ou acteur industriel en précisant les actions possibles, les conséquences et en prenant en compte de manière dynamique les connaissances et préférences collectives (Lorente *et al.*, 2022).

Nous savons que l'IdO soulève de nombreux défis liés au nombre élevé d'objets à produire, d'important volume de données, il faut aussi à prendre en considération sa grande dynamique, ainsi que la grande hétérogénéité des données et des systèmes de communications impliqués. Nous savons qu'une ville intelligente est appelée à produire des données de différents domaines d'applications qui sont souvent de nature complexe et distribuée.

Tous ces constats nous ont amené à notre hypothèse de départ, à savoir : une solution basée sur la technologie des systèmes multiagents pourrait potentiellement aider à résoudre les problèmes d'interopérabilité, entre les applications d'internet des objets dans une ville intelligente.

3.9 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons commencé par introduire brièvement les différents axes de recherche dans le domaine de l'IAD. Ensuite, nous avons présenté une définition des systèmes SMA et retracé quelques caractéristiques de ces systèmes.

En effet, nous avons retracé à travers la littérature quelques des caractéristiques nécessaires aux SMA comme : le comportement, la communication, l'organisation, la coopération, etc. Les travaux rencontrés ont montré que ces systèmes interviennent non seulement dans des solutions d'intégration de données et de communication mais aussi, avec leurs natures distribuées et autonomes, ils permettent de résoudre un certain nombre de problèmes dynamiques et distribués.

La littérature des SMA, nous encourage à mieux défendre notre hypothèse, c'est-à-dire que de développer une solution middleware basée sur les mécanismes des SMA peut faciliter l'interopérabilité des applications d'internet des objets. Pour mieux corroborer notre hypothèse, nous allons développer une solution SMA qui hérite des caractéristiques rencontrées dans la littérature. Le prochain chapitre est consacré à la présentation de notre démarche pour la réalisation de notre solution middleware pour l'IdO.

CHAPITRE IV

FONDER LES APPLICATIONS DE L'INTERNET DES OBJETS SUR LES SMA : CONCEPTION

4.1 INTRODUCTION

Les villes intelligentes combinent les progrès de l'Internet des objets, du Big Data, des réseaux sociaux et des technologies de cloud computing avec une demande croissante d'applications diverses dans différents domaines d'intérêt public, tels que la santé, l'environnement, la sécurité publique, le transport et la mobilité. Nous pensons qu'une solution basée sur la technologie des SMA pourrait résoudre la problématique d'interopérabilité entre les applications d'internet des objets pour les villes intelligentes. L'évidence derrière la logique de conception de ces deux technologies (SMA et de l'IdO) s'inscrit dans le partage d'un ensemble de dimensions communes telles que :

- la dimension communicationnelle ;
- la dimension interactive ;
- la dimension sociale ;

4.1.1 Dimension communicationnelle dans l'IdO

L'IoT a pour objectif de faire communiquer les objets entre eux et avec les individus. La dimension communicationnelle dans l'IdO est vue comme étant le

processus de connexion qui permet de faire circuler les données entre l'ensemble des objets hétérogènes afin d'offrir un service spécifique. Par exemple, la connexion et la communication entre les personnes et les objets via des appareils Internet tels que les téléphones mobiles et d'autres gadgets, etc. Nombreux sont les protocoles de communication, comme : Le Bluetooth, la RFID, le WIFI ou les réseaux cellulaires sont les plus répandus sur le marché et les plus matures. Le choix de la technologie de communication dépend souvent des besoins du projet (Al-Fuqaha *et al.*, 2015).

L'interaction entre les capteurs, les appareils, les passerelles, les serveurs et les applications utilisateur est la caractéristique essentielle qui fait de l'Internet des objets le vrai fondement de l'avenir numérique. Mais, ce qui permet à toutes ces entités intelligentes de parler et d'interagir, ce sont les protocoles IdO qui peuvent être considérés comme des langages que l'équipement IdO utilise pour communiquer. Selon le type de communication, les protocoles IoT peuvent être divisés en protocoles de données IoT et protocoles de réseau IoT (Al-Sarawi *et al.*, 2017). Les protocoles de réseau IdO qui sont utilisés pour connecter les objets, sont : le protocole Internet version 6 (IPv6), sur les réseaux personnels sans fil à faible consommation (6LoWPAN), ZigBee, Bluetooth à Faible consommation d'énergie (BLE), Z-Wave et communication en champ proche (NFC), etc.

Les protocoles de données IdO, ils sont généralement appelés protocoles de la couche de session ou protocoles de messagerie IdO. Il existe différents types de protocoles de messagerie tels que : Message Queue Telemetry Transport (MQTT), Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), Constrained Application Protocol (CoAP), Secure Message Queue Telemetry Transport (SMQTT), etc.

4.1.2 Dimension communicationnelle dans SMA

Lejouad-Chaari parle de la dimension communicationnelle dans le système SMA comme « un moyen d'accroître les perspectives des agents en leur agréant le bénéfice des informations et du savoir-faire des autres agents. Subséquemment, la communication des agents constitue l'un des moyens fondamentaux pour assurer la répartition des tâches et la coordination des actions entre agents » (Lejouad-Chaari, 2014). La littérature parle souvent de deux types de communication : une communication indirecte qui engendre un partage d'informations via l'environnement, et l'autre, directe qui réalise la communication au sein du système par envoi de messages. Dans un dialogue les agents alternent des rôles actifs et passifs, et échangent des séries de messages en respectant des protocoles bien précis ce sont les protocoles de coordination, de coopération et de négociation (Burg et FIPA, 2002).

Pour plus d'explication sur la dimension communicationnelle dans SMA, référez-vous à la section 3.6.1 du chapitre 3.

4.1.3 Dimension interactive dans l'IdO

L'intégration d'une connexion Internet à un objet connecté permet d'accroître ses fonctionnalités et l'interaction avec son environnement. Un objet connecté peut interagir avec le monde physique de manière indépendante sans intervention humaine (Saleh, 2017). Hervas a proposé un concept d'interaction basé sur la réalité augmentée pour surmonter les problèmes de sur-automatisation, de perte de contrôle, de complexité de l'environnement et de manque d'interfaces utilisateur appropriées pour les appareils intelligents de tous les jours, mais l'approche n'est pas appropriée pour les grands environnements car, elle ne reconnaît que les appareils qui se trouvent dans la zone de capture de la caméra (Hervás *et al.*,

2013).

Nazari et Semsar., dans leur travail, abordent certains défis majeurs de la dimension interactive de l'IdO dans des environnements intelligents. Pour ces auteurs, l'interaction dans l'IdO se trouve au niveau de l'homme et de l'environnement intelligent (objets), ils ont proposé une interface utilisateur basée sur la 3D qui surmonte les défis d'interaction susmentionnés et permet à l'utilisateur d'explorer des environnements plus vastes à l'aide du 3D (Nazari Shirehjini et Semsar, 2017).

Nazari parle de la dimension interactive de l'IdO entre l'utilisateur et les milieux intelligents en termes de classe. L'auteur divise l'interaction en deux classes à savoir : l'interaction explicite et l'interaction implicite.

- Dans l'interaction explicite, l'utilisateur prend l'initiative de contrôler l'environnement et décide quand effectuer quelle opération.
- Dans l'interaction implicite, des actions sont effectuées automatiquement ;

L'un des problèmes de l'interaction implicite réside dans le fait que c'est l'environnement qui prend l'initiative d'effectuer des activités. L'utilisateur ne détermine pas directement quand quelque chose se passe. Les actions sont déclenchées automatiquement. Ce manque de contrôle de la sur-automatisation est une faiblesse car, les utilisateurs n'acceptent pas un environnement complètement adaptatif. Généralement, ces utilisateurs observent le système, les actions sont déclenchées de manière automatique (Nazari Shirehjini, 2007).

Un autre problème de l'interaction implicite est le manque d'interfaces système. Ce problème ne permet pas aux utilisateurs de construire un modèle mental approprié sur le système et de comprendre les actions et réactions automatisées de leurs environnements intelligents (Burmeister *et al.*, 2015).

4.1.4 Dimension interactive dans SMA

Pour la dimension interactionnelle, les auteurs Marzougui et Barkaoui voient l'interaction comme étant le moteur d'un système multiagents. Elle peut prendre diverses formes comme actions sur son environnement, communication, inférences, (direct ou indirect), etc. De ce fait, différents types de protocoles d'interaction vont être considérés, soit pour soutenir le transport des messages entre agents. Soit pour définir les séquences de messages qui vont être communiquées entre agents et décrire comment les agents doivent réagir aux messages reçus pendant ces interactions (Marzougui et Barkaoui, 2013).

Les agents interagissent et coopèrent pour réaliser conjointement une tâche ou atteindre un but commun (Balbo *et al.*, 2010). Dans Ferber, 1995, «Une interaction est la mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques ». Les interactions ne sont pas seulement la conséquence des actions effectuées par plusieurs agents en même temps, mais aussi l'élément nécessaire à la constitution de l'organisation sociale des agents(Ferber, 1995).

Pour plus d'explication sur la dimension interactionnelle dans SMA, référez-vous à la section 3.4.1 du chapitre 3.

4.1.5 Dimensions sociale dans l'IdO

Les travaux sur la sociologie et l'anthropologie consultés dans la littérature sur les comportements sociaux entre les êtres humains ont catégorisé différentes formes de socialisation humaine et les interactions entre individus selon plusieurs types de relations (Fiske, 1992) et (Hoorens et Poortinga, 2000). L'approche sociale dans l'analyse des comportements entre objets communicants a été avancée dans les travaux de Atzori et Pintus. Ils ont proposé un modèle de comportement entre

objets communicants en se basant sur le modèle relationnel de Fiske (EliceGUI *et al.*, 2017) et (Atzori *et al.*, 2012).

Par analogie aux différents types de relation entre les individus, cinq types de relations relatives aux objets communicants ont été proposés par Mandler *et al.*

1. Relation de Co-localisation (CLOC) : Lorsque des objets sont présents simultanément au même endroit (sur une machine, dans un atelier, une maison, une ville, etc.)
2. Relation de Co-travail (CTRA) : Lorsque des objets coopèrent ensemble dans une même application ou un même processus, pour réaliser une tâche ou un but collectif.
3. Relation de Parenté (PAR) : Lorsque des objets appartiennent à une même famille (objets similaires, même catégorie, construits dans une même période, par le même fabricant, appartenant à un même lot).
4. Relation de propriété (PRO) : Lorsque des objets appartiennent au même propriétaire et interagissent entre eux. L'objet peut être porté par son propriétaire (une personne, une machine ou un autre objet). Le propriétaire peut stimuler l'interaction des objets.
5. Relation Sociale (SOR) : Lorsque des objets se rencontrent et entrent en contact, de façon sporadique ou continue, au travers de la rencontre physique de leurs propriétaires respectifs. L'aspect social de l'interaction entre objets découle de l'interaction sociale entre leurs propriétaires (Mandler *et al.*, 2016).

Pour plus d'explication sur la dimension sociale dans l'IdO, référez-vous à la section 2.8.1 du chapitre 2.

4.1.6 Dimension sociale dans SMA

La dimension sociale chez l'agent est d'une importance capitale, la sociabilité de l'agent est désignée par la capacité d'un agent à s'engager dans une interaction et à collaboration avec d'autres agents et entités non-agents (Dib, 2017).

La modélisation des SMA est très souvent utilisée pour décrire ou comprendre les interactions des sociétés, que celles-ci soient animales ou humaines. Fort souvent, c'est la capacité d'auto-organisation des sociétés qui est ainsi mise à l'épreuve et les processus supposés sont testés. Selon Ferber, «la modélisation multiagents qui a été mise en œuvre afin d'apporter une vision novatrice au niveau de la modélisation et de la simulation dans les sciences de l'environnement, en offrant simultanément la possibilité de représenter directement des individus, leurs comportements et leurs interactions» (Ferber, 1995). Doran nous dit, que le cadre SMA permet d'aller chercher les conséquences d'actions locales, relatives à des logiques explicitement décrites, sur la forme du collectif. Dans ce genre d'interaction, «on parle en général d'émergence pour décrire ces phénomènes globaux qui se mettent en place dans les univers à partir d'un grand nombre de dynamiques locales» (Doran *et al.*, 2018).

Dans la littérature, on parle souvent de « simulations émergentistes où l'agent ne comprend pas le collectif auquel il participe dans ses actions, d'autres usages du système multiagents se basent sur l'existence d'un groupe social prédéfini et la capacité de chaque agent à percevoir les autres et à vouloir s'engager à leur égard » (Castelfranchi, 1995) C'est cette définition du modèle à travers des règles locales de comportement qui rend la simulation dans les systèmes multiagents intéressante pour les sciences sociales (Gilbert, 2006)

4.1.7 SMA et IdO, une collaboration évidente

D'après la littérature consultée, l'hétérogénéité des dispositifs connectés ne cesse de croître. L'intégration des objets dans la plateforme d'IdO nécessite des efforts et des interventions humaines, tout ceci devient de plus en plus difficile avec l'hétérogénéité croissante au sein de ce réseau. Une certaine forme d'automatisation de certaines tâches se fait sentir comme : la délégation de nouvelles compositions de services à un agent autonome, la nécessité de faire appel à des mécanismes d'accès et d'interaction uniformes entre les objets, etc. (Chung *et al.*, 2020).

Dans le milieu de la recherche, la fusion des agents logiciels et de l'IdO a donné naissance à l'IdA (*Internet of Agents*) qui se traduit par « Internet des Agents » comme alternative pour ajouter un composant d'intelligence et d'autonomie pour les appareils aux réseaux d'IdO. Deux approches différentes sont à considérer lorsqu'on parle d'IdA :

1. Dans la première approche, l'IdA est considérée comme un processus évolutif de l'IdO où la participation de l'utilisateur final est nécessaire afin d'adapter le comportement du réseau d'IdO à travers la personnalisation d'agents spécifiques au moment de l'exécution d'une ou plusieurs tâches (Yu *et al.*, 2013).
2. Dans la seconde approche, l'IdA est vue comme un écosystème intelligent d'agents qui gère les ressources associées aux objets IdO. Pour atteindre ce niveau de cognition, des agents logiciels dotés d'une dimension sémantique sont introduits dans les infrastructures IdO. De cette manière, des problèmes liés : aux contextes, aux dimensions sociales, aux services et aux ressources IdO peuvent être pris en compte (Pico-Valencia *et al.*, 2018).

Selon Atzori et al., les objets connectés se reposent généralement sur des protocoles de communication hétérogènes ce qui crée souvent des conflits dans les aspects liés à l'intégration de réseaux IdO hétérogènes. De ce fait, la gestion de l'intelligence et de l'autonomie est nécessaire mais, la mise en œuvre n'est pas une tâche triviale du point de vue matériel (Atzori *et al.*, 2010).

Pour résoudre le problème de l'intelligence et de l'autonomie au niveau matériel, des auteurs ont proposé d'utiliser des agents logiciels intégrés aux technologies IdO (Savaglio *et al.*, 2016). Dans leurs travaux, ils expliquent le processus de liaison d'un agent logiciel à un objet IdO, ils proposent d'établir les processus de communication de ces deux entités à travers le standard FIPA-ACL (FIPA Agent Communication Language) afin de pouvoir construire des IdO distribués, autonomes et hétérogènes. De plus, ils nous disent que les agents sont les meilleures technologies actuelles pour créer des objets intelligents par rapport aux approches orientées services et orientées objets (Savaglio *et al.*, 2016).

D'autres approches ont été proposées à travers la littérature pour justifier le mariage de l'IdO et du SMA comme : l'AoT (agent comme objet ou agents of things), le Web multi-agents, etc.

Pour l'approche AoT l'auteur utilise des agents pour représenter et rationaliser les diverses interactions entre les objets (Mzahm *et al.*, 2013). L'idée centrale d'AoT est que chaque chose dans ce concept devrait avoir une capacité de raisonnement et d'intelligence interne. Cette intelligence permet aux éléments d'interagir directement avec d'autres éléments dans le même système ou dans des systèmes différents. L'intelligence dans ces objets est représentée par des agents logiciels intégrés dans les choses et leur capacité à raisonner sur leurs environnements en contribuant à des résultats bénéfiques pour les humains. Par conséquent, toutes ces choses et tous ces systèmes fonctionnent sous le concept AoT et interagissent

les uns avec les autres via des agents logiciels (Mzahm *et al.*, 2013).

L'approche Web Multiagent utilise un MAS multicouche pour gouverner un groupe d'appareils. Cette approche est évolutive car, elle est construite sur l'architecture Web (Leong et Lu, 2014). Ces auteurs nous disent que les systèmes complexes tels que l'Internet des objets sont difficiles à gérer en raison des comportements émergents qui découlent des interactions complexes entre ses éléments constitutifs (qui sont des objets), causant de grands problèmes d'interopérabilité entre des applications de domaines différents dans l'IdO. Dans leur article, ils proposent une architecture multiagents qui fournit les caractéristiques autonomes pour l'IdO rendant du coup l'IdO plus gérable. De plus, le Web multiagents permet un traitement flexible sur des plateformes hétérogènes, car ce dernier exploite des protocoles du Web tels que HTTP et des formats de données indépendants de la langue tels que JSON pour les communications entre agents (Leong et Lu, 2014).

4.1.7.1 Quels sont les avantages à implanter le SMA pour piloter les objets connectés ?

Les systèmes multiagents sont issus de l'Intelligence Artificielle Distribuée. Le principal modèle de résolution distribuée de problèmes était basé sur l'architecture de tableau noir (et Morgan T, 1987). La deuxième génération de systèmes s'est intéressée à la distribution du contrôle à l'intelligence des agents et à la réutilisation des architectures (Wooldridge et Jennings, 1995). Les travaux sur la troisième génération de SMA se sont concentrés sur les interactions, l'interopérabilité, l'ouverture de ces systèmes et l'émergence. De plus, nous savons que les SMA sont utilisés dans trois grandes catégories de logiciels avec des finalités différentes : la simulation, la résolution, l'intégration (Boissier O., 2004).

Les applications de différents domaines de l'IdO reposent sur des objets qui sont en constante évolution et ces objets sont dotés d'une grande hétérogénéité et

variabilité. Par exemple, dans le cas d'une ville intelligente, les informations sur le trafic sont acquises à partir d'un système de trafic qui repose sur un écosystème en constante évolution d'objets intelligents connectés à travers l'internet, y compris des capteurs, des voitures, des camions, des feux de circulation etc., appartenant à des fournisseurs différents.

Au vu de ces constats nous pensons que l'intérêt d'utiliser les SMA pour piloter l'internet des objets est multiple :

- **L'IdO est une technologie distribuée.**

Les SMA sont couramment utilisés comme des solutions distribuées (Jennings et Wooldridge, 1998). Les SMA sont issus de l'IAD, alors que l'IAD s'intéresse à des systèmes dans lesquels des agents artificiels opèrent collectivement et de façon décentralisée pour accomplir une tâche (Drogoul, 1993)

- **L'IdO collecte et génère des données à partir de nombreuses sources.**

Les SMA sont une solution idéale d'intégration de données. Ils ont présenté une nouvelle approche d'intégration de données complexes basée à la fois sur l'entrepôtage de données et les SMA. Dans cette nouvelle approche, différentes tâches du processus d'intégration des données complexes sont effectuées par un ensemble d'agents dans une base de données (ETL) (Boussaid *et al.*, 2003). Ghurbhurn a présenté une solution multiagents dénommée KRISMAS basée sur des ontologies qui modélise des domaines fonctionnels et qui effectue la récupération et l'intégration des données, tout en gérant les changements qui peuvent survenir au sein des sources de données, c'est-à-dire en maintenant les ontologies cohérentes avec les sources de données ? (Ghurbhurn, 2008).

- **L'IdO est une technologie qui repose sur des objets, qui peuvent être intelligents.**

Dès la deuxième génération le SMA s'est intéressé à la distribution des tâches, de l'intelligence chez les agents et à la réutilisation des architectures (Jennings et Wooldridge, 1998). Les agents dans un SMA peuvent être réactifs, hybrides et cognitifs, c'est-à-dire dotés d'intelligence (Ferber, 1995).

- **L'internet des objets est un système autonome et complexe.**

Selon Sabouret, les systèmes multiagents sont connus dans la résolution de problèmes complexes, ils possèdent déjà les bases nécessaires pour assurer efficacement la communication et l'interopérabilité des entités autonomes (Sabouret, 2009). Les SMA sont utilisés dans trois grandes catégories de logiciels avec des finalités différentes : la simulation, la résolution de problème complexe et l'intégration (Boissier O., 2004). De façon naturelle, les SMA sont des modèles distribués composés de plusieurs agents logiciels autonomes, qui ont un but et peuvent fonctionner en parallèle. De ce fait, ils permettent de connecter et de résoudre un certain nombre de problèmes autonomes et distribués (Ferber, 1995).

- **L'Ido est un système ouvert, dynamique et il génère une grande quantité de données hétérogènes.**

Pour Miorandi et al., les systèmes multiagents favorisent le développement d'applications dynamiques, en répondant aux besoins d'applications inter-domaines, à la gestion des données, aux échanger et analysent des données des applications IdO. Les SMA présentent les valeurs nécessaires au développement d'applications dédié à l'IdO (Miorandi et al., 2012). Ces systèmes possèdent de bons mécanismes d'interactions sur le fonctionnement des systèmes ouverts, dynamiques et hétérogènes. Ils possèdent de bons mécanismes d'interactions sur le fonctionnement

des systèmes ouverts, dynamiques et hétérogènes (Sabouret, 2009). Ils ont déjà fait leurs preuves dans la manipulation ou l'interaction des données hétérogènes (Ghurbhurn, 2008).

- **Relations entre objets et agents.**

Un agent peut être considéré comme un objet actif ayant un état mental, un objectif et une autonomie, les deux paradigmes (objet et agent) utilisent l'envoi de messages pour la communication, et peuvent utiliser l'héritage et l'agrégation pour définir leurs architectures, ect. (DeLoach, 1999). Selon Ferber, les SMA ont un rôle essentiel à jouer en s'inscrivant comme les possibles successeurs des systèmes à objets, en ajoutant à la localité des comportements l'autonomie et la répartition des prises de décision. On peut ainsi déjà parier que le génie logiciel de demain sera "orienté agent", comme celui d'aujourd'hui commence à être "orienté objet" (Ferber, 1995).

Nous savons que l'IdO soulève de nombreux défis liés au nombre d'objets (sa taille) et à son côté fort dynamique, ainsi qu'à la grande hétérogénéité des données et des systèmes impliqués. Ces défis nécessitent de nouveaux systèmes et techniques pour développer ou supporter des applications d'IdO qui soient capables de collecter des données à partir des nombreuses sources de données, d'interagir à la fois avec l'environnement à l'aide des actionneurs et avec les utilisateurs à l'aide d'interfaces graphiques dédiées (Billet, 2015).

4.1.8 Enjeux de l'émergence dans les SMA et l'IdO

Dans les SMA et l'IdO, une fonction globale est attendue à partir d'un ensemble de spécifications au niveau local de chacune des entités, ce qui est la définition même du concept d'émergence (Steels 1991). Cette propriété du niveau global n'est pas programmée dans chacune des entités (agent ou objet) et n'existe que par leurs interactions conduisant à des processus permanents de réorganisation (Boissier O., 2004). Avec le volume de données de toutes sortes que génère l'IdO, nous pensons que la caractéristique d'émergence peut à un certain niveau créer des bouleversements à la fois technologiques, sociaux et peut même nuire au contrôle d'un système informatique dans une ville.

4.1.8.1 Enjeux de l'émergence dans l'IdO

La question des propriétés émergentes soulève plusieurs enjeux pour l'IdO. Un des enjeux que soulève l'émergence dans l'IdO est la sécurité. En effet, des problèmes liés à la sécurité des objets et des données dans un milieu hétérogène au niveau physique et logique sont à considérer. De ce fait, des politiques de sécurité claires, adaptatives selon le contexte d'utilisation doivent être établies. Selon Challal, « Les interactions des composantes de l'IdO (personnes, objets intelligents, écosystème technologique, processus) font émerger une dimension systémique à la sécurité de l'IdO ». L'auteur met en évidence les éléments qui ont créé ces tensions sur la sécurité dans l'IdO. Elles sont générées lors de l'interaction des objets intelligents avec leur environnement. Dans ces tensions, on retrouve : la confiance, la responsabilité, l'identification, l'auto-immunité et elles sont caractérisées par une dimension cognitive et systémique induite par l'autonomie grandissante des objets qui émergent à travers le réseau (Challal, 2012).

Pour Saleh (2017), les volumes de données que génère l'IdO font émerger beaucoup

d'information et de connaissance, ce qui va créer d'importants problèmes épistémologiques et sociotechniques : liberté-contrôle, autorité-indépendance, associativité-unicité, automatisme-maîtrise, actions-interactions, contextualisation-décontextualisation, adaptativité-intégrité, etc. L'auteur nous avise que l'enjeu futur de l'IdO est d'arriver à répondre de manière aussi créative que possible aux inquiétudes anthropologiques, aux changements de régimes climatiques, aux inquiétudes sur la biodiversité, aux implications industrielles et à la transition énergétique, aux implications géopolitiques ainsi qu'à l'éthique d'accessibilité, de diversité culturelle, et enfin à la redéfinition de la notion de «données personnelles» (Saleh, 2017).

Beaucoup d'inquiétudes sont aussi soulevées du côté de la technologie. En effet, on retrouve des enjeux au niveau de la programmation des applications. Car, l'IdO exige de nouvelles méthodes de conception, de développement, de débogage et de maintenance. Il est clair qu'à partir de langages symboliques innovants, les informaticiens vont transformer de simples lignes de code en agents autonomes capables d'exister dans la complexité des systèmes ubiquitaires et distribués, pour s'adapter aux demandes des utilisateurs et recommander de nouveaux usages, voire d'accompagner les utilisateurs dans l'évolution de leurs modes de vie (Saleh, 2018).

4.1.8.2 Enjeux de l'émergence au sein des SMA

Dans un système d'entités en interaction, l'émergence est la production d'un phénomène global au regard des entités, et observé soit par un observateur extérieur, soit par les entités elles-mêmes (Drogoul A., 2004) . Les enjeux de l'émergence dans le SMA résident surtout dans son côté imprévisible : on connaît parfaitement les règles d'interaction entre les composantes, mais on ne peut pas prédire ou anticiper le comportement global du SMA. Drogoul avance qu'un phénomène émerge comme le comportement global d'un SMA est imprévisible pour diverses

raisons. Cela peut provenir :

- D’une évolution stochastique du SMA c’est-à-dire, de l’intervention du hasard dans les comportements individuels qui gouvernent la dynamique du système. Ce caractère stochastique peut être inhérent aux agents, ou palliatif de l’ignorance d’un système modélisé par un SMA dédié à la simulation (Drogoul A., 2004).
- De la nature non déterminisme du système, ce qui peut venir de son caractère ouvert ou de l’influence de l’utilisateur (De Wolf *et al.*, 2005).
- Un système clos et déterministe peut être analytiquement imprévisible, à cause de la complexité liée à l’émergence (Klein, 2009).

La construction d’un SMA vise à la réalisation d’objectifs globaux en définissant son niveau local. Son évolution dépend des données fournies par l’environnement. On parle d’émergence automatiquement, quand le SMA atteint un état non définissable a priori pour chaque évolution (Klein, 2009). L’une des principales questions liées à l’émergence des SMA est de déterminer comment concevoir le niveau local du système afin de garantir un comportement émergent particulier au niveau global. Trois problèmes à considérer lors de la définition du niveau local des SMA aux comportements globaux observés :

- Arriver à mesurer le comportement global, c’est-à-dire déterminer les différentes entités présentées par un SMA à un instant donné. Ce problème dépend essentiellement du SMA étudié.
- Arriver à maîtriser le SMA, , c’est-à-dire que ce dernier doit présenter le comportement réel global désiré.
- Arriver à certifier qu’une solution de maîtrise d’un SMA donne bien les résultats attendus, ou encore évaluer cette solution pour savoir si elle est utile (Klein, 2009).

Dans la littérature, les chercheurs parlent de comportements émergents au lieu de phénomènes émergents, c'est le cas de DeWolf, ce dernier avance qu'il n'est pas facile de prouver que le comportement d'un SMA est bien maîtrisé à cause d'un manque de démonstrations formelles. DeWolf explique qu'il est difficile de garantir un certain comportement global émergent dans un SMA et ce, à cause de sa nature non déterministe. De ce fait, il a proposé une approche « equation-free » qui permet d'analyser le comportement global pour assurer que les spécifications sont atteintes (De Wolf *et al.*, 2005).

Cette même difficulté a été reprise dans les travaux de Comtet, qui propose d'utiliser des outils de physique statistique, basés sur la notion d'énergie, pour vérifier la stabilité du comportement global d'un système de flocking (Jean-Michel *et al.*, 2008).

Différentes approches ont été proposées dans le but de maîtriser le comportement global d'un SMA, comme les approches par construction, les méthodes de conception, etc.

Pour les approches par construction, les travaux d'Edmonds présentent deux façons de construire un SMA afin que ce dernier puisse se comporter conformément aux spécifications : l'ingénierie et l'adaptation. La première se situe entièrement en amont de la construction du système, tandis que la seconde considère un système existant et l'améliore expérimentalement par essais et révisions jusqu'à ce qu'il soit satisfaisant (Edmonds, 2004).

Les méthodes de conception définissent entièrement le comportement des agents, sans cadre formel qui délimite leurs capacités. Le concepteur du système est libre de créer ses agents comme il l'entend. On comprend que ces méthodes s'appliquent naturellement autant à des SMA cognitifs que réactifs (Arlabosse F., 2004).

4.2 Description de la solution

La solution SMA que nous proposons interagit comme middleware entre les différentes entités (données capteurs, utilisateurs, Web des objets et applications de détails diverses) afin de faciliter la connexion et l'interopérabilité de différentes applications IdO qui sont souvent complexes, car elles n'étaient pas conçues à l'origine pour être connectées à d'autres applications. Ainsi, notre solution consiste à faciliter le travail des développeurs logiciels en leur évitant les détails liés aux plateformes de bas niveau qui sont souvent fastidieux et sujets aux erreurs. Notre système multiagents est vu comme étant une couche qui assure l'interaction entre les applications tierces et le web des objets d'une ville intelligente par exemple.

Pour arriver à connecter un nombre plus important de données, de services et ceci quel que soit le protocole de transport utilisé, nous avons orienté notre solution sur la couche la plus haute du modèle de l'OSI (couche d'application). Le web des objets qui se trouve au niveau de cette couche permet d'accéder à n'importe quel périphérique (des applications, services et données) à l'aide des protocoles standard. La figure 4.1 illustre le positionnement de la solution MISMA-IdO¹ par rapport aux applications du monde réel et le web des objets qui exploite les données du monde physique détecté et contrôlé via des capteurs et actionneurs qui sont représentés par les C1, C2, etc.

1. Middleware via SMA pour des applications de l'IdO

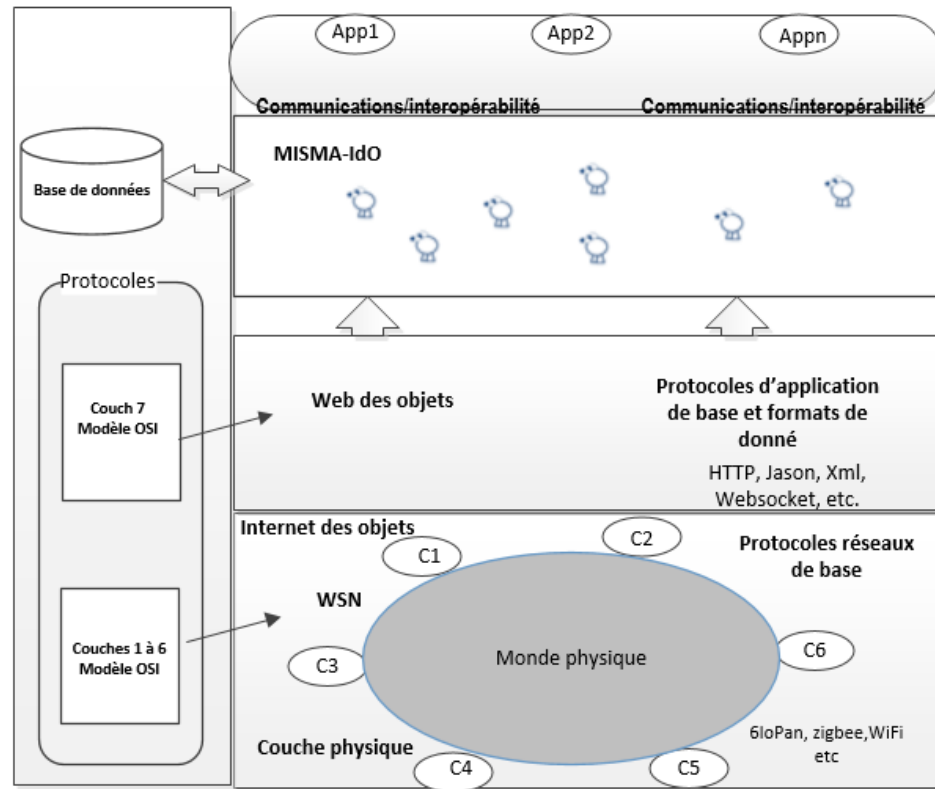


Figure 4.1 Positionnement MISMA-IdO par rapport aux autres systèmes

4.3 Choix de simulation de la solution MISMA-IdO

Nous avons fait le choix de centrer la solution MISMA-IdO sur les applications de l'IdO dans une ville intelligente. Nous avons dans un premier temps fait ce choix à cause de la facilité d'accès aux données IdO des villes intelligentes. De plus, nous avons remarqué qu'une ville intelligente est le secteur qui regroupe le plus l'utilisation de différents types de données IdO, comme le transport, les feux de circulation, la qualité de l'air, le réseau routier, le sonomètre, la mesure de la température, la surveillance des parcs, l'irrigation de jardins, etc. Gyrard dans son article, présente une vue globale du captage et de l'intégration des données d'IdO à partir de différentes sources hétérogènes du projet STAR-CITY pour les villes de

Dublin, (Gyrard, 2015). Notre choix de ville intelligente s’est orienté vers la ville de Montréal, car selon le groupe Easy Park, en 2017 Montréal s’est démarquée en 16e rang des villes intelligentes à travers le monde(EasyPark, 2017).

Notre solution middleware répond au développement de plusieurs modules, chaque module couvre un secteur d’activité bien déterminé qui peut être le transport, les feux de circulation, le sonomètre, la qualité de l’air, etc. Dans le cadre de cette étude nous nous sommes contentés de développer le module de la qualité de l’air. Ce module mesure la qualité de l’air de la ville de Montréal sous la forme d’une valeur numérique appelée « indice de la qualité de l’air ou IQA ».

4.4 Architectures exécutable du module qualité d’air

Notre architecture se base sur JADE qui est un Framework logiciel implémenté en Java pour développer des systèmes multi-agents. JADE met en place les spécifications FIPA pour la communication entre agents et propose des outils graphiques pour gérer et déployer des agents. Jade se base sur un système de communication peer to peer et un service de pages jaunes pour supporter la publication, la souscription et la découverte de services proposés par des agents. Dans cette section nous présentons une vue globale de l’organisation et la structure de l’application MISMA-IdO. Dans un premier temps, nous présentons un diagramme global qui nous montre les différents composants de l’application dans une vue d’ensemble, puis de manière détaillée nous expliquons le comportement attendu de chacun de ces composants.

Pour développer notre architecture nous nous sommes inspirés de l’architecture OAA (Open Agent Architecture) de Martin et al et du modèle d’architecture de JADE (Martin *et al.*, 1999). Le conteneur correspond à l’environnement dans lequel évolue un agent. Dans notre application, les agents ont été séparés en différents conteneurs selon leur rôle. La figure 4.2 montre une vue globale de l’archi-

teature de notre solution SMA, qui présente les agents du système dans différents conteneurs.

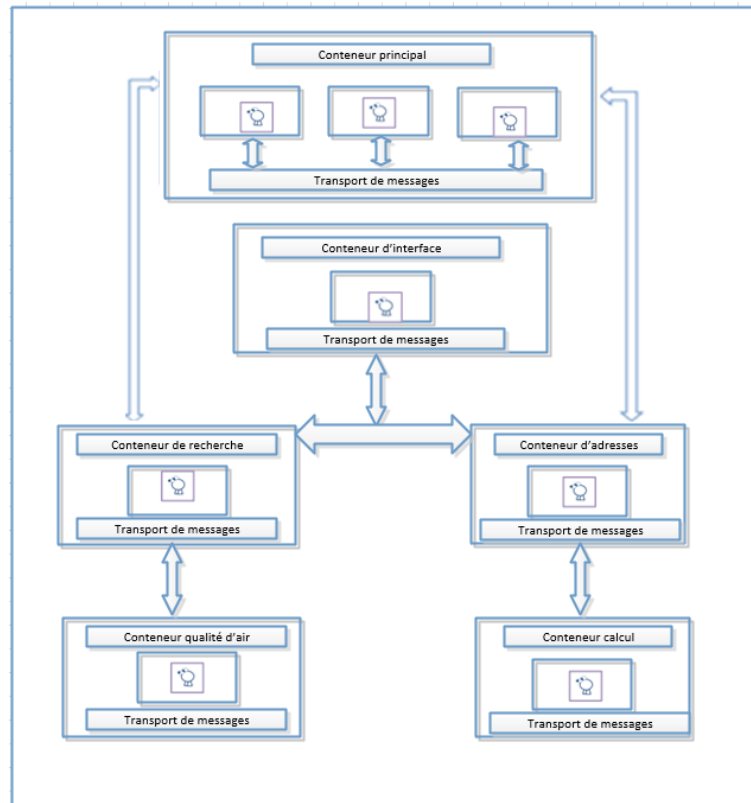


Figure 4.2 Architecture exécutable

4.5 Conteneur principal

Les modules contenus dans le conteneur principal sont imposés par la structure d'un projet utilisant la plateforme de JADE. Le tableau 4.1 donne une brève description de leurs rôles au sein de l'application. Ces différents modules sont : ACC pour *Agent Communication Channel*, AMS pour *Agent Management System* et DF pour *Directory Facilitator*, chacun de ces modules joue un rôle important au sein de la plateforme de JADE et doivent être bien compris pour une bonne utilisation.

Acronyme	Description
ACC	Agent Communication Channel • Module qui gère la communication entre les agents
AMS	Agent Management System • Module qui gère l'enregistrement des agents et l'utilisation du système • Les agents s'enregistrent au près du AMS
DF	Directory Facilitator • Module qui gère la publication des services disponibles • Les agents de la plateforme publient leurs services auprès du DF • Les agents interrogent le DF pour prendre connaissance des services Disponibles
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
JADE	Java Agent Development Framework
SMA	Système Multi Agent

Tableau 4.1 Rôles des modules de base du framework Jade

JADE utilise les spécifications FIPA pour la communication entre agents et propose des outils graphiques pour gérer et déployer des agents. Jade se base sur un système de communication point à point et un service de pages jaunes pour supporter la publication, la souscription et la découverte de services proposés par des agents. Notre choix de JADE comme support au développement de notre solution est justifié par les points suivants :

- La plateforme JADE simplifie considérablement l'effort de la programmation, car elle inclut tous les composants obligatoires pour contrôler un SMA, c'est-à-dire DF et AMS.

- JADE offre un ensemble de bibliothèques et de classes que les utilisateurs peuvent utiliser et étendre.
- Elle offre des outils graphiques qui facilitent le débogage et l'administration du système multi-agents à concevoir.
- Elle simplifie l'implémentation d'un SMA en répondant aux spécifications FIPA et assure ainsi une communication transparente par l'échange de messages dans le langage normalisé FIPA-ACL.
- JADE est indépendante de tout modèle d'agent et est actuellement la plateforme la plus utilisée.

4.6 Conteneur d'agent d'interface

Le conteneur d'interface assure la connexion de notre système d'agents avec le monde extérieur. Il contient l'agent ou les agents qui jouent le rôle d'interface du système, il est identifié par un nom et un identifiant unique via les packages *jade.core* de la classe *AID*² (*jade.core.AID*) dans la plateforme de JADE. Dans notre système, les agents sont implémentés comme une collection de micro-agents où chacun surveille une modalité d'entrée différente et collabore pour produire la meilleure interprétation des différentes entrées de l'utilisateur.

4.7 Conteneur d'agent de recherche

Dans ce conteneur se trouve un ou plusieurs agents de recherche identifié(s) chacun par un nom et un identifiant unique dans la plateforme de JADE. Ce conteneur est le cœur du système, car l'agent qui s'y trouve effectue la majeure partie des tâches à partir de la demande faite par l'agent d'interface, il initie les recherches

2. JADE Agent Identifier

IQA³ en fonction de la demande qui a été faite en contactant les autres agents des autres conteneurs. Après traitement, il reçoit les résultats de l'indice et des sous-indices de la qualité de l'air pour la journée demandée et les transmet à l'agent d'interface qui avait initié la demande.

4.8 Conteneur d'agent d'adresse

Le conteneur d'adresse peut contenir un ou plusieurs agents d'adresse identifiés par un nom et un identifiant unique dans la plateforme de JADE. L'agent d'adresse s'occupe de trouver l'id et l'adresse de la station en fonction de l'arrondissement qui a été choisi, pour ensuite communiquer l'information à l'agent qui s'occupe des polluants.

4.9 Conteneur d'agent des polluants

Dans ce conteneur se trouve un ou plusieurs agents de polluants identifiés par un nom et un identifiant unique dans la plateforme de JADE. L'agent des polluants va se charger de retrouver toutes les valeurs des différents polluants disponibles dans la station de captage des valeurs IQA.

4.10 Conteneur d'agent de calculs

Dans ce conteneur se trouve un ou plusieurs agents de calcul identifiés chacun par un nom et un identifiant unique dans la plateforme de JADE. Dans ce conteneur se trouve l'agent qui effectue le calcul en fonction de la formule de la qualité de l'air.

3. indice de la qualité de l'air

4.11 Application de la méthodologie PASSI au développement de la solution

Pour la réalisation de notre solution, nous nous sommes basés sur la méthodologie PASSI (*Process for Agent Societies Specification and Implementation*). PASSI est une méthodologie pas à pas intégrant des modèles de conception et des concepts provenant de l'ingénierie orientée objet et de l'intelligence artificielle. La méthodologie PASSI proposée par Cossentino décrit un processus de prise en compte des besoins, de la conception jusqu'à l'implémentation d'un SMA orienté sociétés d'agents (Cossentino, 2012). Cette méthodologie intègre des modèles et concepts pour la conception à partir de la programmation orientée objets et des approches de l'intelligence artificielle. Dans la méthodologie PASSI, chaque agent satisfait ses besoins fonctionnels qui sont exprimés sous la forme de cas d'utilisation. On attribue les besoins de l'agent dans la phase d'identification de l'agent. Un agent peut jouer plusieurs rôles, être impliqué dans plusieurs scénarios et fournir d'autres services à la société d'agents.

4.11.1 Les différentes phases du modèle PASSI

Ce modèle est piloté par cinq grandes phases qui sont :

- 1) La phase du modèle des exigences du système. Celle-ci est divisée en quatre étapes à savoir :
 - (a) Description des exigences du domaine : description fonctionnelle du système à l'aide de diagrammes de cas d'utilisation conventionnels ;
 - (b) Identification des agents : phase d'attribution des responsabilités aux agents, représentés sous la forme de packages UML stéréotypés ;
 - (c) Identification des rôles : une série de diagrammes de séquence explorant les responsabilités de chaque agent à travers des scénarios spécifiques au rôle ;

- (d) Spécification de tâche : spécification des capacités de chaque agent avec diagrammes d'activité.
- 2) La phase du modèle d'interactions sociales et des dépendances entre les agents qui sont impliqués dans la solution. Le développement de ce modèle comprend trois étapes :
- (a) Description de l'ontologie : utilisation de diagrammes de classes et de contraintes OCL pour décrire les connaissances attribuées aux agents individuels et leurs communications ;
 - (b) Description du rôle : des diagrammes de classes sont utilisés pour montrer les rôles joués par les agents, les tâches impliquées, les capacités de communication et dépendances entre agents ;
 - (c) Description du protocole : utilisation de diagrammes de séquence pour spécifier la grammaire de chaque protocole de communication pragmatique en termes de performatifs de discours-acte.
- 3) La phase d'implémentation d'agent : c'est un modèle classique de l'architecture de la solution en termes de classes et de méthodes. Ce modèle est composé des étapes suivantes :
- (a) Définition de la structure de l'agent : les diagrammes de classes conventionnels, décrivent la structure des classes d'agents de la solution ;
 - (b) Description du comportement des agents : des diagrammes d'activités ou des diagrammes d'état décrivent le comportement d'agents individuels ;
- 4) La quatrième phase est celle de production d'un modèle de code à partir des différents diagrammes.
- 5) La dernière phase de cette méthodologie a mis l'accent sur le déploiement avec les diagrammes de déploiement qui décrivent l'allocation des agents aux unités de traitement disponibles.

Nous nous sommes appuyés sur quatre des cinq phases de la méthodologie PASSI afin d'implémenter notre solution. Il est clair que la phase de déploiement est une phase très importante au niveau de cette méthodologie mais, vu le contexte de réalisation de cette étude et vu que cette phase n'a pas d'impact direct sur la validité de notre solution, nous n'avons pas trouvé nécessaire de la prendre en compte pour le moment.

4.12 Première phase de la méthodologie de PASSI

Dans le modèle PASSI, la première phase est la phase de définition des besoins du système. De ce fait, pour exprimer les besoins de notre système, nous nous sommes tournés vers une modélisation fonctionnelle qui représente les diagrammes de cas d'utilisation du système (Roques, 2013), (Muller et Gaertner, 2003). D'après Larman, le diagramme de cas d'utilisation représente une excellente image du contexte d'utilisation d'un système (Larman, 2012). Pour donner une vision du comportement fonctionnel de notre système SMA, nous avons opté pour une représentation à travers un diagramme de cas d'utilisation qui a pour but de représenter le comportement plus global et détaillé du système. Ce diagramme nous montre les fonctionnalités du système en unités cohérentes et met en évidence les cas d'utilisation qui ont un sens plus détaillé pour les acteurs. La figure 4.3 montre une vue globale des cas d'utilisation du module qualité d'air.

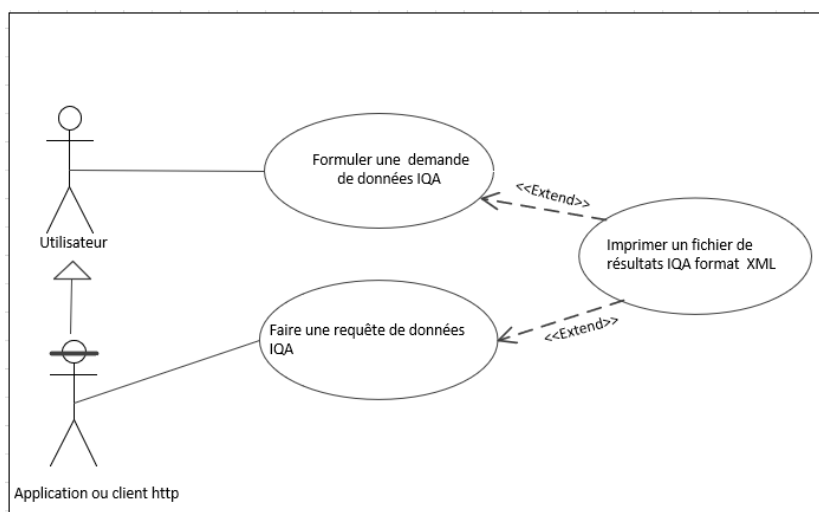


Figure 4.3 Diagramme de cas d'utilisation module IQA

4.12.1 Description détaillée de cas d'utilisations

Pour alléger notre document, nous avons décidé de détailler seulement deux cas d'utilisation : «formuler une demande par l'utilisateur». Dans cette section, on expose de façon détaillée la communication entre les acteurs et les deux cas d'utilisation choisis.

Description du cas d'utilisation 1

Nom du cas : Formuler une demande par l'utilisateur

Acteurs : Utilisateur

Description : Ce cas d'utilisation permet à l'utilisateur de formuler une demande de traitement de données sur la qualité de l'air dans un des arrondissements donnés et ceci à partir d'une date.

Pré-conditions : Aucune

Données en entrées : L'utilisateur fait le choix de l'arrondissement et la date de la journée.

Scénario principal :

1. Le système demande à l'utilisateur de saisir les paramètres de la recherche à savoir l'arrondissement et la date .
2. L'utilisateur saisit une date et l'arrondissement de son choix pour effectuer la recherche.
3. Le système demande à l'utilisateur de valider son choix en cliquant sur «rechercher».
4. Le système réalise les traitements.
5. Le système affiche les résultats.
6. L'utilisateur clique sur OK ou X pour fermer la fenêtre.

Scénario d'erreur : Indisponibilité de données

- 2a. les données ne sont pas disponibles pour l'arrondissement choisi, le système affiche un message d'erreur. Retour à l'étape 1.

Scénario alternatif : Nouvel arrondissement.

- 2b. l'utilisateur saisit un nouvel arrondissement, pour le calcul de la qualité de l'air. Retour à l'étape 2.

Description du cas d'utilisation 2

Nom : Établir la communication

Acteurs : Application ou client http

Description : Ce cas d'utilisation permet à un client http de communiquer avec le middleware afin de réaliser une demande de données IQA.

Pré-conditions : le client http veut se connecter au système SMA via une API.

Données en entrée : le client http passe en paramètre l'arrondissement et la date de la recherche de données IQA via l'API de connexion.

Scénario principal :

1. Le système middleware est en attente d'une requête (via une API)
2. Le client http envoie sa demande de données auprès du système middleware en fonction de l'arrondissement et de la date via une API.
3. Le système SMA réalise le traitement et envoie sa réponse.
4. L'application confirme la réception du traitement.

Scénario d'erreur : Connexion impossible

L'établissement de la connexion nécessite un paramètre valide. Retour à l'étape un.

Scénario alternatif : Demande d'entrer de nouveau paramètres

4.12.2 Identification des agents.

Dans cette phase nous avons identifié nos agents à partir des exigences décrites dans la phase précédente. Adam et al. (2002) indiquent que l'identification des agents est une étape très importante dans la phase de modélisation du système, cette dernière comprend : le fonctionnement individuel des agents et le fonctionnement du groupe d'agents ainsi que la communication de l'ensemble de l'organisation (Adam *et al.*, 2002a).

Fonctionnement individuel des agents

Pour arriver à bien spécifier le fonctionnement coopératif du système MISMA-IdO plus particulièrement le module IQA, il est primordial de détailler les caractéristiques des agents qui varient en fonction de leurs rôles et de leurs positions dans l'organisation du système. De ce fait, on s'est référé à la grille d'analyse fonctionnelle de Ferber qui permet de caractériser des agents en fonction de leurs fonctionnalités (Ferber, 1995). Donc, nous avons adapté la grille de Ferber afin d'identifier les fonctionnalités de nos agents dans leurs dimensions relationnelles, sociales et environnementales. Cette grille permet de définir les fonctions relatives de chaque agent comme :

- La planification des actions où chaque agent est responsable de ses actions ;
- Les interactions, les agents coopèrent entre eux afin de réaliser une tâche bien précise ;
- Les actions qui spécifient les rôles et fonctionnalités de l'agent.

Le tableau 4.2 présente les fonctionnalités et dimensions des agents du système et peut être utilisé dans la spécification des caractéristiques individuelles de chaque type d'agent qui joue un rôle dans l'organisation du système. En effet, dans notre solution les agents possèdent la même structure, mais ils diffèrent dans leurs comportements et dans leurs tâches qui peuvent varier en fonction de leurs rôles.

Fonctions\ dimensions	Sociale	Environnement	Personnelle
Représentationnelle	Représentation du groupe et rôles des autres agents.	Représentation du monde.	Représentation de soi et de ses capacités.
Organisationnelle	Planification des actions et communications.	Planification des actions dans l'environnement.	Contrôles des planifications et méta-planifications
Interactionnelle	Interaction avec d'autres agents, performatifs.	Mécanismes de perceptions et d'actions par rapport à l'environnement.	Auto-communication et Auto-action.
Productive	Tâches de gestion, d'administration, de coordination, de négociation.	Tâches d'analyse, de modification et de création.	Représentation de son environnement, adaptation.

Tableau 4.2 Grille de conception adaptée de la grille d'analyse de Ferber

Les interactions et actions des agents de notre solution SMA se manifestent dès que les agents s'enregistrent auprès de l'agent AMS et ces derniers publient leurs services auprès de l'agent DF ; ces deux agents (AMS et DF) font partie du conteneur principal fourni par l'environnement de développement JADE. La figure 4.4 illustre les différentes interactions et actions des agents du système IQA. L'agent d'interface « InfAgt » joue le rôle d'interface entre l'utilisateur et le système SMA. Il a pour tâche de récupérer les requêtes venant d'un utilisateur ou d'un client http. Pour ce faire, l'agent invite à entrer les paramètres de la recherche comme l'arrondissement et la date, ensuite les données saisies sont acheminées vers un autre agent du système dénommé «SearchAgt» qui va communiquer avec les autres agents afin de trouver l'information demandée.

L'agent de recherche «SearchAgt» s'enregistre auprès de l'agent AMS et consulte l'agent DF afin d'avoir l'information du prochain agent à contacter. L'agent de

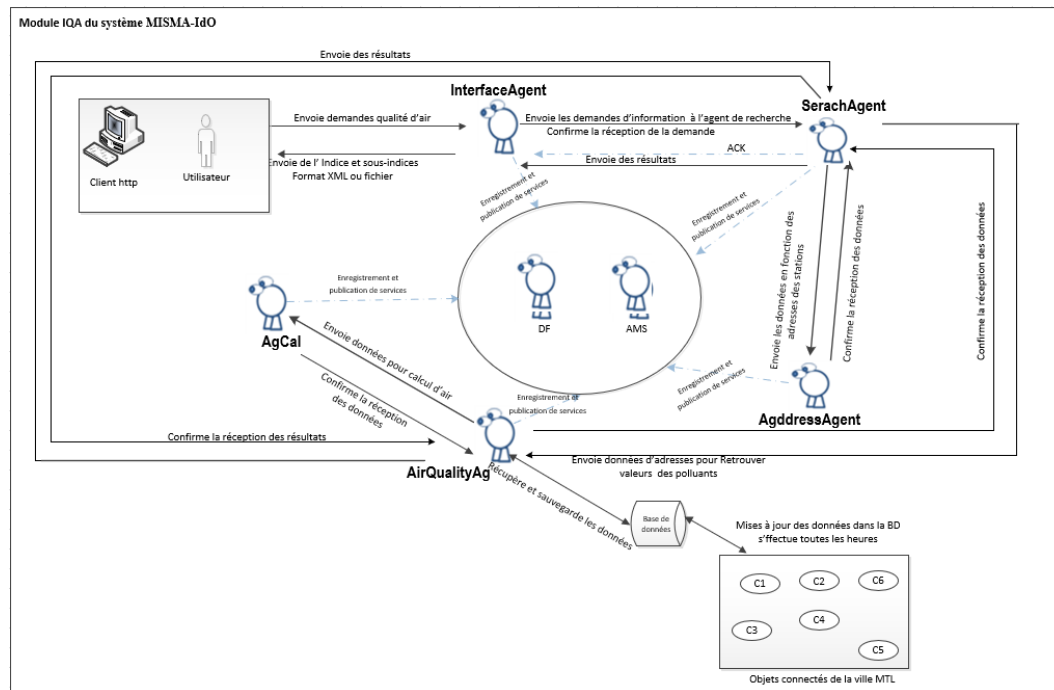


Figure 4.4 Fonctionnement et interaction des agents du module IQA

recherche réalise son traitement en allant chercher les informations concernant l'ensemble des données sur l'identifiant de la station, l'adresse, etc. auprès de l'agent d'adresse (AdressAgent) qui à son tour confirme la réception des données et réalise les traitements en convertissant les données reçues en une adresse réelle, compréhensible. Ces données sont acheminées vers l'agent de la qualité d'air «Air-qualityAgt».

L'agent de la qualité d'air « AirQualityAg » confirme la réception de ces données, consulte l'agent AMS afin de savoir vers quel autre agent il doit acheminer ses données. Il réalise les traitements en identifiant les polluants par rapport à l'adresse qui identifie la station, il récupère les différentes valeurs de ces polluants, calcule l'indice de la qualité de l'air de la zone de couverture en question et achemine ces valeurs à l'agent chargé de faire les calculs « CalAgt ».

L'agent CalAgt confirme la réception des données venant de l'agent « AirqualityAgt » et réalise les traitements en réalisant les calculs de la qualité de l'air en fonction des données de chaque emplacement fourni et de la formule préétablie. Ensuite, il envoie les résultats auprès de l'agent d'interface. L'agent d'interface est le seul agent du système qui communique avec le monde extérieur soit en affichant les résultats via une interface ou en les rendant disponibles via une API afin que des clients http puissent les utiliser au besoin.

Fonctionnement du groupe d'agents

Le fonctionnement du groupe d'agent nous permet d'avoir une vue globale de l'ensemble des messages et interactions possibles des différents agents du module IQA du système (MISMA-IdO). La figure 4.4 ci-dessus montre le fonctionnement du groupe d'agents à travers différentes interactions possibles ainsi que les agents qui y sont impliqués.

4.12.3 Identification des rôles

Nous identifions les rôles des agents à travers le diagrammes 4.5, qui représente le diagramme de séquence du module IQA. Ce dernier met en évidence les actions et responsabilités de chaque agent à travers un scénario global, qui représente les entrées et sorties du système.

4.13 Diagramme de séquences du système

Le diagramme de séquence est un artefact qui met en évidence les événements d'entrées/sorties du système. Selon Larman, le diagramme de séquence système pourrait être une image qui montre, pour un scénario de cas d'utilisation, les événements générés par les acteurs (Larman, 2012). On s'est inspiré de la description textuelle du cas d'utilisation global du système pour créer le diagramme de sé-

quence du système. La figure 4.5 montre le diagramme de séquence du module de la qualité de l'air avec les différentes actions de traitements et les messages échangés entre les acteurs du système.

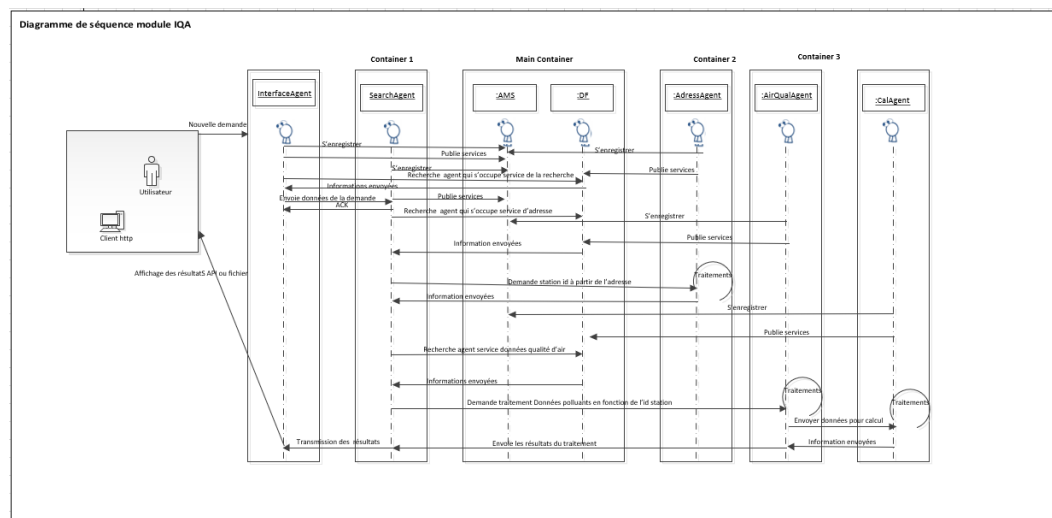


Figure 4.5 Diagramme de séquence module qualité d'air du système MISMA-IdO

Nous pouvons décrire le scénario comme suit :

- L'agent d'interface reçoit la demande et informe l'agent de recherche de la demande de l'utilisateur ou de l'application.
- l'agent de recherche s'enregistre d'abord auprès de l'agent AMS, puis consulte l'agent DF afin de savoir quel agent du système s'occupe de traiter ce type de demande.
- l'agent DF informe l'agent de recherche de quel agent peut traiter sa demande «AddressAgent».
- l'agent de recherche envoie l'information de la station qui a capturée les données des polluants à l'agent d'adresse. L'agent d'adresse renvoie à son tour le résultat à l'agent de recherche afin d'identifier la station id qui correspond à l'arrondissement demandée.

- ensuite l'agent recherche demande au système quel agent qui s'occupe des polluants. Suite à cette information l'agent recherche communique la station id à l'agent de la qualité d'air (l'agent polluant), afin d'identifier non seulement les polluants pour cette station mais aussi, les valeurs de ces polluants. Donc, l'agent polluant réalise ce traitement.
- l'agent de la qualité d'air envoie un Ack à l'agent de recherche, réalise les traitements nécessaires, puis achemine les données à l'agent de calcul.
- l'agent de la qualité d'air va acheminer les résultats à l'agent de recherche qui avait au tout début initié la demande IQA. Ensuite, l'agent de recherche renvoie les résultats à l'agent d'interface qui finalement achemine ces résultats à l'utilisateur ou au client http.

4.13.1 Spécification des tâches

Dans la spécification des tâches, nous nous sommes concentrés sur le comportement de chaque agent du modèle. De ce fait, nous avons présenté un diagramme d'activité qui se divise en deux côtés. Le côté droit qui contient une collection d'activités symbolisant les tâches de l'agent, et le côté gauche qui contient les activités représentant les autres agents du système. Généralement, les tâches encapsulent certaines fonctionnalités qui forment une unité logique de travail. Un diagramme de spécification de tâche résume ce que l'agent est capable de faire en ignorant les informations sur les rôles qu'un agent joue lors de l'exécution de tâches particulières (Cossentino, 2012).

Pour alléger le document, nous avons décidé de présenter seulement le diagramme d'activité de l'agent de recherche (SerachAgent). La figure 4.6 nous donne une vue globale des activités symbolisant les tâches de l'agent responsable de la recherche (SearchAgent). Dans cet exemple, nous avons une tâche «Listener» nécessaire pour transmettre la communication entrante à la tâche appropriée. Des tâches supplé-

mentaires sont nécessaires pour gérer tous les messages entrants «ReceiveRequest et ReceiveDeliveryNotification» qui correspondent respectivement aux messages provenant de l'agent de recherche et des autres agents. De plus, une tâche est introduite pour chaque message sortant comme «AskForStation id, AskForAddress, AskForPolluants, ASKForcal IQA⁴ et NotifyEndOfRequest». De cette façon, nous consacrons une tâche à chaque communication.

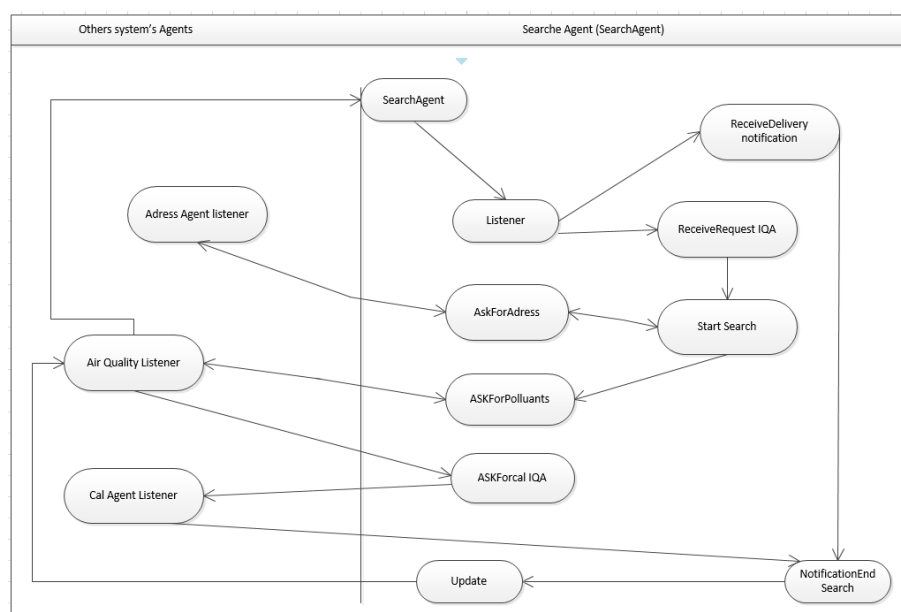


Figure 4.6 Diagramme d'activité de l'agent recherche (SearchAgent)

4.14 Phase II de la méthodologie de PASSI

La deuxième phase de la méthodologie de PASSI est la phase du modèle d'interactions sociales et des dépendances entre les agents du système. La modélisation fonctionnelle donne une vue fonctionnelle du système logiciel que l'on veut développer. Il faudrait donc passer d'une vue fonctionnelle vers une vue d'objet du problème. Parmi les trois étapes de la phase II du modèle PASSI, nous avons choisi d'utiliser les deux premières étapes, car ces deux étapes permettent de représenter les ontologies du système, c'est-à-dire les diagrammes d'ontologies du domaine et de communication. De ce fait, on va utiliser le diagramme de classes et les contraintes OCL⁵ pour décrire les connaissances attribuées aux agents individuels et leurs communications.

4.14.1 Ontologie du domaine

Dans la méthodologie PASSI, la conception de l'ontologie se traduit par la description de l'ontologie du domaine qui peut être exprimée selon Zouaq et Nkambou par un diagramme de classe. La génération des ontologies de domaine est possible à partir des concepts du domaine, ce processus implique de déterminer les classes, les associations, les attributs et les instances (Zouaq et Nkambou, 2008). Ainsi, le concept du domaine est considéré comme classe si :

- c'est le sujet principal de diverses phrases
 - c'est un sujet fréquent dans le domaine d'intérêt
 - il est lié à d'autres termes de domaine par le biais de relations sémantiques.
- (Zouaq et Nkambou, 2008)

5. Object Constraint Language : permet d'associer des contraintes à des contextes

Le diagramme des classes représente une vue statique du système, ce qui permet de faire ressortir les entités ou objets intrinsèquement liés au domaine d'application ⁶. La modélisation statique permet donc de définir la sémantique des objets au niveau du système. Plusieurs travaux dans la littérature nous parlent de l'utilisation d'UML comme outil de modélisation d'ontologie, citons par exemple les travaux de (Bergenti et Poggi, 2000) et (Cranefield et Purvis, 1999). La figure 4.7 décrit l'ontologie du domaine de notre solution en termes de concepts (catégories, entités du domaine), de prédicats (assertions sur les propriétés des concepts), d'actions (effectuées dans le domaine) et de leurs relations.

Nous avons adopté RDF pour représenter nos ontologies, car cela fait partie à la fois du W3C ⁷ (1999) et des spécifications du FIPA (2001) ⁸.

6. Lounis, Hakim, notes de cours de modélisation cognitive des systèmes complexes

7. <https://www.w3.org/News/1999>

8. <http://www.fipa.org/specs/fipa00086/>

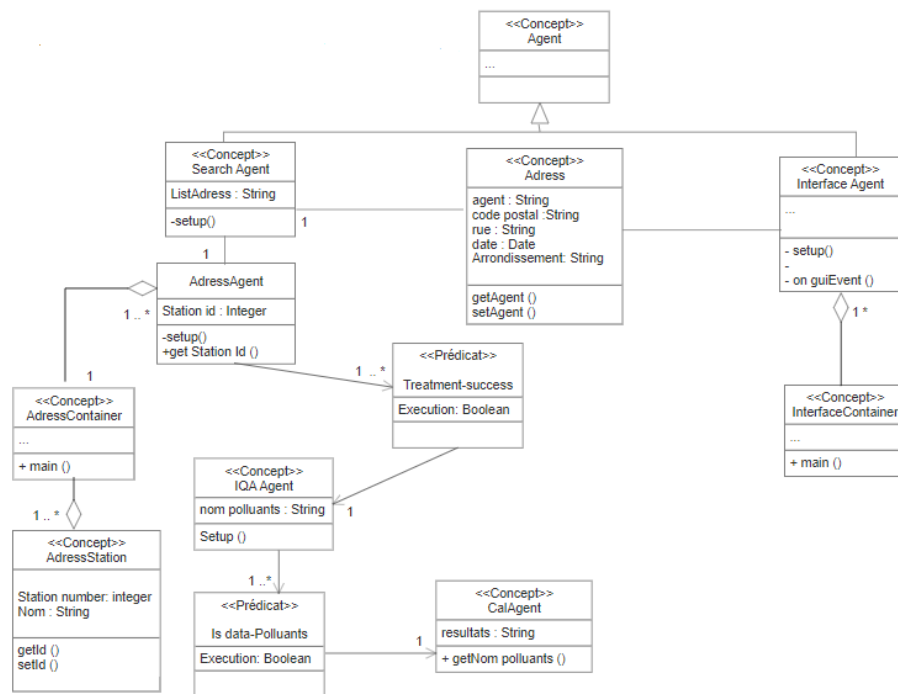


Figure 4.7 Diagramme d'ontologie du domaine du module IQA

4.14.2 Ontologie de communication

Le diagramme de description de l'ontologie de la communication est une représentation des interactions (sociales) des agents. En effet, c'est un diagramme de classes qui met en évidence les agents et toutes leurs interactions.

Selon les normes du FIPA, les communications consistent en des actes de langage (Searle, 1969) et sont regroupées par le FIPA dans plusieurs protocoles d'interaction qui définissent la séquence des messages attendus. En conséquence, chaque communication est caractérisée par trois attributs, que nous regroupons dans une classe d'association. En conséquence, chaque communication est caractérisée par trois attributs : la communication avec une ontologie, un langage expressif et un protocole d'interaction. En concevant ce diagramme, nous partons des résultats qu'une classe est introduite pour chaque agent identifié, puis une association est introduite pour chaque communication entre deux agents.

Dans la figure 4.8 l'agent d'interface «InterfaceAgent» démarre une conversation (QueryForStationid) avec l'agent de recherche «SearchAgent». La conversation contient l'ontologie de la demande, le protocole de requête et le langage RDF. Cela signifie que «SearchAgent» souhaite effectuer un acte vocal basé sur le protocole de requête du FIPA afin de demander à l'agent de recherche «SearchAgent» de trouver l'identifiant de la borne de données IQA en fonction de l'arrondissement qui a été choisi dans la requête.

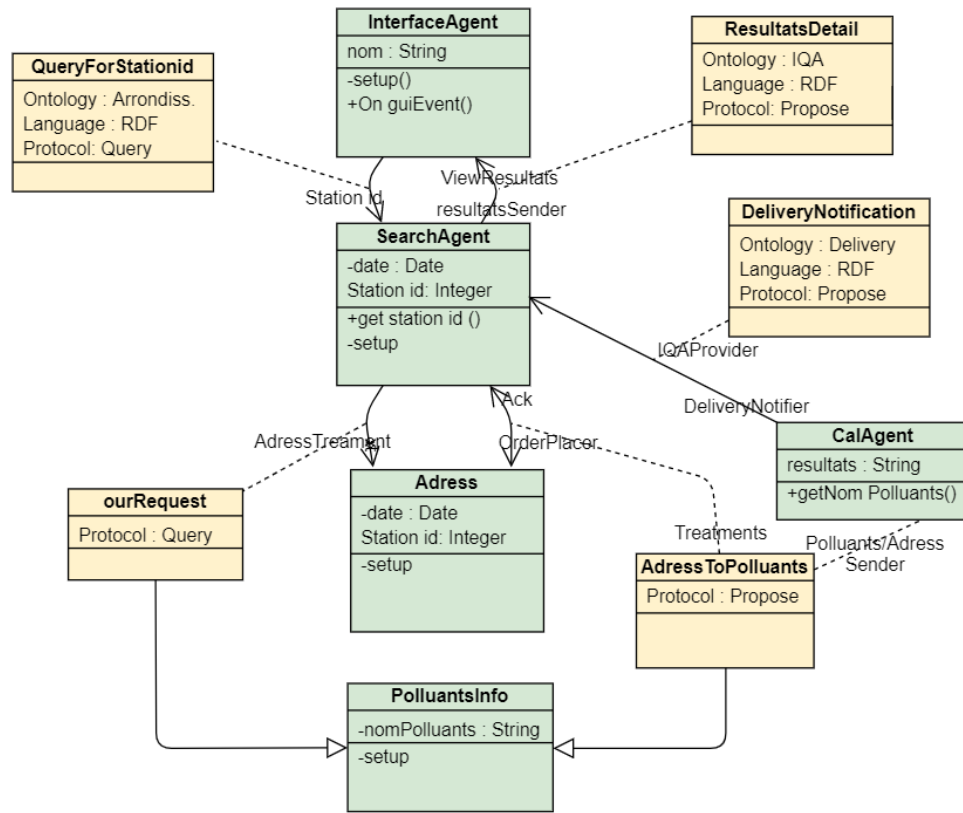


Figure 4.8 Diagramme d'ontologie de communication du module IQA

4.15 Phase III de la méthodologie PASSI

La troisième phase est celle de description des rôles. Cette phase modélise le cycle de vie d'un agent en tenant compte de la description de ses rôles, des collaborations, de la définition de la structure des agents dont il a besoin et des conversations dans lesquelles il est impliqué. Dans cette phase, nous pouvons également introduire les règles sociales de la société des agents (règles organisationnelles) et les lois comportementales envisagées par Newell dans ses travaux sur le niveau social des agents. Ces lois peuvent être exprimées en OCL ou d'une autre manière formelle ou semi-formelle en fonction de nos besoins. (Zambonelli *et al.*, 2001) et (Newell, 1982).

4.15.1 Description des rôles des agents

La description des rôles des agents est réalisée à partir d'un diagramme de classes dans lequel les classes sont utilisées pour représenter les rôles (la syntaxe et la notation UML sont ici légèrement modifiées afin de représenter les concepts liés aux agents). La figure 4.9 montre le diagramme de description des rôles des agents où chaque agent est symbolisé par un package contenant les classes de ses rôles et chaque rôle est obtenu en composant plusieurs tâches via un comportement.

De plus, chaque tâche est liée à une action ou à un ensemble d'actions, et par conséquent, la liste des tâches décrit ce qu'un rôle est capable de faire ; cela peut également être utile pour identifier les modèles réutilisables. De plus, ce diagramme nous montre les connexions entre les rôles du même agent, représentant les changements de rôle (ligne pointillée avec le nom [CHANGEMENT DE RÔLE]). Cette connexion est décrite comme une relation de dépendance, car nous voulons signifier la dépendance du deuxième rôle sur le premier.

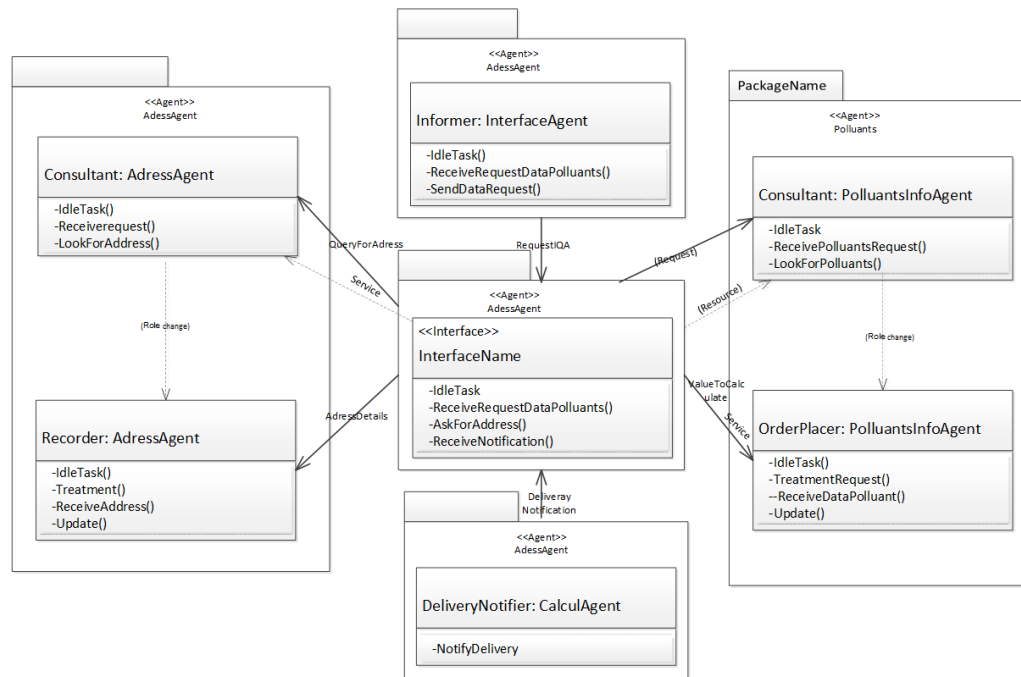


Figure 4.9 Diagramme de description des rôles du module IQA

4.15.2 Phase de définition de la structure des agents

Cette phase influence et est influencée par la phase de description du comportement de l'agent. La phase de définition de la structure de l'agent produit plusieurs diagrammes de classes logiquement subdivisés en deux vues : la vue multi-agents et la vue mono-agent. Dans la première vue, nous attirons l'attention sur l'architecture générale du système et ainsi nous pouvons trouver des agents et leurs tâches. Dans la dernière, nous nous concentrons sur la structure interne de chaque agent, révélant ainsi tous les attributs et méthodes de la classe d'agent.

La figure 4.10 représente la structure du module IQA dans son ensemble. Le diagramme nous montre les classes du système où chacune des classes symbolise un agent dans le module IQA. Les acteurs sont signalés afin de représenter les interactions significatives des agents avec l'environnement. Les compartiments d'attributs

peuvent être utilisés pour représenter la connaissance de l'agent comme ce fut le cas dans le diagramme d'ontologie de communication, tandis que les compartiments d'opérations sont utilisés pour signifier les tâches de l'agent

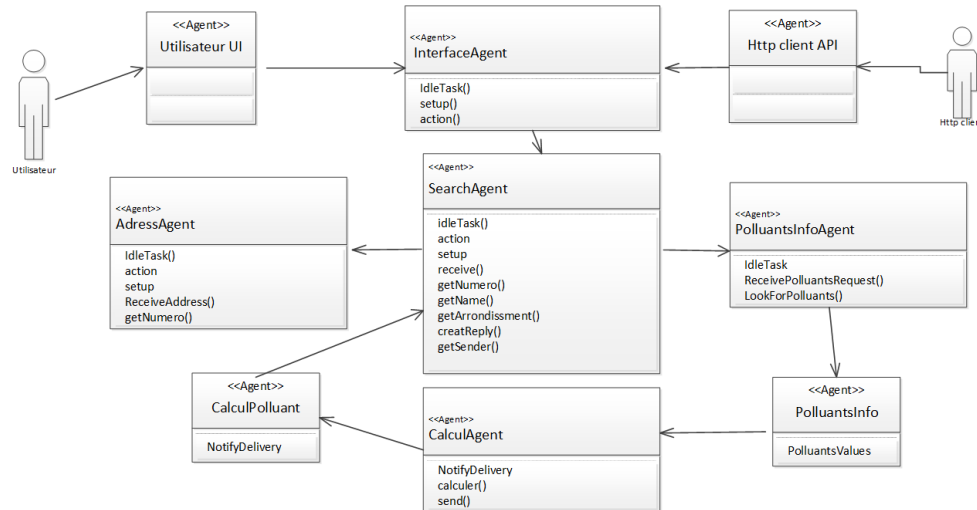


Figure 4.10 Structure du module IQA

4.15.3 Définition de la structure interne de l'agent

Dans cette phase, un diagramme de classes est utilisé pour chaque agent afin d'illustrer la structure interne de l'agent à travers toutes les classes qui représentent l'agent comme : la classe principale de l'agent et les classes internes qui participent à l'identification de ses tâches. Pour simplifier notre document, nous nous sommes contentés de présenter seulement la structure interne de l'agent de recherche (SerachAgent). À ce stade, nous configurons les attributs et les méthodes de la classe qui représente la structure interne de l'agent ainsi que ceux des autres classes. Cette démarche nous permet d'obtenir une structure détaillée du logiciel, prête à être implémentée. La figure 4.11 nous présente la structure interne de l'agent de recherche (SearchAgent), elle met en évidence les divers attributs et méthodes de ce dernier.

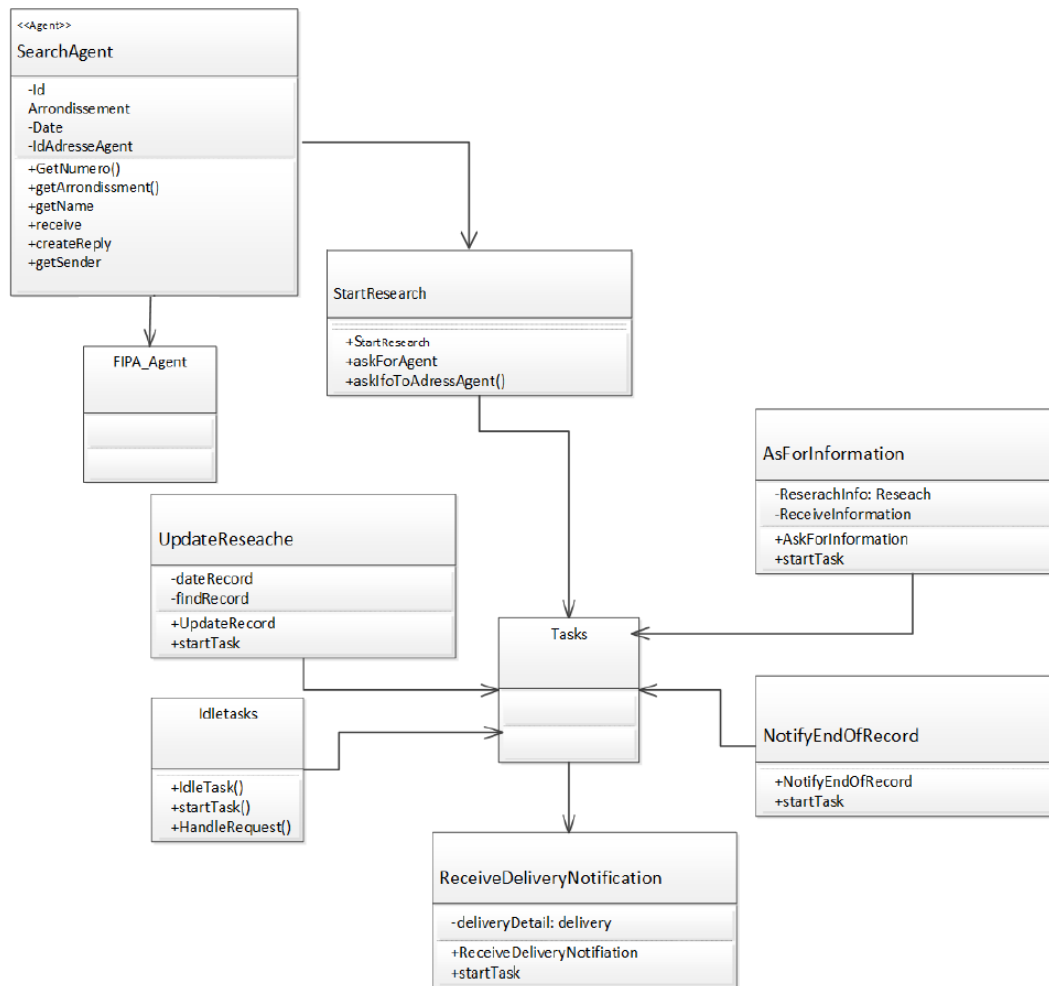


Figure 4.11 Structure interne de l'agent

4.16 Quatrième phase de la méthodologie PASSI

Selon la méthodologie PASSI le code source du SMA est traité à partir de la quatrième phase. De ce fait, nous avons présenté quelques codes sources de notre prototype du module IQA en fonction des différents modèles présentés dans les phases précédentes.

JADE offre plusieurs types de comportements simples, qui sont : *OneShotBehaviour*, *cyclicBehaviour* et *GenericBehaviour*, *parallelBehaviour*. De plus, JADE

offre un ensemble de comportements qui servent à présenter des tâches complexes. Tous ces comportements sont issus de la classe mère *jade.core.behaviours CompositeBehaviour*.

La collaboration des agents JADE est possible grâce à l'envoi de messages, les agents JADE possèdent une sorte de liste qui contient les messages selon l'ordre chronologique de leur arrivée. Ils utilisent des messages conformes aux spécifications de la FIPA (FIPA-ACL). Tous ces messages sont des instances de la classe *ACLMessage* du package *jade.lang.acl*. D'une manière générale, les messages sont composés de :

- L'émetteur du message : ce champ est rempli de manière automatique lors de l'envoi du message.
- L'ensemble des récepteurs du message : un message peut être envoyé à plusieurs agents simultanément.
- L'acte de communication : le but de l'envoi du message en cours, l'intention (informer l'agent récepteur, appel d'offre, réponse à une requête (exemple : INFORM)).
- Le contenu du message : le message qu'on veut envoyer.
- Un ensemble de champs facultatifs, comme la langue utilisée, l'ontologie, le timeout, l'adresse de réponse, etc.

4.16.1 Codes sources de l'agent de recherche dans la solution proposée

Dans cette section nous présentons les codes sources de l'agent de recherche et de son conteneur. Nous avons vu dans les sections 4.12.2 et 4.12.3 que chaque agent joue un rôle et les rôles sont définis à partir d'un ensemble de tâches. Les différentes tâches de nos agents doivent obéir à des règles et doivent être écrites sous une forme compréhensible par la plateforme JADE. Pour qu'un de nos agents

exécute une tâche, nous avons tout d'abord besoin de définir cette tâche. Les tâches dans JADE (appelées des *behaviours* ou des comportements) sont des instances de la classe *jade.core.behaviours*. Pour qu'un de nos agents puisse exécuter une tâche, on attribue cette tâche par la méthode *addBehaviour* (*Behaviour b*) de la classe *jade.core.Agent* ou chaque comportement (*Behaviour*) implémente au moins deux méthodes qui sont :

- *action()* : qui fait référence aux opérations à exécuter par le comportement ;
- *done()* : qui exprime la terminaison ou pas du comportement en question.

4.16.1.1 Agent de recherche (SearchAgent)

La figure 4.12 montre la réception d'un message envoyé par l'agent d'interface à l'agent de recherche à travers un comportement cyclique qui exécute tout le temps une méthode *action()*. Le *CyclicBehaviour* est une instance de la classe *jade.core.behaviours.CyclicBehaviour*, ce comportement permet d'exécuter sa tâche d'une manière répétitive.

La classe *CyclicBehaviour* implémente la méthode *done()* qui retourne toujours false. Par exemple, dans notre cas, la méthode *action()* qui se trouve dans le comportement cyclique va être exécutée de manière répétitive, c'est comme si cette méthode se trouvait dans une boucle infinie.

Le code se résume à montrer les différents comportements, la réception et l'envoi de messages ACL de l'agent de recherche du module IQA. Il nous montre que l'agent de recherche reçoit les informations de l'agent d'interface et lui envoie un message de confirmation. Ensuite cet agent va consulter la liste des agents qui ont publié leurs services de type recherche d'adresse (search-adress) afin d'avoir l'ID de la borne de l'arrondissement choisi par l'utilisateur ou le client http.

```

1  package com.middleware.search;
2  import ...
13
14  public class SearchAgent extends Agent {
15      private AID[] listAddress;
16
17      @Override
18      protected void setup() {
19
20          ParallelBehaviour parallelBehaviour = new ParallelBehaviour();
21          addBehaviour(parallelBehaviour);
22          parallelBehaviour.addSubBehaviour((CyclicBehaviour) () -> {
23
24              ACLMessage aclMessage = receive();
25              if(aclMessage != null){
26                  try {
27
28                      // cet agent recois les informations de l'interface graphique
29                      // et il envoi un ack a l'interface graphique
30                      //TODO comment gerer la reception de plusieurs msg
31                      Address address = (Address) aclMessage.getContentObject();
32                      String stationId = aclMessage.getContent();
33                      if(address !=null) {
34
35                          System.out.println(address.getArrondissement());
36                          ACLMessage aclMessage1 = aclMessage.createReply();
37                          aclMessage1.setPerformative(ACLMessage.INFORM);
38                          aclMessage1.setContent("Arrondissement reçu, traitement en cours!");
39                          send(aclMessage1);
40                      }
41                  }
42              }
43          });
44      }
45  }

```

Figure 4.12 SearchAgent

La classe *parallelBehaviour* permet d'exécuter plusieurs comportements (Behaviours) en parallèle et ceci d'une manière indépendante. Donc, dans notre exemple, après avoir invoqué la méthode *action()* d'un sous-comportement, on pointe sur le comportement suivant sans attendre que le premier comportement termine son exécution. L'ajout d'un sous-comportement se fait par la méthode *addSubBehaviour()*.

Comme nous l'avons mentionné dans la section (4.4), tous les agents du système vont publier leurs services auprès de l'agent DF (Directory Facilitator). Chacun des services publiés va avoir un nom et un type. La figure 4.13 montre une consultation de la liste des agents qui ont publié leurs services de type search-address auprès de l'agent DF.

```

43 // Ensuite cet agent va consulter la liste des agents qui s'occupe de des adresses
44 // qui ont publié leur service de type search-address
45 DfAgentDescription agentDescription = new DfAgentDescription();
46 ServiceDescription serviceDescription = new ServiceDescription();
47 serviceDescription.setType("address");
48 serviceDescription.setName("search-address");
49
50
51 try {
52     DfAgentDescription[] dfAgentDescriptions = DFService.search(myAgent, agentDescription);
53     AID agentAddress = dfAgentDescriptions[0].getName();
54     ACLMessage message = new ACLMessage(ACLMessage.CFP);
55     message.setContent(address.getArrondissement());
56     message.addReceiver(agentAddress);
57     send(message);
58 } catch (FIPAException e) {
59     e.printStackTrace();
60 }
61
62 }
63 else if(stationId !=null){
64
65     System.out.println("J'ai reçu la station id : " + stationId);
66 }
67
68 } catch (UnreadableException e) {
69     e.printStackTrace();
70 }
71 }
72 else {...}
73
74 }
75
76 }

```

Figure 4.13 SearchAgent enregistrement au DF

4.16.1.2 Conteneur de recherche (SearchContainer)

La figure 4.14 montre le code source du conteneur d'agent de recherche (*SearchContainer*), qui contient un ensemble de bibliothèques nécessaires à son fonctionnement, la création de l'objet *AgentContainer* identifié par son nom et le démarrage de l'agent de recherche. Ainsi, l'agent qui se trouve à l'intérieur du conteneur n'est démarré automatiquement qu'une fois que le conteneur est mis en marche.

```

1 package com.middleware.search;
2 import com.middleware.address.AddressAgent;
3 import jade.core.Profile;
4 import jade.core.ProfileImpl;
5 import jade.core.Runtime;
6 import jade.wrapper.AgentController;
7 import jade.wrapper.ContainerController;
8 import jade.wrapper.StaleProxyException;
9
10 public class SearchContainer {
11
12     public static void main(String[] args) {
13         try {
14             Runtime runtime = Runtime.instance();
15
16             Profile profile = new ProfileImpl( isMain: false);
17             profile.setParameter(Profile.MAIN_HOST, s1: "localhost");
18             profile.setParameter(Profile.CONTAINER_NAME, s1: "SearchContainer");
19
20             ContainerController container = runtime.createAgentContainer(profile);
21             try {
22                 AgentController ag = container.createNewAgent( nickname: "searchAgent", SearchAgent.class.getName(), new Object[] {});
23                 ag.start();
24             } catch (StaleProxyException e) {
25                 e.printStackTrace();
26             }
27         } catch (Exception e) {
28             e.printStackTrace();
29         }
30     }
31 }

```

Figure 4.14 SearchContainer

4.17 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les dimensions que partagent l'IdO et le SMA. Nous avons relaté quelques travaux réalisés justifiant la fusion entre ces deux technologies. Ensuite, nous avons présenté l'architecture globale du module IQA sous forme de conteneur où chaque conteneur contient son agent respectif, ces derniers communiquent entre eux via des messages. Ensuite, nous avons présenté les principales technologies utilisées lors du développement de notre solution.

La majeure partie de ce chapitre a été consacrée aux étapes de conception du module IQA, la conception a été réalisée via la méthodologie PASSI de Cossentino, basée sur la notation UML, qui donne une vue globale et détaillée sur des différentes étapes du développement d'un logiciel SMA, (Cossentino, 2012). À travers cette méthodologie, nous avons présenté différents diagrammes commel es cas

d'utilisation du système, les rôles, la réalisation des tâches des agents, le comportement individuel et global de l'ensemble du groupe des agents du système, etc. Nous avons terminé ce chapitre en présentant les messages de communication à travers le système entre les agents et les codes sources de l'agent de recherche et de son conteneur.

Le chapitre suivant sera consacré à la vérification, à la validation du module IQA via des simulations, pour ensuite présenter les résultats et faire une brève analyse de ces résultats.

CHAPITRE V

PRÉSENTATION ET STRATÉGIE DE VALIDATION DU MODULE IQA

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons fourni les détails du module IQA ainsi que la stratégie adoptée pour une validation empirique. Pour mener nos scénarios de tests, nous avons présenté l’environnement considéré, ensuite la méthode de calcul des indices et sous-indices de la qualité de l’air que nous avons adoptée. De plus, nous avons effectué une brève présentation de la méthodologie sur laquelle nous nous sommes appuyés pour valider le module IQA.

5.1.1 Environnement considéré

Pour réaliser notre simulation, nous nous sommes tournés vers le RSQA (Réseau de surveillance de la qualité de l’air) de la ville de Montréal qui capte les données via des bornes de différentes stations qui sont identifiées à partir d’un numéro unique, d’un nom, etc. Comme ville intelligente, Montréal possède déjà un vaste réseau de capteurs qui génèrent un ensemble de données (Khomsî, 2016). Beaucoup de ces données sont soit à l’état brut ou sont déjà traitées et proviennent de plusieurs sources hétérogènes. Ces données sont ouvertes au public et disponibles en plusieurs formats.

La Ville de Montréal mesure la qualité de l'air sous la forme d'une valeur numérique appelée «indice de la qualité de l'air (IQA)»¹. La valeur 50 de cet indice correspond à la limite supérieure acceptable pour chacun des polluants² mesurés. L'indice horaire rapporté est le plus élevé des sous-indices calculés pour cinq des polluants mesurés en continu dans les stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal. Pour le besoin de la recherche nous avons développé seulement le module de la qualité de l'air afin de réaliser notre simulation.

5.1.2 Présentation des polluants et motivation du choix de développement du module IQA

Le service de l'environnement de la ville de Montréal est l'entité chargée de gérer les déchets, la qualité de l'air, de l'eau, les sols et des aliments. Ce service nous a fourni les informations nécessaires afin de comprendre le traitement et les calculs de l'IQA de la ville de Montréal.

Bien avant de présenter quelques détails sur la qualité de l'air, il est important de chercher à la définir. En fait, par définition « la qualité de l'air est vue comme étant le niveau de propreté de l'air ». L'indice de la qualité de l'air (IQA), est vu comme étant une description périodique sous une forme simple (un qualificatif ou un chiffre) l'état de l'environnement local, urbain ou régional» (Garcia et Colosio, 2001).

Pour mesurer la qualité de l'air, la ville de Montréal utilise des analyseurs de types divers comme : SO_2 , CO , O_3 et $PM_{2.5}$. Ces analyseurs mesurent en continu les concentrations de polluants pour calculer l'indice de la qualité de l'air (IQA). Cet

1. <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/rsqa-indice-qualite-air>

2. CO : Monoxyde de carbone; NO_2 : Dioxyde d'azote; O_3 : Ozone troposphérique; PM : Particules fines respirables; SO_2 : Dioxyde de soufre

indice constitue une cote de la qualité de l'air qui est mise à jour toutes les heures. Des technologies à base de capteurs sont disposées sur le territoire de la ville de Montréal proche du trafic, dans les zones industrielles, via des stations de métro, afin de capter les données des polluants, et les transmettre sur le réseau de la ville. Avoir de mauvaise de qualité d'air est probablement l'une des pires inquiétudes sanitaires et environnementales de ce siècle, puisque nous respirons une grande quantité tous les jours, soit en moyenne 10 000 à 20 000 litres d'air³ par jour.

Ce qui nous a motivé à développer ce module par rapport aux autres modules (transport, tourisme, agriculture, infrastructure, etc.) est surtout son côté sanitaire. Depuis quelques temps, le monde vit actuellement une situation particulière avec la pandémie de la Covid19; on a tendance à oublié les autres menaces qui sont fort souvent aussi meurtrières que la Covid, comme les différentes sources de pollution (chimique, biologique et physique). Ces dernières, n'ont pas cessé d'avoir un effet néfaste sur la santé humaine. Selon l'OMS⁴, la pollution de l'air représente un risque environnemental majeur pour la santé humaine (YOUNES *et al.*, 1997) et (Baldasano *et al.*, 2003). Selon l'OMS, 7 millions de personnes meurent à chaque année à cause de la pollution de l'air.⁵

Les études d'Aphekom⁶ ont montré clairement l'impact de la pollution de l'air sur la santé humaine en Europe. Cette étude d'épidémiologie est le résultat de la mobilisation de 60 scientifiques, pendant trois ans. Son périmètre géographique a

3. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/qualite-de-l-air-exterieur-10984/article/qualite-de-l-air-sources-de-pollution-et-effets-sur-la-sante>.

4. [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

5. <https://www.who.int/health-topics/air-pollutiontab=tab1>

6. <https://www.respire-asso.org/aphekom-3-ans-detude-dans-12-villes-europeennes/>

concerné 12 pays (25 villes) soit environ 39 millions d'habitants.

Cette étude nous a montré que vivre à proximité des routes exacerbe les maladies respiratoires. Les chercheurs ont avancé que plus de 50% de la population des villes seraient donc exposés à des niveaux de polluants toxiques notables. Dans les villes étudiées, vivre à proximité de routes pourrait être responsable de plus de 30% de nouveaux cas d'asthme chez les enfants, de maladies pulmonaires obstructives chroniques (MPOC) et de maladies coronariennes chez les personnes de 65 ans et plus (Jalaludin et Cowie, 2014).

5.1.3 Méthode de calcul de l'indice et sous-indice de la qualité de l'air

L'indice est calculé à partir de la formule : $\text{Indice} = (\text{mesure} / \text{norme ou valeur IQA}^*) \times 50$. Toutes les heures, un indice et des sous-indices de la qualité de l'air sont calculés à partir des valeurs des polluants qui se trouvent dans différentes bornes de station de la ville de Montréal.

Dans la formule qui calcule l'indice, la norme ou la valeur IQA sont représentées par des valeurs de référence utilisées pour calculer les sous-indices de la qualité de l'air dans chaque station. Le sous-indice dont le résultat est le plus élevé est considéré comme l'indice de la qualité de l'air de la journée. La liste des valeurs de référence pour les polluants utilisée est :

- Particules respirables (2.5 : microns de diamètre) $PM_{2.5}$ [3 heures mobiles] : $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁷.
- Dioxyde de soufre (SO_2) [10 minutes mobiles] : $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Monoxyde de carbone (Co) [Horaire] : $35 \text{ mg}/\text{m}^3$
- Ozone (O_3) [Horaire] : $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$

7. Micro gramme/mètre cube= masse de particules par unité de volume d'air.

- Dioxyde d'azote (NO_2) [Horaire] : 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les différentes valeurs de l'indice de la qualité de l'air (IQA) sont présentées dans le tableau 5.1.

Bon	De 1 à 25
Acceptable	De 26 à 50
Mauvais	51 ou plus

Tableau 5.1 Valeur de l'indice

Pour le $PM_{2.5}$ et SO_2 , on calcule d'abord leurs moyennes mobiles⁸. Les données des polluants sont en ppb⁹ sur le site de la ville de Montréal à l'exception du $PM_{2.5}$ qui est en g/m^3 . De ce fait, nous avons converti les normes ou valeurs IQA en ppb avant de réaliser les calculs, le tableau 5.2 nous présente les valeurs de référence des polluants nous permettant de réaliser les conversions.

8. La moyenne mobile inclut la moyenne sur la période de temps donnée avec les heures passées, donc pour les $PM_{2.5}$, la moyenne mobile de 3 heures est la somme des valeurs des 3 heures précédentes divisée par 3 ($V1h+V2h+V3h$)/3. Même calcul pour SO_2 , à la seule différence, qu'on a utilisé les données minutes sur les 10 dernières minutes. Donc, pour 12 :00 am, on est allé chercher les données par minutes de la journée précédente.

9. Parts per billion (parties par milliard), nombre de molécules de gaz à effet de serre considéré par milliard de molécules d'air. Une partie par milliard équivaut à une particule existant dans une substance composée de 999 999 999 autres particules. 1 ppb équivaut à 1×10^{-9} ou 0,0000001 de la substance totale.

O3	1 ppb =	1,96	µg/m3
CO	1 ppb =	1,15	µg/m3
SO2	1 ppb =	2,63	µg/m3
NO2	1 ppb =	1,88	µg/m3

Tableau 5.2 conversion des facteurs

Pour chacun des polluants mesurés dans les stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air de la ville de Montréal, un sous-indice est d'abord calculé. Le sous-indice se calcule en divisant la concentration mesurée d'un polluant par la valeur de référence correspondante et en multipliant le résultat obtenu par 50. La valeur de référence d'un polluant est la concentration à partir de laquelle on considère que la qualité de l'air est « mauvaise ». Cette valeur est déterminée selon des critères de protection de la santé humaine. Les valeurs de références que nous avons utilisées pour calculer l'indice de la qualité de l'air dans notre solution middleware sont dans le tableau 5.3. La ville de Montréal utilise les mêmes valeurs.

Contaminant	Type de mesure	Valeur de référence
Ozone (O₃)	Moyenne horaire	82 ppb
Particules fines (PM_{2,5})	Moyenne des trois dernières heures	35 µg/m ³
Dioxyde de soufre (SO₂)	Sur dix minutes	190 ppb
Dioxyde d'azote (NO₂)	Moyenne horaire	213 ppb
Monoxyde de carbone (CO)	Moyenne horaire	30 ppm

Tableau 5.3 valeurs de référence

5.1.4 Structuration des données

Pour le besoin de l'expérimentation nous avons téléchargé les données à partir du site de la ville de Montréal pour ensuite créer une base de données en MySQL dénommée «mtldonnées». Nous avons obtenu trois (3) fichiers au format CSV que nous avons convertis en format .sql, leurs noms respectifs sont : polluants.sql, station.sql et so2.sql.

- Le fichier polluants.sql contient des informations sur toutes les valeurs des polluants qui participent aux calculs de la qualité de l'air, les valeurs sont en heures, par exemple, $PM_{2.5}$, O_3 , etc. Le tableau 5.4 nous présente la structure de la table des polluants du module IQA.
- Le fichier station.sql contient les noms et numéros de stations des différentes stations que nous avons choisies pour notre expérimentation.
- Le fichier SO_2 contient toutes les valeurs du polluant SO_2 et ces valeurs sont en minutes.

Field	Type	Null	Key	Default	Extra
id	int	NO	PRI	NULL	auto_increment
date	varchar(255)	YES		NULL	
station_id	varchar(255)	YES		NULL	
o3	varchar(255)	YES		NULL	
no	varchar(255)	YES		NULL	
no2	varchar(255)	YES		NULL	
so2	varchar(255)	YES		NULL	
co	varchar(255)	YES		NULL	
pm2_5	varchar(255)	YES		NULL	
pm10	varchar(255)	YES		NULL	
pst	varchar(255)	YES		NULL	
bc1_370nm	varchar(255)	YES		NULL	
bc6_880nm	varchar(255)	YES		NULL	

Tableau 5.4 Table des données des polluants

5.1.5 Choix technologiques

Nous avons fait le choix du langage Java comme langage de programmation de la solution. La plupart des choix ont été effectués en fonction de leur pertinence, des exigences de la solution et des propositions retrouvées dans la littérature du développement des systèmes SMA. Le tableau 5.5 nous résume les différentes technologies utilisées pour réaliser le développement du prototype IQA.

Choix	Description
Intelligy	Intelligy est utilisé comme environnement de développement intégré, il est développé par JetBrains
GitHub	GitHub est un logiciel libre de gestion de versions décentralisé créé par Linus Torvalds. Il est utilisé comme système de gestion du code source afin de faciliter le travail
Hibernate	Hibernate est un Framework open source qui gère la persistance des objets dans une base une base de données relationnelle.
Jade	Java Agent Développent est un Framework de développement de système multi-agents, open-source et basé sur le langage java. Il a été choisi en raison de la simplicité du Framework pour le développement d'un SMA. De plus, la documentation est abondante ce qui a permis de diminuer la courbe d'apprentissage
Java	Java est un langage de programmation, il est utilisé pour programmer le SMA. De plus, il est le langage de programmation contraint par le choix du Framework Jade.
Java fx	Java fx est une bibliothèque java de création d'interface graphique pour différentes sortes d'applications. Elle a été utilisée pour créer les interfaces graphiques nécessaires à l'interaction entre un utilisateur et le MISMA-IdO.
Maven	Maven est un outil de gestion des dépendances projets logiciels java en général et java EE en particulier.
MySQL	MySQL est un système de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR). Il est utilisé dans le projet pour gérer la base de données en combinaison avec Hibernate.
Wamp	Wamp est une plateforme de développement Web, environnement comprenant trois serveurs (Apache, MySQL, un interpréteur de script (PHP).
Postman	Pour tester les requêtes http des tests client http

Tableau 5.5 Choix technologiques

5.1.6 Configurations matérielles

Pour la configuration matérielle, pour conduire les expérimentations nous avons utilisé un ordinateur portable disposant d'un micro-processeur haut de gamme, doté de 4 cœurs + 2 à 4 cœurs virtuels, de 8 Mo de mémoire cache L3 et de 32 Go de mémoire RAM. La figure 5.1 présente une vue globale des éléments de configuration de l'ordinateur en question.

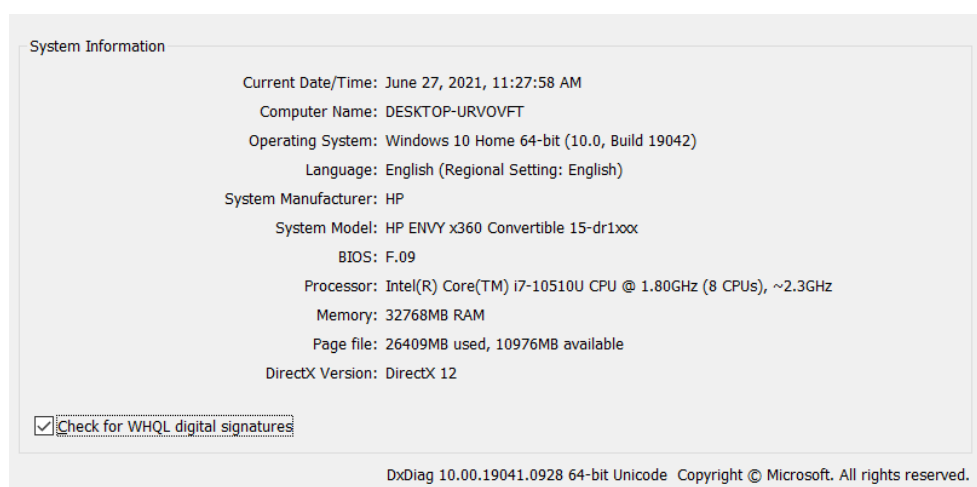


Figure 5.1 Configurations matérielles

5.1.7 Présentation du module IQA

Cette section présente les différentes étapes de fonctionnement du module IQA. Une fois que les paramètres de recherche IQA sont envoyés pour une demande de traitement sur la qualité de l'air, c'est l'agent d'interface (InterfaceAgent) qui prend la relève et demande à l'agent DF lequel des agents s'occupe de la recherche afin d'envoyer un message de type ACL à l'agent de recherche (SearchAgent) qui à son tour va envoyer un message auprès de l'agent DF pour la continuité du processus.

La figure 5.2 présente le contenu des messages envoyés par l'agent interface (InterfaceAgent) à l'agent de recherche (SearchAgent) concernant une demande d'adresse. Tandis que, la figure 5.3 montre une consultation (une demande d'information) de l'agent de recherche et l'agent DF, afin de savoir quel est l'agent responsable du traitement des adresses des différentes bornes de captures de données (addressesAgent). Lorsque l'agent de recherche à l'information sur l'agent en question, il lui envoie un CFP¹⁰ afin d'informer l'agent d'adresse de son intention de communiquer.

10. Call for proposal

The screenshot shows the 'ACL Message' dialog box with the 'Envelope' tab selected. The 'Sender' field contains 'Vi...' and the 'Receivers' field contains 'searchAgent@192.168.0.104:106'. The 'Reply-to' field is empty. The 'Communicativ...' dropdown is set to 'inform'. The 'Content' field contains a JSON-like structure: (set (service-description .name search-address .type address))). The 'Language' is 'fipa-slo', 'Encoding' is empty, 'Ontology' is 'FIPA-Agent-Management', and 'Protocol' is 'fipa-request'. The 'Conversation-ID' is '104:1099/ADE1589337040224-0', 'In-reply-to' is '104:1099/ADE1589337040224-0', 'Reply-with' is '0:104:1099/ADE1589337040244', and 'Reply-by' is 'Vi...'. The 'User Properti...' field is empty. The 'OK' button is at the bottom.

Figure 5.2 Message ACL de l'agent d'interface à l'agent de recherche

The screenshot shows the 'ACL Message' dialog box with the 'Envelope' tab selected. The 'Sender' field contains 'Vi...' and the 'Receivers' field contains 'dfq192.168.0.104:1099/JMBE'. The 'Reply-to' field is empty. The 'Communicativ...' dropdown is set to 'request'. The 'Content' field contains a JSON-like structure: (addresses (sequence http://enloja:7778/acc/ (search (df-agent-description) (search-constraints (max-results -1))))). The 'Language' is 'fipa-slo', 'Encoding' is empty, 'Ontology' is 'FIPA-Agent-Management', and 'Protocol' is 'fipa-request'. The 'Conversation-ID' is '104:1099/ADE1589337040224-0', 'In-reply-to' is '104:1099/ADE1589337040224-0', 'Reply-with' is '104:1099/ADE1589337040224-0', and 'Reply-by' is 'Vi...'. The 'User Properti...' field is empty. The 'OK' button is at the bottom.

Figure 5.3 Message ACL de l'agent de recherche à l'agent DF

La figure 5.4 nous montre un retour de message, transféré de l'agent de recherche (SearchAgent) à l'agent d'interface (InterfaceAgent), afin d'informer l'agent d'interface de la réception de message concernant l'arrondissement demandé.

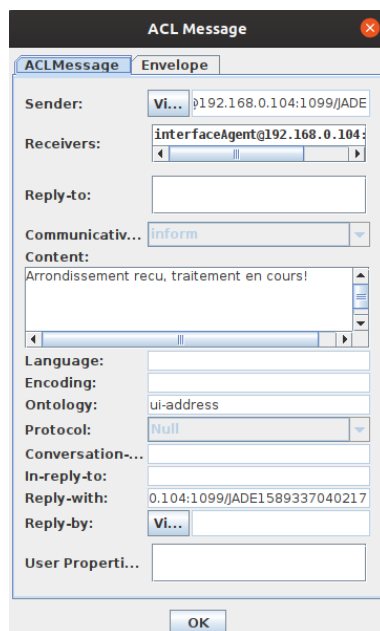


Figure 5.4 Message ACL de l'agent de recherche à l'agent d'interface

Une fois l'adresse trouvée, une demande est envoyée auprès de l'agent de la qualité de l'air (AirQualAgent) afin de trouver non seulement les polluants mais aussi chacune des valeurs de ces polluants en fonction de l'adresse de la borne de capteurs et de la date qui a été choisie. La figure 5.5 montre les informations de messages ACL envoyées de l'agent de recherche à l'agent de la qualité de l'air afin de trouver les polluants nécessaires aux calculs IQA.

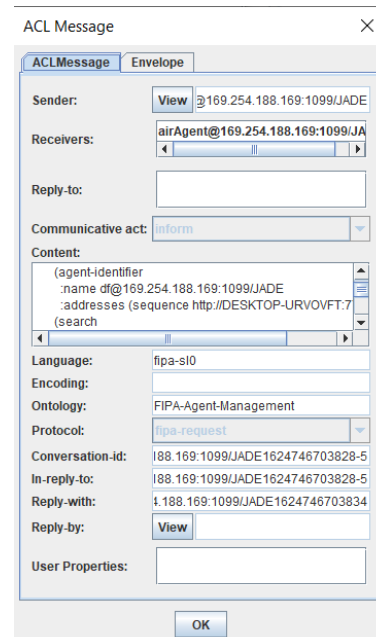


Figure 5.5 Message ACL de l'agent de recherche à l'agent qualité d'air

La figure 5.6 montre l'envoi d'un acte de communication CFP auprès de l'agent de calcul afin de calculer les sous-indices de chaque polluant à partir de la méthode de calcul de l'indice de la qualité de l'air de la ville de Montréal et la figure 5.7 montre l'envoi des résultats (sous la forme d'indice) de l'agent de calcul à l'agent d'interface qui plus tard va transmettre les résultats à l'utilisateur.

ACL Message

ACLMessage Envelope

Sender: View @169.254.188.169:1099/JADE

Receivers: calculAgent@169.254.188.169:1099

Reply-to:

Communicative act: cfp

Content:

Language:

Encoding:

Ontology:

Protocol: Null

Conversation-id:

In-reply-to:

Reply-with:

Reply-by: View

User Properties: JADE-Encoding

OK

Figure 5.6 Message ACL de l'agent de recherche à l'agent qualité d'air

ACL Message

ACLMessage Envelope

Sender: View @169.254.188.169:1099/JADE

Receivers: interfaceAgent@169.254.188.169:1099

Reply-to:

Communicative act: inform

Content: L'indice est :19

Language:

Encoding:

Ontology:

Protocol: Null

Conversation-id:

In-reply-to:

Reply-with:

Reply-by: View

User Properties:

OK

Figure 5.7 Message ACL d'envoi d'indice

5.2 Interaction chez les agents du prototype IQA

Cette section présente les différents messages envoyés par l'agent d'interface (InterfaceAgent) à l'agent de recherche (SearchAgent) concernant une demande d'adresse. Puis, elle présente le message de l'agent de recherche à l'agent DF afin de lui demander quel est l'agent qui s'occupe du traitement des adresses des stations. L'agent DF informe l'agent de recherche (SearchAgent), qui à son tour envoie un message CPF à l'agent d'adresse (AdressAgent).

Une fois l'information envoyée à l'agent de recherche (SearchAgent) qui avait initialement fait la demande, une demande de traitement des polluants est envoyée à l'agent qui s'occupe des polluants (airAgent) afin de retrouver les polluants nécessaires à la demande de traitement de la qualité de l'air. Ensuite, il revient à l'agent (airAgent) de faire une demande de calcul afin de trouver non seulement les sous-indices, mais aussi l'indice de la qualité de l'air de la journée. La figure 5.8 montre les actes de communications et les différents messages échangés lors des interactions entre les agents d'interface, de recherche et l'agent d'adresse ; les agents du système Jade est représentés dans la figure par « other ».

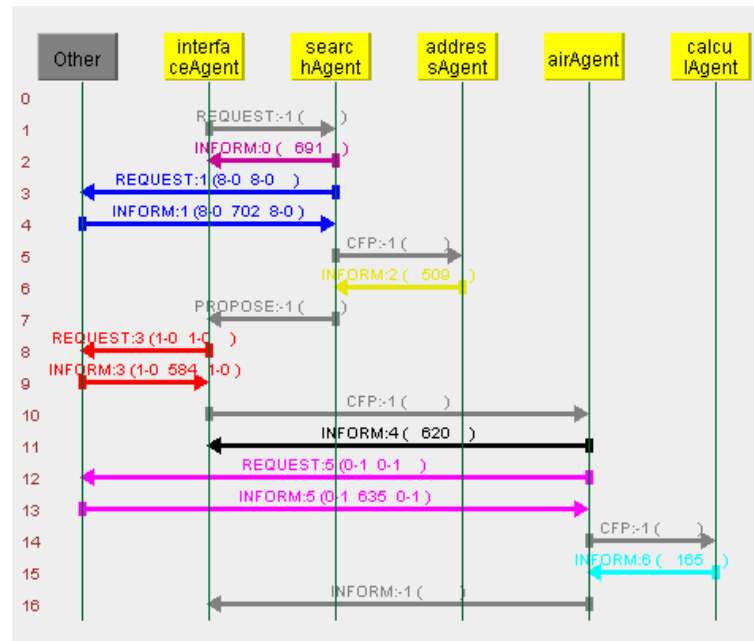


Figure 5.8 Interactions entre les agents

5.3 Objectifs et stratégie de validation

Étant donné que les différents modèles de conception de notre prototype ont été présentés, nous arrivons à un jalon important de notre cheminement de recherche à savoir l'évaluation empirique de notre module IQA.

Nous cherchons au premier chef à travers cette évaluation empirique l'accréditation de l'hypothèse centrale de cette thèse, à savoir :

- développer un middleware via les mécanismes multiagents afin de réduire les problématiques de communication et d'interopérabilité entre les données produites par l'internet des objets et les applications.

Ensuite, nous voulons répondre à nos questionnements de recherche qui sont :

- Quels sont les multiples avantages que les SMA peuvent apporter aux développement d'application d'Internet des objets ;
- Comment assurer une bonne interopérabilité entre différentes applications de différents domaines d'IdO par les mécanismes d'un système multi-agents.

La stratégie de la preuve est centrée autour de la conduite d'expérimentations, de la collecte et de l'analyse de données issues du web des objets de la ville de Montréal. Par conséquent, les calculs sont faits à partir des données collectées par les capteurs de la ville de Montréal et qui par la suite sont mises en ligne par la ville. Nous avons capté ces données à partir de notre prototype afin d'appliquer la formule de calcul IQA pour ensuite comparer les résultats obtenus avec les résultats issus du système de la ville de Montréal.

D'après la littérature consultée, la simulation des systèmes multiagents est devenue un cadre expérimental par excellence (Niwa *et al.*, 2014). Ceci s'est traduit par l'émergence d'une panoplie de simulateurs de système multiagents (MAGéo¹¹ GAMA¹² et SeSAm¹³) ainsi que par l'intégration de la simulation dans le processus de développement des SMA comme dans PASSI. La simulation est ainsi vue comme moyen incontournable pour valider les SMA (Cossentino *et al.*, 2008). Selon Shannon la validation par simulation consiste à évaluer plusieurs stratégies du fonctionnement du système en faisant varier ses paramètres pour choisir le meilleur paramétrage, (Shannon, 1975).

Remondino et Correndo indiquent que la comparaison des résultats obtenus avec ceux attendus par l'utilisateur et la validation empirique sont deux types de vali-

11. Modélisation Agent Géographique

12. Generic Adaptive Mobile Agents

13. Shell for Simulated Agent Systems

dations très populaires pour les modèles de simulation multi-agents, (Remondino et Correndo, 2006). De ce fait, la stratégie mise en place pour la validation de notre modèle de simulation multiagents et des résultats consiste en :

- la définition de deux scénarios différents, de telle sorte que nous puissions tester le module IQA dans différentes situations ;
- l'évaluation de la performance en comparant les résultats obtenus par notre prototype par rapport aux résultats du système de la ville de Montréal.

5.4 La conduite des expérimentations

5.4.1 Méthodologie

Pour valider notre prototype, nous nous sommes appuyés sur les travaux des auteurs Assoudi et Lounis, qui ont proposé une méthodologie de validation de la simulation de prototype multiagents basée sur deux grands axes à savoir : (i) la définition des scénarios et (ii) la conduite des expérimentations et la présentation des résultats (Assoudi et Lounis, 2017).

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons donc défini quatre cas de tests pour nos deux scénarios avec des dates choisies de manière aléatoire. Ces scénarios sont : « scénario outil Postman » et « scénario Application tierce », en raison de deux cas de tests par scénario afin de bien vérifier et comparer l'exactitude des résultats par rapport aux résultats trouvés sur le site de la ville de Montréal. Pour récupérer les résultats des données traitées par le systèmes MISMA-IdO, nous avons mis à la disponibilité des programmeurs un outil intermédiaire (une API) qui sert d'interface entre notre outil middleware et l' application développée.

Pour la conduite de nos expérimentations nous avons pris en considération les données des six (6) premiers mois de l'année 2020 et cinq (5) arrondissements¹⁴ identifiés chacun par un numéro d'identification unique dans le réseau de surveillance de la ville. Nous avons fait ce choix parce que nous n'avons pas eu accès aux données SO_2 pour les autres stations, à savoir Jardin Botanique, Ontario, Anjou, Saint-Jean-Baptiste, etc, mais aussi, en raison des volumes des données capteurs disponibles pour chacune des stations.

En ce qui a trait à la définition de nos scénarios, ils ont été développés en prenant en considération les critères suivants :

- les scénarios choisis sont différents (i.e. en fonction de différentes dates et de différentes zones de couverture de la ville de Montréal).
- les scénarios montrent différentes formes d'affichages de résultats (i.e. en mode littéral, facilement compréhensible par l'utilisateur et via une API pour les clients http).
- les scénarios comparent les résultats du module IQA par rapport aux résultats affichés par la ville de Montréal .

5.4.2 Communication avec le middleware

Pour pouvoir communiquer avec le middleware (module IQA disponible pour le présent moment) les applications vont utiliser un intermédiaire, une API¹⁵, un incontournable dans la communication de différentes applications. Une API est

14. Rosemont-La-Petite-Patrie (80), Rivière-des-Prairies (3), Sainte-Anne-de-Bellevue (99), Ville-Marie (31), Montréal-Nord (17).

15. « Application Programming Interface » ou en français : interface applicative de programmation, moyen efficace et assez populaire de nos jours, qui permet de faire communiquer deux programmes informatiques

une petite application qui effectue des actions via le protocole HTTP, ces actions peuvent être :

- récupérer des données ;
- retourner des données
- ajouter des données ;
- supprimer données ;
- modifier des données.

Dans notre cas, notre API retourne des données IQA dans le format JSON à partir des paramètres arrondissement et date. Nous nous sommes tournés vers le style architectural REST¹⁶. Nous avons fait ce choix à cause des avantages que présente cette architecture. Gunsberg et al. présentent les nombreux avantages de l'architecture REST à savoir :

- REST est utilisable sur presque tous les protocoles ;
- L'architecture REST peut être exploitée généralement le protocole HTTP ;
- L'architecture se distingue par son niveau de flexibilité ;
- L'architecture peut traiter plusieurs types d'appels ;
- L'architecture renvoyer différents formats de données (Gunsberg *et al.*, 2018).

Notre API a été développé avec le Framework Spring Boot¹⁷ et Hibernate¹⁸, et respecte les exigences les plus connues d'une API comme : les standards HTTP

16. Representational state transfer

17. Spring Boot est un framework de développement applicatif Java open source, recommandé pour le développement d'API

18. Hibernate est un Framework open source gérant la persistance des objets en base de données relationnelle

et une simplicité d'usage. Pour pouvoir utiliser notre API le programmeur de l'application tierce doit faire appel à une requête de type GET et utilise le format de l'adresse URL de la figure 5.9.



The diagram shows the URL <http://localhost:8088/middleware/mtl/airQuality?arrondissement=Sainte-Anne-de-Bellevue&date=10-03-2020> with four blue arrows pointing to specific parts of the URL, each labeled with a number: 1 points to the protocol and host/port, 2 points to the path, 3 points to the first query parameter, and 4 points to the second query parameter.

<http://localhost:8088/middleware/mtl/airQuality?arrondissement=Sainte-Anne-de-Bellevue&date=10-03-2020>

Figure 5.9 Structure de l'API

Où :

- 1 représente le serveur et le port de communication du serveur ;
- 2 le chemin d'accès à la ressource ;
- 3 le paramètre en entrée (arrondissement) ;
- et 4 le paramètre en entrée (date).

5.5 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté le prototype développé ainsi que la stratégie adoptée pour le valider. Aussi, nous avons présenté l'environnement (ville de Montréal) que nous avons considéré pour réaliser notre simulation et donné la raison qui nous a poussé à faire le choix de développer le module IQA plutôt qu'un autre. Ensuite, nous avons présenté les polluants et la méthode de calcul des indices et sous-indices de la qualité de l'air que nous avons adoptées.

Nous avons dédié une bonne partie de ce chapitre à la présentation des différentes étapes de fonctionnement du module IQA ainsi que des interactions de quelques agents du système. Ensuite, nous avons présenté l'objectif et la méthodologie de validation que nous avons adoptée et pilotée par la conduite des expérimentations. Nous avons terminé le chapitre en présentant une API, qui joue le rôle d'intermédiaire entre le module IQA et l'application tierce que nous avons développée.

CHAPITRE VI

VÉRIFICATION ET VALIDATION DU MODULE IQA

Dans ce chapitre, nous avons présenté une validation empirique de notre prototype de simulations multiagents qui agit comme middleware afin de faciliter une meilleure interopérabilité entre diverses applications et les données de l'IdO de la ville de Montréal. Nous avons réalisé deux scénarios comportant chacun deux cas de test, pour ensuite présenter et discuter les résultats.

1. Notre premier scénario a été réalisé avec l'outil Postman¹, outil qui nous a permis de simuler nos requêtes http.
2. Pour notre deuxième scénario, nous avons réalisé le développement d'une petite application tierce dénommée « AppAir »², qui a pour but d'exploiter le système MISMA-IdO (module IQA) via un intermédiaire que nous avons développé (une API)³.

À la lumière des résultats obtenus, nous discutons de la validité de notre hypothèse de départ à savoir : le développement d'un SMA qui agit comme un middleware

1. <https://www.postman.com/product/rest-client/>

2. Application tierce développée dans le but d'exploiter les données de l'IQA de la ville de Montréal à partir de la solution MISMA-IdO

3. fait le lien entre « AppAir » et le module IQA

pourrait réduire les problématiques d'interopérabilité entre les applications de l'internet des objets, par rapport aux diverses autres applications qui pourraient potentiellement avoir besoin d'utiliser les données de l'IdO pour créer des services divers. Donc, cet outil middleware doit avoir un comportement générique afin de pouvoir communiquer avec n'importe quelle application.

6.1 Simulation de la solution via l'outil Postman, scénario (1)

Pour notre premier cas de test du scénario (1), nous avons utilisé l'outil Postman⁴ afin de simuler nos requêtes http. Dans ce cas, nous avons présenté d'abord les résultats des indices à travers l'outil Postman, pour ensuite présenter les résultats des sous-indices de cette même journée.

Notre premier cas de test pour le scénario (1) couvre le secteur de l'arrondissement de Sainte-Anne-de-Bellevue identifié dans le réseau de surveillance de la ville de Montréal au numéro 99, pour la date du 10-03-2020. La figure 6.1 montre les données en entrées pour le premier cas de test du scénario 1 de l'outil Postman et le résultat de la qualité de l'air (46 PM) de la journée en format JSON⁵.

4. Outil qui permet d'exécuter des requêtes de types HTTP directement depuis une interface graphique. Vous pourrez simplement choisir l'URL, la méthode HTTP (le plus souvent GET, POST, PUT, PATCH et DELETE)

5. JavaScript Object Notation

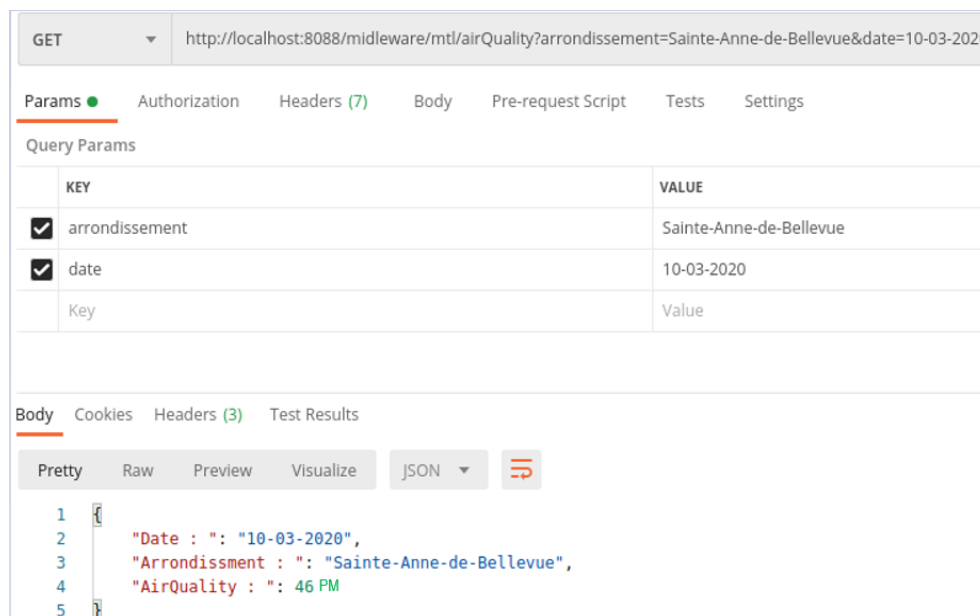


Figure 6.1 Scénario1-Test1 résultat IQA Sainte-Anne-de-Bellevue

Les résultats des sous-indices de la qualité de l'air du premier cas de test du scénario (1) sont présentés dans les tableaux 6.1 et 6.2. Ces derniers montrent les résultats des sous-indices des polluants de chaque heure de la journée du 10-03-2020 à 5h et de 13h à 23h. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, le plus grand des sous-indices est considéré comme étant l'indice de la qualité de l'air de la journée.

Notre deuxième cas de test pour le scénario (1) couvre le secteur de l'arrondissement de Rosemont-La-Petite-Patrie identifié dans le réseau de surveillance de la ville de Montréal au numéro 31, pour la date du 15-01-2020. La figure 6.2 montre les données en entrée du test (2) et le résultat de la qualité de l'air de la journée en format JSON.

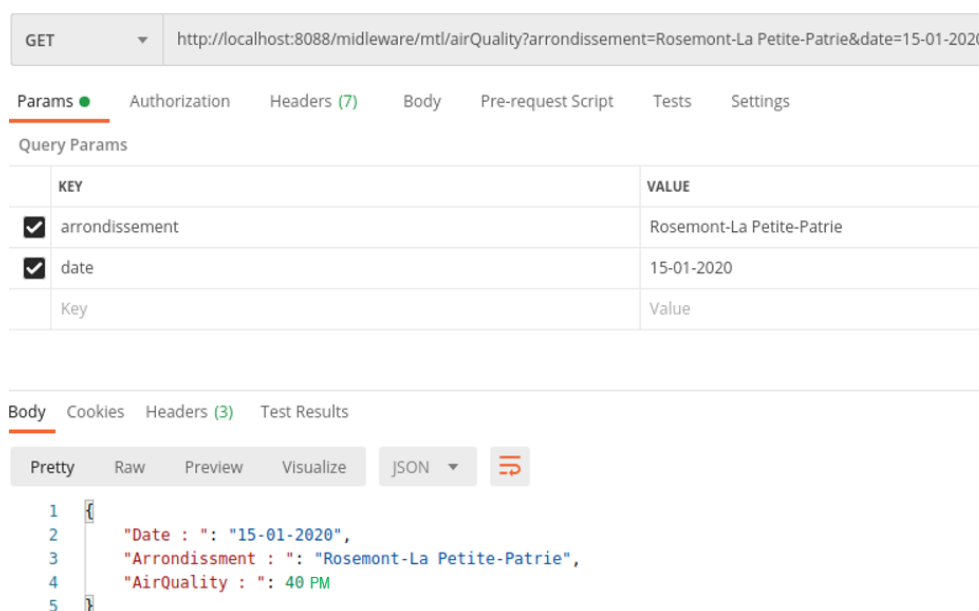


Figure 6.2 Scénario1-Test2, Rosemont-La-Petite-Patrie

les tableaux 6.3 et 6.4 montrent les résultats des sous-indices des polluants de chaque heure de la journée du 15-01-2020 de à 4h et de 14h à 23h, pour l'arrondissement de Rosemont-La-Petite-Patrie. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, le plus grand des sous-indices est considéré comme étant l'indice de la qualité de l'air de la journée.

6.2 Simulation de l'usage de la solution MISMA-IdO (module IQA) par l'application AppAir.

Pour notre deuxième scénario, nous avons développé une application tierce dénommée « AppAir » qui a pour but d'exploiter le système MISMA-IdO (module IQA) via une API.

L'application AppAir se connecte au système MISMA-IdO (module IQA) via une API que nous avons développée qui permet de récupérer les résultats IQA de la journée. Pour ce faire, nous avons utilisé une interface contenant deux champs de textes, qui, via une requête de type GET, prend en paramètre deux valeurs (arrondissement et date) et affiche le résultat IQA de la journée. La figure 6.3 montre l'interface de l'application tierce que nous avons développée. Elle se présente en deux parties. La première partie permet de rentrer les paramètres de la recherche et la deuxième partie affiche le résultat de la recherche



Figure 6.3 Interface de l'application AppAir

Dans nos démonstrations, nous avons paramétré notre simulation de façon à afficher dans l'interface de l'application AppAir certains messages d'information échangés entre les agents du prototype IQA. Mais, dans le réel, les applications tierces vont avoir accès seulement aux résultats IQA.

Notre premier cas de test du scénario (2) a été mené pour la station se trouvant dans l'arrondissement Sainte-Anne-de-Bellevue identifié dans le réseau de surveillance de la ville de Montréal au numéro 99, pour la date du 5 avril 2020. La figure 6.4 présente le résultat de récupération de l'indice de la qualité de l'air de l'application tierce pour le premier test (1) du second scénario.

Bienvenue dans « AppAir »

Arrondissement: Sainte-Anne-de-Bellevue

Date: 05/04/2020

Envoyer

Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE
Act de message : INFORM
Fri Nov 18 16:26:39 EST 2022: Arrondissement reçu, traitement en cours!
Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE
Act de message : PROPOSE
Content : J'ai reçu la station id 99
Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE
Act de message : INFORM
Fri Nov 18 16:26:41 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour le : 05-04-2020
Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE
Act de message : INFORM
Fri Nov 18 16:26:48 EST 2022: L'indice est :2 no2

Figure 6.4 Scénario2-Test1, affichage de résultat IQA, Sainte-Anne-de-Bellevue

Au niveau de notre prototype IQA, nous avons la possibilité de récupérer les résultats de calculs des sous-indices de la qualité de l'air pour chaque demande de traitement. La figure 6.5 montre les résultats générés au terminal de notre module IQA pour la journée du 05-avril-2020, dans l'arrondissement de Sainte-Anne-de-Bellevue. Ces résultats représentent les valeurs des sous-indices des polluants de chaque heure de la journée. Pour simplifier la présentation, nous avons choisi de présenter au hasard dans la figure 6.5 les résultats de quelques heures de la journée, le reste des heures sont présentées dans l'annexe D.

```
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 2
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1
*****
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1
*****
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1
*****
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1
*****
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1
```

Figure 6.5 Scénario2-Test1, entre 5h et 9h, Sainte-Anne-de-Bellevue

Le deuxième cas de test du scénario (2) a été mené pour la station se trouvant dans l'arrondissement de «Rivières-des-Prairies» identifié dans le réseau de surveillance de la ville de Montréal au numéro 17, pour la date du 6 mai 2020. La figure 6.6 présente le résultat de la récupération de la demande de l'indice de la qualité de l'air de la journée du 6 mai. De plus, cette figure nous donne une vue globale sur les quelques actes de langage échangés au sein du prototype IQA et les agents qui y sont impliqués.

Bienvenue dans « AppAir »

Arrondissement:

Date:

Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE
 Act de message : INFORM
 Fri Nov 18 16:36:00 EST 2022: Arrondissement reçu, traitement en cours!
 Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE
 Act de message : PROPOSE
 Content : J'ai reçu la station id 3
 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE
 Act de message : INFORM
 Fri Nov 18 16:36:04 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station:3 pour le : 06-05-2020
 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE
 Act de message : INFORM
 Fri Nov 18 16:36:06 EST 2022: L'indice est :24 03

Figure 6.6 Scénario2-Test2, Rivières-des-Prairies

Nous avons récupéré au niveau de notre prototype IQA les résultats générés au terminal pour la journée du 6-mai-2020, dans l'arrondissement de Rivières-des-Prairies. Ces résultats représentent les valeurs des sous-indices des polluants de chaque heure de la journée. Pour simplifier, nous avons choisi de présenter au hasard dans la figure 6.7 les résultats des sous-indices de quelques heures de la journée, le reste des heures sont présentées dans l'annexe E.

```

Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 24
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de o3 est 23
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1

```

Figure 6.7 Scénario2-Test2, entre 15h et 19h, Rivières-des-Prairies

6.3 Discussion des résultats

Nous discutons dans cette section les résultats obtenus de notre recherche, suite à des expérimentations conduites pour l'évaluation de l'outil MISMA-IdO via le module IQA de la ville de Montréal.

6.3.1 Analyse des résultats avec l'outil « Postman »

Les résultats découlant de nos cas de tests nous indiquent que pour le premier scénario (qui visait à simuler nos requêtes http), notre module IQA a été capable de trouver correctement toutes les correspondances attendues. Ainsi, pour les mêmes paramètres, les résultats des sous-indices exprimés en heure et l'indice de la qualité de l'air des différentes journées traitées par notre module IQA correspondent aux résultats des sous-indices et de l'IQA présentés sur le site de la ville de Montréal.

Nous illustrons la comparaison des résultats de nos cas de tests à ceux affichés sur le site de la ville de Montréal. Pour simplifier le document, nous avons choisi de comparer les résultats de quelques heures de la journée prises au hasard. Les tableaux 6.5 et 6.6 illustrent les comparaisons des résultats de nos deux cas de tests pour les arrondissements de Sainte-Anne-de-Bellevue et de Rosemont-La-Petite-Patrie. Dans ces deux tableaux, nous pouvons voir à gauche les valeurs des sous-indices de chaque polluant et la valeur de l'indice de la qualité de l'air pour le module IQA du système MISMA-IdO et à droite les résultats sur le site de la ville de Montréal pour les journées 10-03-2020 et 15-01-2020.

Cas de test 1, scénario 1 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Sainte-Anne-de-Bellevue	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActual?date=200310
<pre> Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 6 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 46 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-03-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 10 Date: 10-03-2020 06:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 4 Date: 10-03-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 42 Date: 10-03-2020 06:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-03-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 9 Date: 10-03-2020 07:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 10-03-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 36 Date: 10-03-2020 07:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-03-2020 08:00 La valeur du sous-indice de o3 est 5 Date: 10-03-2020 08:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-03-2020 08:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 08:00 La valeur du sous-indice de PM est 33 Date: 10-03-2020 08:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-03-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 6 Date: 10-03-2020 09:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-03-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 37 Date: 10-03-2020 09:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 </pre>	<pre> ▼<echantillon heure="5"> <qualite value="46"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="6"/> <polluant nom="PM" value="46"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="6"> <qualite value="42"/> <polluant nom="NO2" value="4"/> <polluant nom="O3" value="10"/> <polluant nom="PM" value="42"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="7"> <qualite value="36"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="9"/> <polluant nom="PM" value="36"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="8"> <qualite value="33"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="5"/> <polluant nom="PM" value="33"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="9"> <qualite value="37"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="6"/> <polluant nom="PM" value="37"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
<pre> "Date : ": "10-03-2020", "Arrondissement : ": "Sainte-Anne-de-Bellevue" "AirQuality : ": 46 PM </pre>	<pre> ▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="46" polluant="PM"/> </pre>

Tableau 6.5 Comparaison des résultats

Pour les deux cas de tests réalisés avec l'outil « Postman », le scénario (1) nous montre clairement les correspondances des résultats des sous-indices de chaque polluant pour chacune des heures et la valeur de l'indice de la qualité de l'air pour les deux systèmes (MISMA-IdO et Ville Montréal) pour les deux journées.

À partir de ces constats, nous pouvons facilement confirmer que toutes les correspondances attendues ont été correctement validées. Par conséquent, nous pouvons conclure que, pour le scénario (1), le module IQA a été capable de trouver les mêmes résultats que ceux affichés sur le site de la ville de Montréal.

Cas de test 2, scénario 1 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Rivière-des-Prairies	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActual?date=200115
<pre> Date: 15-01-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 4 Date: 15-01-2020 09:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 15-01-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 35 Date: 15-01-2020 09:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 15-01-2020 10:00 La valeur du sous-indice de o3 est 4 Date: 15-01-2020 10:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 15-01-2020 10:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 10:00 La valeur du sous-indice de PM est 38 Date: 15-01-2020 10:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de o3 est 5 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de PM est 40 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 15-01-2020 12:00 La valeur du sous-indice de o3 est 5 Date: 15-01-2020 12:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 15-01-2020 12:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 12:00 La valeur du sous-indice de PM est 39 Date: 15-01-2020 12:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 15-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de o3 est 4 Date: 15-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 15-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de PM est 35 Date: 15-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 </pre>	<pre> ▼<echantillon heure="9"> <qualite value="35"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="4"/> <polluant nom="PM" value="35"/> <polluant nom="SO2" value="0"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="10"> <qualite value="38"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="4"/> <polluant nom="PM" value="38"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="11"> <qualite value="40"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="5"/> <polluant nom="PM" value="40"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="12"> <qualite value="39"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="5"/> <polluant nom="PM" value="39"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="13"> <qualite value="35"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="4"/> <polluant nom="PM" value="35"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
<pre> "Date : ": "15-01-2020", "Arrondissement : ": "Rosemont-La Petite-Patrie" "AirQuality : ": 40 PM </pre>	<pre> </station> ▼<station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="40" polluant="PM"/> </pre>

Tableau 6.6 Comparaison des résultats

6.3.2 Analyse des résultats avec « l'application AppAir »

Les résultats obtenus dans les deux cas de tests avec l'application « AppAir » montrent que pour ce scénario notre module IQA a été capable de trouver correctement toutes les correspondances attendues. Ainsi, pour les mêmes paramètres, les résultats des sous-indices exprimés en heure et l'indice de la qualité de l'air des différentes journées traitées par notre module IQA correspondent aux résultats des sous-indices et de l'IQA présentés sur le site de la ville de Montréal.

Pour comparer les résultats de nos cas de tests par rapport aux résultats affichés sur le site de la ville de Montréal, nous avons conservé le choix au hasard des heures afin d'éviter toute ambiguïté au niveau de notre validation. Les tableaux 6.7 et 6.8 montrent les comparaisons des résultats de nos deux cas de tests pour les arrondissements Sainte-Anne-de-Bellevue et Rivière-des-Prairies. Dans ces deux tableaux, nous avons à gauche les valeurs des sous-indices de chaque polluant et la valeur de l'indice de la qualité de l'air pour le module IQA du système MISMA-IdO et à droite les résultats sur le site de la ville de Montréal pour les journées 05-04-2020 et 06-05-2020. Voir l'annexe D pour le reste des comparaisons.

Cas de test 1, scénario 2 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Sainte-Anne-de-Bellevue	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActual?date=200405
<pre> Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1 Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1 Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1 Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1 Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 </pre>	<pre> ▼<echantillon heure="5"> <qualite value="2"/> <polluant nom="N02" value="2"/> <polluant nom="S02" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="6"> <qualite value="1"/> <polluant nom="N02" value="1"/> <polluant nom="S02" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="7"> <qualite value="1"/> <polluant nom="N02" value="1"/> <polluant nom="S02" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="8"> <qualite value="1"/> <polluant nom="N02" value="1"/> <polluant nom="S02" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="9"> <qualite value="1"/> <polluant nom="N02" value="1"/> <polluant nom="S02" value="1"/> </pre>
<pre> r rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour le : 05-04-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Sat Sep 25 16:43:14 EDT 2021: L'indice est :2 N02 </pre>	<pre> ▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="2" polluant="N02"/> </pre>

Tableau 6.7 Comparaison des résultats test1, scenario 2

Cas de test 2, scénario 2 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Rivière-des-Prairies	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servelet/makeXmlActuel?date=200506
<pre> Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 24 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PM est 7 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de o3 est 23 Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 2 Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21 Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 3 Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21 Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 2 Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21 Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 2 Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 </pre>	<pre> ▼<echantillon heure="15"> <qualite value="24"/> <polluant nom="NO2" value="1"/> <polluant nom="O3" value="24"/> <polluant nom="PM" value="7"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="16"> <qualite value="23"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="23"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="17"> <qualite value="21"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="21"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="18"> <qualite value="21"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="21"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> ▼<echantillon heure="19"> <qualite value="21"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="21"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
<pre> rechercher la liste des polluants pour la station:3 pour le : 06-05-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Fri Sep 24 10:11:42 EDT 2021: L'indice est :24 o3 </pre>	<pre> ▼<journee jour="6" mois="5" annee="2020"> ▼<station id="3" donnees="oui"> <iqa-val value="24" polluant="O3"/> </station> </journee> </pre>

Tableau 6.8 Comparaison des résultats, test2, scénario 2

Pour les deux cas de tests réalisés avec « l'application tierce », les simulations montrent clairement les correspondances des résultats des sous-indices de chaque polluant pour chacune des heures et la valeur de l'indice de la qualité de l'air pour les deux systèmes (MISMA-IdO et Ville Montréal) pour les deux journées.

À partir de ces constats, nous pouvons facilement confirmer que toutes les correspondances attendues ont été correctement validées. Par conséquent, nous pouvons conclure que pour le scénario (2), le module IQA a été capable de trouver les résultats identiques à ceux affichés sur le site de la ville de Montréal.

6.4 Synthèse des résultats et discussions

Comme le reconnaissent Assoudi et Lounis (2017), à la lumière des résultats de simulations obtenus dans un SMA, nous pouvons discuter de la performance du prototype au regard des deux aspects suivants :

- Efficacité : cet aspect concerne l'évaluation de la qualité et l'exactitude des résultats trouvés pour les simulations de chaque scénario ;
- Efficience : cet aspect concerne l'évaluation de l'effort nécessaire à cette efficacité, c'est-à-dire l'effort nécessaire à la configuration et au temps de réponse nécessaire à l'obtention du résultat final (i.e. Indice de la qualité de l'air) pour un scénario donné.

6.4.1 L'efficacité

« Concernant l'aspect efficacité, la stratégie de preuve repose principalement sur l'évaluation de la performance obtenue par notre prototype pour les différents scénarios utilisés » (Assoudi et Lounis, 2017). Ces derniers, comme nous l'avons déjà expliqué, affichent un niveau de précision comparable aux résultats retrouvés sur le site de la ville de Montréal.

Examinons maintenant les résultats détaillés pour le premier scénario (outil Postman) ; pour le cas de test qui a été mené dans l'arrondissement de Sainte-Anne-de-Bellevue pour la date du 10-03-2020, nous pouvons voir dans le tableau 6.1 du côté gauche qui représente les résultats des sous-indices calculés par système MISMA-IdO qu'à 5 :00 am les valeurs des polluants « NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, SO_2 » sont respectivement « 6, 6, 46, 1 ». la même observation peut être faite du côté droit du tableau qui représente les résultats IQA pour la ville de Montréal, ce dernier nous montre qu'à la même heure (5 :00 am) les mêmes polluants ont eu les mêmes valeurs que celles calculées par le système MISMA-IdO. De plus, on peut

facilement remarquer, parmi ces sous-indices, la valeur de l'indice de la qualité de l'air de la journée qui s'élève à 46 PM.

Pour le cas de test qui a été mené dans l'arrondissement de Rosemont-La-Petite-Patrie pour la date du 15-01-2020. Le côté gauche du tableau du tableau 6.6 présente clairement les résultats des sous-indices des polluants calculés par le système MISMA-IdO. En effet, à 9 :00, les valeurs des polluants « NO_2 , CO, O_3 , $PM_{2.5}$, SO_2 » sont respectivement « 4, 6, 35, 1 ». Cette même observation peut être faite du côté droit du tableau qui représente les résultats IQA de la ville de Montréal, ce dernier nous montre qu'à la même heure (9 :00 am) les mêmes polluants ont eu les mêmes valeurs que celles calculées par le système MISMA-IdO. De plus, on peut facilement remarquer parmi ces sous-indices qu'à 11 :00, la valeur de l'indice de la qualité de l'air de la journée s'est élevée à 40 PM.

Examinons maintenant les résultats détaillés pour le deuxième scénario (application tierce), le tableau 6.7 présente la récupération de valeur IQA qui a été effectuée dans l'arrondissement de Sainte-Anne-de-Bellevue, pour la journée de 06-04-2020, nous pouvons remarquer du côté gauche du tableau qui représente le système MISMA-IdO qu'à 5 : 00 pm les valeurs des polluants « NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, SO_2 » sont respectivement « 1, 2, 1, 1 ». Cette même observation peut être faite du côté droit du tableau qui représente la ville de Montréal. Ce dernier nous montre qu'à la même heure, soit à 5 : 00 pm, les mêmes polluants ont eu les mêmes valeurs que celles calculées par le système MISMA-IdO. L'indice de la qualité de l'air pour ce cas de test a été observée à 5 :00 am.

Donc, on peut facilement remarquer parmi ces sous-indices, la valeur de l'indice de la qualité de l'air de la journée qui s'est élevée à 2 NO_2 .

Examinons maintenant les résultats détaillés pour le cas de test 2 du deuxième scénario (application tierce), le tableau 6.8 présente la récupération de valeur IQA qui a été effectuée dans l'arrondissement de Rivière-des-Prairies pour la journée du 06-05-2020, nous pouvons remarquer du côté gauche du tableau qui représente le système MISMA-IdO qu'à 3 : 00 pm les valeurs des polluants « NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, SO_2 » sont respectivement « 24, 1, 5, 1 ». Cette même observation peut être faite du côté droit du tableau qui représente la ville de Montréal. Ce dernier nous montre qu'à la même heure soit à 5 : 00 pm les mêmes polluants ont eu les mêmes valeurs que celles calculées par le système MISMA-IdO. De plus, on peut facilement remarquer, parmi ces sous-indices, la valeur de l'indice de la qualité de l'air de la journée qui s'est élevé à 24 O_3 .

Le tableau 6.9 présente une synthèse des résultats des indices de la qualité d'air et des sous-indices des polluants des cas de tests du premier scénario pour les deux systèmes (MISMA-IdO, module IQA et ville de Montréal, module IQA) pour les dates 10-03-2020 et 15-01-2020.

Polluants	MISMA-IdO (module IQA)	Ville de Montréal (module IQA)
Sous-indices	Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 6 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 46 Date: 10-03-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1	▼<echantillon heure="5"> <qualite value="46"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="6"/> <polluant nom="PM" value="46"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon>
IQA	"Date : ": "10-03-2020", "Arrondissement : ": "Sainte-Anne-de-Bellevue" "AirQuality : ": 46 PM	▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="46" polluant="PM"/>
Sous-indices	Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de o3 est 5 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de PM est 40 Date: 15-01-2020 11:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1	▼<echantillon heure="11"> <qualite value="40"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="5"/> <polluant nom="PM" value="40"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon>
IQA	"Date : ": "15-01-2020", "Arrondissement : ": "Rosemont-La Petite-Patrie" "AirQuality : ": 40 PM	</station> ▼<station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="40" polluant="PM"/>

Tableau 6.9 Sous-indice et l'indice IQA

Le tableau 6.10 présente une synthèse des résultats des indices de la qualité d'air et des sous-indices des polluants des cas de tests du deuxième scénario pour les deux systèmes (MISMA-IdO, module IQA et ville de Montréal, module IQA), pour les dates 10-03-2020 et 15-01-2020.

Polluants	MISMA-IdO (module IQA)	Ville de Montréal (module IQA)
Sous-indices	Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 2 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 1 Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1	▼<echantillon heure="5"> <qualite value="2"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon>
IQA	r rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour le : 05-04-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Sat Sep 25 16:43:14 EDT 2021: L'indice est :2 NO2	▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="2" polluant="NO2"/>
Sous-indices	Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 24 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PM est 7 Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1	▼<echantillon heure="15"> <qualite value="24"/> <polluant nom="NO2" value="1"/> <polluant nom="O3" value="24"/> <polluant nom="PM" value="7"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon>
IQA	r rechercher la liste des polluants pour la station:3 pour le : 06-05-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Fri Sep 24 10:11:42 EDT 2021: L'indice est :24 o3	▼<journee jour="6" mois="5" annee="2020"> ▼<station id="3" donnees="oui"> <iqa-val value="24" polluant="O3"/>

Tableau 6.10 Sous-indice et l'indice IQA

À l'examen des résultats compilés dans les tableaux 6.5 et 6.6 du premier scénario et les tableaux 6.7 et 6.8 du deuxième scénario, ces résultats montrent que le module IQA du système MISMA-IdO nous a fourni un niveau d'efficacité qui avoisine 100% par rapport au cas de tests que nous avons réalisé. Cependant, compte tenu des contraintes soulevées dans la section 5.4.2 à savoir le problème de disponibilité des données des polluants pour certaines stations, ce qui nous a empêché de faire les calculs de l'IQA pour toutes les stations disponibles, tous ces manquements ne nous permettent pas de parler de niveau d'efficacité comparable avec le système de la ville de Montréal.

Pour récapituler, il importe de considérer les tableaux 6.9 et 6.10, ces derniers nous affichent un résumé des sous-indices de la qualité de l'air pour les deux systèmes.

Aussi, ces mêmes tableaux résument les valeurs IQA pour chacune des journées considérées.

6.4.2 L'efficience

L'aspect de l'efficacité ayant été démontré, venons-en maintenant à l'aspect de l'efficience. Il est important de souligner à ce propos, comme nous l'avons déjà anticipé, qu'aucun effort utilisateur ou du client http n'a été requis pour l'obtention d'un taux de correspondance aussi élevé par rapport aux résultats du système de la ville de Montréal. Rappelons brièvement que notre système se veut être un système adaptatif capable de s'ajuster aux scénarios prédéfinis et aux changements de paramètres (arrondissements, dates). En effet, nous avons pu démontrer que, malgré le changement de nos scénarios, notre outil a pu s'adapter pour faire émerger, à chaque fois, les résultats attendus. Ainsi, nous estimons pouvoir confirmer que notre outil ne requiert aucun effort, de la part d'un utilisateur ou du client http, pour trouver correctement les correspondances attendues, aucun effort de configuration, ni d'optimisation n'est requis.

Concernant le temps de réponse nécessaire pour l'obtention du résultat final, c'est-à-dire l'indice de la qualité de l'air pour un scénario donné, comme nous l'avons déjà démontré, le résultat final constitue entre autres la mesure de l'effort déployé par les agents pour communiquer entre eux, échanger les informations et traiter les données. Cela veut dire qu'il y a un temps de réponse qui correspond à l'exécution, en parallèle des différentes tâches qu'accomplissent les agents. De ce fait, le temps de réponse dans notre module IQA est supérieur par rapport au temps de réponse du système de la ville de Montréal.

La figure 6.8 présente le temps de réponse du système MISMA-IdO (module IQA) qui s'élève à 9 secondes environs pour la station Rosemont-La-Petite-Patrie. Tandis que la figure 6.9 présente le temps de réponse du système de la ville de Montréal

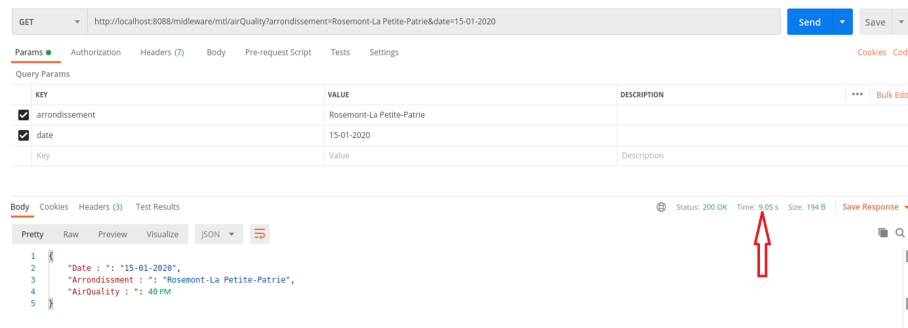


Figure 6.8 Temps de réponse Module IQA

qui avoisine environs une seconde pour cette même station.

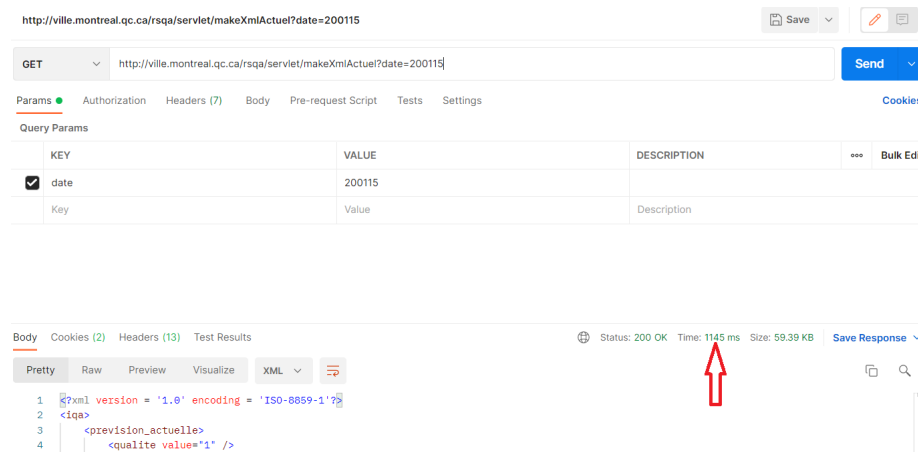


Figure 6.9 Temps de réponse ville de Montréal

En considérant la différence qui existe au niveau des temps de réponses des deux systèmes, nous pouvons confirmer que l'efficacité du système n'a pas pu être démontrée. Toutefois, il faut noter que l'environnement du déroulement de nos cas de tests est différent à celui de la ville de Montréal, à savoir la ville de Montréal à des serveurs ou PC plus performants, une meilleure infrastructure ou connexion Internet, etc. Toutes ces différences peuvent avoir une incidence sur le temps de réponse de la ville de Montréal qui est nettement inférieur par rapport au système MISMA-IdO.

À noter que nos cas de tests se sont déroulés sur un PC de 8 Go de mémoire.

6.5 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons présenté la vérification et la validation du prototype IQA qui est un module de l'outil middleware (MISMA-IdO). Nous avons réalisé plusieurs cas de tests, issus de scénarios différents. Pour réaliser ces cas de tests, nous avons dans un premier temps fait appel à l'outil Postman. Ensuite nous avons développé une application tierce dénommée « AppAir » qui nous a permis de tester la récupération des données qui sont traitées par notre module IQA. Une synthèse des résultats des cas de tests de différents scénarios a été réalisée ; ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats du prototype IQA que nous avons développé et ceux retrouvés sur le site de la ville de Montréal.

Pour chacune de nos questions de recherche, nous avons élaboré des éléments de réponses en fonction de la méthodologie de développement que nous avons adoptée et de la revue de littérature que nous avons réalisée. Ensuite, à travers les dimensions cognitives les plus fondamentales de toute société, nous avons fait ressortir le côté cognitif de notre projet. Finalement, nous avons terminé ce chapitre avec une analyse de l'organisation de la structure de notre prototype SMA en la comparant à des modèles d'organisation sociale bien connus.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

La littérature consultée nous a montré que la majorité des solutions proposées pour répondre aux problématiques d'intégration des données, de la communication ou d'interopérabilité entre les applications d'IoT s'orientent vers le développement des plateformes (Kos *et al.*, 2012), (Fan et Chen, 2010) ou convoitent les technologies du Web sémantique (Gyrard, 2015), (Lécué *et al.*, 2014). De plus, cela nous a permis de voir qu'il n'existe pas vraiment de travaux qui convoitent les technologies SMA pour les applications d'internet des objets des villes intelligentes.

Par conséquent, nous avons opté pour le développement d'une application de type middleware, dont le but est de faciliter l'interopérabilité entre les applications d'IdO et des applications tierces issues de domaines divers. La méthode adoptée pour atteindre les résultats de notre recherche était basée sur une démarche de type quantitative de nature exploratoire, ce qui nous a permis d'être en contact direct avec le phénomène étudié et du coup nous a permis d'atteindre les résultats attendus via des simulations.

Au niveau de l'hypothèse que nous avons formulée à savoir : « le développement d'un SMA agissant comme middleware pourrait réduire les problématiques d'interopérabilité entre les applications de l'internet des objets, par rapport aux diverses autres applications qui pourraient potentiellement avoir besoin d'utiliser les don-

nées de l’IdO pour créer des services divers». Pour valider notre hypothèse, nous avons choisi parmi les données de différents domaines d’application de la ville de Montréal (transport, qualité de l’air, circulation, etc.), les données de l’IQA. À partir de ces données, nous avons développé un prototype qui répond au calcul de l’indice sur la qualité de l’air (IQA).

À la lumière des résultats que nous avons obtenus, nous pouvons confirmer que le développement d’un outil SMA peut agir comme middleware afin de réduire les problématiques d’interopérabilité entre les applications d’IdO et d’autres applications de domaines divers. Puisque nos simulations nous ont montré que la solution SMA proposée peut facilement être utilisée non seulement avec un client http, voir les simulations avec l’outil Postman à la section 6.1, mais aussi, avec n’importe quelle application tierce, voir simulation avec l’application AppAir à la section 6.2 .

Les données collectées sont les données des polluants des six premiers mois de l’année 2020 (janvier à juin). Ces données sont traitées à travers un module de la qualité de l’air (IQA) que nous avons développé. Ensuite, nous avons développé une application tierce qui récupère les résultats IQA traités. Pour assurer la communication entre le module IQA et l’application tierce, nous avons développé une API qui agit comme intermédiaire entre les deux modules IQA et l’application tierce.

Cas de tests	MISMA-IdO (module IQA)	Ville de Montréal (module IQA)
Résultats IQA avec l'outil Postman	"Date : ": "10-03-2020", "Arrondissement : ": "Sainte-Anne-de-Bellevue" "AirQuality : ": 46 PM	▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="46" polluant="PM"/>
	"Date : ": "15-01-2020", "Arrondissement : ": "Rosemont-La Petite-Patrie" "AirQuality : ": 40 PM	</station> ▼<station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="40" polluant="PM"/>
Récupération des résultats IQA par l'application tierce	r rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour le : 05-04-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Sat Sep 25 16:43:14 EDT 2021: L'indice est :2 NO2	▼<station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="2" polluant="NO2"/>
	r rechercher la liste des polluants pour la station:3 pour le : 06-05-2020 Sender: airAgent@169.254.83.165:1099/JADE Act de message : INFORM Fri Sep 24 10:11:42 EDT 2021: L'indice est :24 O3	▼<journee jour="6" mois="5" annee="2020"> ▼<station id="3" donnees="oui"> <iqa-val value="24" polluant="O3"/>

Tableau 7.1 Comparaison résultats IQA (MISMA-IdO et ville Montréal)

Après analyse et discussion des résultats des cas de tests réalisés pour les différents scénarios, nous avons vu que les résultats du prototype IQA concordent avec ceux de la ville. En effet, pour tous les cas de tests que nous avons menés, nous avons vu que nos résultats sont les mêmes que ceux retrouvés sur le site de la ville de Montréal. Voir le tableau 7.1 qui résume les résultats de la qualité de l'air des cas de tests menés pour les deux systèmes (MISMA-IdO et ville de Montréal).

Test pour la journée du 20-02-2020 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de « Rosemont-La-Petite-Patrie »	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActual?date=200220
Date: 20-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20 Date: 20-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1 Date: 20-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 20-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de PM est 9 Date: 20-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 20-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20 Date: 20-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2 Date: 20-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 20-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 20-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 20-02-2020 18:00 La valeur du sous-indice de o3 est 18 Date: 20-02-2020 18:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 20-02-2020 18:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 20-02-2020 18:00 La valeur du sous-indice de PM est 8 Date: 20-02-2020 18:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 *****	<pre> <echantillon heure="16"> <qualite value="20"/> <polluant nom="NO2" value="1"/> <polluant nom="O3" value="20"/> <polluant nom="PM" value="9"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="17"> <qualite value="20"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="20"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="18"> <qualite value="18"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="18"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : PROPOSE Contenu : J'ai reçu la station id 80 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Mon Nov 21 10:31:14 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station 80 pour le 20-02-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Mon Nov 21 10:31:19 EST 2022: L'indice est 20 o3	<pre> <station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="20" polluant="O3"/> </pre>

Tableau 7.2 Sous-indices IQA Rosemont-La-Petite-Patrie journée du 20-02-20

Pour mieux expérimenter et évaluer notre solution, nous avons réalisé plusieurs autres simulations afin de pouvoir suivre l'évolution du comportement de notre middleware. Des tests ont été menés dans plusieurs stations à des dates différentes (voir l'annexe F). Pour les deux systèmes, le résultat de la station «Rosemont-La-Petite-Patrie», enregistré au numéro d'identification 80 dans le réseau de la ville de Montréal pour la journée du 20-02-2020, indique que le polluant O3 est celui ayant la plus forte valeur et représente ainsi l'indice de la qualité de l'air de la journée, voir le tableau 7.2 pour plus de d'information.

Test pour la journée du 10-01-2020 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Sainte-Anne-de-Bellevue	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActuel?date=200110
<pre>***** Date: 10-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de o3 est 3 Date: 10-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 8 Date: 10-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de PM est 24 Date: 10-01-2020 13:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-01-2020 14:00 La valeur du sous-indice de o3 est 2 Date: 10-01-2020 14:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 9 Date: 10-01-2020 14:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-01-2020 14:00 La valeur du sous-indice de PM est 27 Date: 10-01-2020 14:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-01-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 3 Date: 10-01-2020 15:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 8 Date: 10-01-2020 15:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-01-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PM est 29 Date: 10-01-2020 15:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1</pre>	<pre><-echantillon heure="13"> <qualite value="24"/> <polluant nom="NO2" value="8"/> <polluant nom="O3" value="3"/> <polluant nom="PM" value="24"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <-echantillon heure="14"> <qualite value="27"/> <polluant nom="NO2" value="9"/> <polluant nom="O3" value="2"/> <polluant nom="PM" value="27"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <-echantillon heure="15"> <qualite value="29"/> <polluant nom="NO2" value="8"/> <polluant nom="O3" value="3"/> <polluant nom="PM" value="29"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon></pre>
<pre>Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : PROPOSE Contenu : J'ai reçu la station id 99 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Mon Nov 21 11:12:55 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station 99 pour le 10-01-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Mon Nov 21 11:13:02 EST 2022: L'indice est 29 am</pre>	<pre><-station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="29" polluant="PM"/> </station></pre>

Tableau 7.3 Sous-indices IQA Sainte-Anne-de-Bellevue journée 21-01-20

Nous avons réalisé un autre test à la station «Sainte-Anne-de-Bellevue» enregistrée au numéro d'identification 99 dans le réseau de la ville de Montréal, pour la journée du 10-01-2020. Nous avons vu, pour les deux systèmes, que le polluant PM est celui ayant la plus forte valeur, représentant ainsi l'indice de la qualité de l'air de la journée. Voir la figure 7.3 pour plus d'information.

Encore une fois, les résultats des deux systèmes (MISMA-IdO et ville de Montréal) concordent bel et bien. Pour alléger le document, nous avons placé davantage de comparaisons de simulations des deux systèmes dans l'annexe F.

7.1 Contributions

7.1.1 Réponses aux questions de recherche

Dans cette section, nous avons présenté un bref rappel de la problématique de la recherche. Par la suite, nous avons présenté la réponse à chacune des questions de recherche soulevées au chapitre 1 de cette étude.

La problématique soulevée au chapitre 1 était l'interopérabilité entre les applications IdO posant des problèmes de communication entre les différentes solutions, dites verticales ou développées dans une approche orientée silos. D'après la littérature consultée les techniques ou outils proposés ne permettent pas vraiment de résoudre le problème d'interopérabilité entre les applications IdO et d'autres solutions dites verticales.

L'objectif principal de notre projet de recherche était de réaliser un outil via les mécanismes des SMA qui vont agir comme middleware au niveau de la couche applicative de différents domaines de l'IdO. De ce fait, pour atteindre cet objectif, nous avons soulevé la question principale suivante :

Est-ce qu'on ne pourrait pas utiliser les SMA pour solutionner les problèmes complexes d'interopérabilité de l'IdO ?

Pour répondre à cette question de recherche, nous nous référons d'abord à la section 4.1.7 qui décrit, non seulement quelques avantages de base qu'on retrouve en utilisant les SMA pour supporter l'IdO, mais aussi l'évidence d'une collaboration entre les deux dispositifs. Ensuite, le tableau 7.4 montre quelques caractéristiques ou dimensions communes qui existent entre ces 2 dispositifs, que nous avons retracées à travers la littérature.

Caractéristiques/dimensions	SMA	IdO
Autonomie	✓	✓
Distribution	✓	✓
Décentralisation	✓	✓
Échange de connaissances	✓	✓
Interaction	✓	✓
Organisation	✓	✓
Communication	✓	✓
Situation dans un environnement	✓	X
Ouverture	✓	✓
Émergence	✓	✓
Adaptation	✓	X
Délégation	✓	✓
Personnalisation	✓	✓
Intelligibilité	✓	X
Dynamique	✓	✓
Sociale	✓	✓

Tableau 7.4 Caractéristiques ou dimensions communes SMA et IdO

À partir des travaux consultés dans la littérature des SMA et de l'IdO, nous pensons que l'utilisation des mécanismes multiagents pour supporter l'IdO présentent des avantages très intéressants et qui sont non négligeables, surtout dans la perspective de déploiement de système distribué et de nature complexe. Les SMA ont déjà fait leurs preuves dans le support de ces types de systèmes et ils possèdent les caractéristiques nécessaires permettant de supporter un système comme l'IdO.

En effet, l'évidence avec laquelle s'emboîte la logique de conception de ces deux technologies est presque naturelle. Nous pensons que le SMA et l'IdO peuvent être associés et se nourrir de leurs caractéristiques ou dimensions communes et leurs approches sont assez complémentaires pour permettre une meilleure interopérabilité au niveau des applications de l'IdO. Toutes ces caractéristiques et dimensions communes nous permettent de renforcer notre hypothèse de départ, soit qu'une possible solution basée sur les mécanismes des systèmes multiagents permettra une meilleure interopérabilité entre les applications destinées à l'usage de l'internet des

objets. Donc, nous pensons que SMA et IdO se révèlent être une collaboration nécessaire pouvant assurer un avenir certain dans l'automatisation, dans la création de connaissances, dans la gestion et le déploiement de l'IdO.

Notre question secondaire était la suivante : Pourquoi est-il important de faire appel aux mécanismes SMA pour soutenir l'IdO ?

Pour y répondre, nous nous sommes basés sur notre revue de littérature. Nous avons vu qu'il existe plusieurs travaux dans la littérature qui nous parlent des avantages que peuvent apporter les SMA dans le développement des applications par exemple, ceux du collectif JFSMA sur les SMA, dans ces travaux les auteurs proposent une approche de développement d'applications diverses. Ces auteurs avancent que les SMA présentent des avantages de développement de systèmes surtout au niveau des composants autonomes, qui sont amenés à coopérer, permettant ainsi l'élaboration de différents modèles d'agents, d'environnements, d'interactions et d'organisations (JFSMA, 2008).

Selon Poggi, pour favoriser le développement d'applications dynamiques, un SMA est un bon outil ; de ce fait, il a présenté un cadre logiciel dénommé HDS (Heterogeneous Distributed System), qui favorise ce type de développement. L'avantage de ce type de développement est la fluidité des interactions entre les processus système par l'échange de messages (Poggi, 2010). Cette idée est confirmée par Miorandi et al. (2012).

Un SMA se base sur différents types d'agents qui sont appelés à communiquer entre eux, l'IdO de son côté se base sur différents types d'objets qui peuvent aussi communiquer entre eux dans un environnement local ou distant. À noter, que l'IdO possède déjà certaines caractéristiques liées aux SMA comme une certaine autonomie, une nature distribuée, etc. Donc, à partir de cette vision la construction d'applications d'internet des objets à partir des mécanismes multi-agents est

presque naturelle.

La solution middleware MISMA-IdO permettrait-elle de résoudre la problématique d'interopérabilité entre les applications d'IdO ?

Les technologies qui émergent dans le secteur de l'IdO sont nombreuses, il reste encore beaucoup à améliorer, voire même à construire des plateformes ou à mettre en place des standards essentiels afin de permettre leur adoption massive. La littérature consultée montre que l'IdO fait face à une montée croissante de la problématique d'interopérabilité au niveau de ses applications. « L'interopérabilité entre ces applications reste l'une des problématiques les plus pertinentes de l'IdO, qui nécessite d'être traitée en détail » (Miorandi *et al.*, 2012). « Les problématiques d'interopérabilité se posent à deux niveaux : l'interopérabilité architecturale et l'interopérabilité sémantique » (Gyrard *et al.*, 2015b).

Pour résumer, les causes réelles de la problématique d'interopérabilité des applications au niveau de l'IdO sont engendrées par le fait que dans l'IdO :

- Les domaines d'applications produisent des données distribuées, hétérogènes et qui nécessitent un autre type de traitements (Chaqfeh et Mohamed, 2012) ;
- L'adaptation, de la prise en compte du contexte, la découverte et de la gestion des objets avec des applications de domaines différents et d'exigences différentes, etc. (Soma Bandyopadhyay et Dutta, 2011) ;
- Les applications tierces de services qui utilisent les données d'IdO n'ont pas été conçues à la base pour être interopérables ensembles (Daclin *et al.*, 2005)
- L'absence de normes ou de standards de communication (Saleh, 2018).

Le passage des ordinateurs interconnectés aux objets interconnectés a ses propres exigences, comme la nécessité de simplifier le développement de nouvelles appli-

cations et de nouveaux services afin de prendre en charge l'interopérabilité entre différentes composantes ou applications hétérogènes. Pour faire face à ces exigences, beaucoup de travaux ont été proposés sur le middleware pour l'IdO à travers la littérature, mais peu de travaux existent sur la création d'un middleware avec les mécanismes SMA pour une ville intelligente. Les motifs qui nous ont poussé à faire le choix d'un middleware se retrouvent à travers la littérature :

- Ngu et al., ont fait ressortir le besoin d'utiliser un middleware afin de faciliter la communication d'application IdO conçue pour la prédiction en temps réel de la teneur en alcool dans le sang à l'aide des données des capteurs d'une montre intelligente. (Ngu *et al.*, 2016).
- Katasonov et al., de leur côté ont présenté un middleware intelligent avec les bases de la sémantique pour Internet des objets (Katasonov *et al.*, 2008)
- Buckley nous dit « qu'il semble généralement admis que parvenir à l'interopérabilité en imposant des normes rigides et en obligeant tout le monde à s'y conformer ne sont pas conseillés dans des environnements ubiquitaires. Par conséquent, l'interopérabilité nécessite l'existence d'un middleware pour servir de colle joignant des composants hétérogènes ensemble. Un ensemble cohérent de middleware, offrant l'interfaces de programmation d'applications, de communication et d'autres services aux applications, simplifiera la création d'applications et aidera au passage de l'approche de programmation statique vers une approche de configuration et de composition dynamique » (Buckley, 2006).
- Fersi et al., dans leurs travaux décrivent un ensemble d'exigences qui oblige l'utilisation d'un middleware pour l'IdO (Fersi, 2015).

Le middleware pour l'IdO est requis pour diverses raisons :

1. Il est difficile de définir et d'appliquer une norme commune entre tous les appareils appartenant à divers domaines de l'IdO.
2. Le middleware agit comme un lien reliant les applications hétérogènes entre elles.
3. Les applications de divers domaines exigent une couche d'abstraction/d'adaptation.
4. Le middleware fournit une API (interface de programmation d'application) pour les communications de la couche physique et les services requis pour les applications, masquant tous les détails de la diversité (Fersi, 2015).

Les raisons d'adoption des SMA pour supporter l'IdO sont nombreuses

Nous avons vu à travers la littérature l'importance qu'on accorde au développement de middleware avec des fonctionnalités différentes pour soutenir l'IdO. Les raisons qui nous ont poussés à faire appel aux mécanismes SMA pour mettre en place notre solution middleware pour soutenir IdO dans les villes intelligentes sont nombreuses :

- L'IdO exige une architecture distribuée complexe : les SMA ont montré leur pertinence pour la conception d'applications complexes et distribuées (JFSMA, 2017)
- L'IdO requiert un très grand nombre d'applications hétérogènes : les SMA favorisent le développement d'applications dynamiques, répondent aux besoins d'applications inter-domaines, et peuvent faciliter l'interopérabilité entre les applications IdO. Ils sont une solution de choix pour le développement d'applications dédiées à l'IdO (Miorandi et al., 2012).
- L'IdO génère de grands volumes de données : les SMA sont une solution idéale d'intégration de données, ils présentent une approche d'intégration

des données complexe effectuée par un ensemble d’agents dans une base de données (ETL) (Boussaid *et al.*, 2003).

- L’IdO est un système décentralisé avec une configuration spontanée : Une attention significative est accordée dans le domaine des SMA à la tâche de construction des systèmes décentralisés capables de supporter une configuration spontanée, de tolérer des défaillances partielles ou de soutenir une réorganisation adaptative de l’ensemble du système (Mamei et Zambonelli, 2006).

Pour plus d’explications sur les raisons qui nous ont poussées à choisir les SMA pour mettre en place notre solution middleware pour supporter l’IdO, référez-vous à la section 4.1.7 du chapitre 4.

Nous pouvons dire qu’effectivement la solution middleware MISMA-IdO permet bien de résoudre la problématique d’interopérabilité entre les applications d’IdO, parce que :

1. Premièrement, les exigences pour faire appel à un middleware comme une solution inhérente à l’interopérabilité des applications ont été prouvées à travers la littérature, voir les travaux de (Ngu *et al.*, 2016), (Fersi, 2015) et (Buckley, 2006). sur les exigences d’utilisation d’un middleware comme nécessité dans la facilitation de l’interopérabilité des composants hétérogènes comme dans le cas de l’IdO.
2. Deuxièmement, les SMA ont toujours été utilisés pour favoriser le développement d’applications dynamiques, pour répondre aux besoins d’applications inter-domaines, tout en facilitant l’interopérabilité entre les applications, voir les travaux de (Miorandi *et al.*, 2012), (Mamei et Zambonelli, 2006) et (Boussaid *et al.*, 2003) sur l’utilisation d’un SMA comme solution qui facilite l’intégration de données, l’interopérabilité des applications dynamiques venant de domaines différents, etc.

3. Troisièmement, nous avons vu comment notre solution middleware (module IQA) à travers ses agents logiciels a pu permettre le traitement et l'échange des données sur la qualité de l'air de la ville de Montréal à l'application AppAir via une API, de manière générique, sans tenir compte de la technologie utilisée, sans le besoin d'installation, de plug-ins ou de configuration, car nous nous sommes appuyés sur le web des objets qui utilisent des standards, des technologies qui ont déjà été éprouvées et qui sont largement utilisées.

À partir de ces constats, nous pouvons répondre positivement à notre deuxième question de recherche à savoir si : un système IdO vu comme SMA permettrait de lever un bon nombre de préoccupations importantes. Les résultats de notre recherche montrent qu'une cohabitation entre les technologies (SMA et IdO) est effectivement très pertinente pour favoriser l'interopérabilité entre les applications d'IdO à d'autres applications de domaines divers.

7.1.2 Dimension cognitive de la thèse

7.1.2.1 La communication

Dans le module du MISMA-IdO que nous avons développé, la collaboration des agents est possible grâce à l'envoi de messages de type ACL. Nous avons donc utilisé la communication directe (envoi de messages), avec un système de messagerie asynchrone qui est déjà offert dans la plateforme JADE, ce qui a permis aux agents d'échanger des messages sans difficultés.

Dans la figure 4.12 du chapitre précédent, nous avons présenté un exemple de code source de l'agent de recherche (SearchAgent) qui reçoit une demande de «station id» à partir d'un arrondissement et envoie un accusé de réception avec comme contenu de message « Arrondissement reçu, traitement en cours » à l'agent d'interface (InterfaceAgent) qui avait fait cette demande. Chomsky dans sa théorie cognitive nous dit que pour une communication soit effective, il faut que les entités

adoptent un ensemble de règles communes, arrivent à parler le même langage, c'est ce qu'il appelle dans ses travaux sur le langage et la cognition «une grammaire générative» (Chomsky, 1984).

Dans le cadre de la définition de nos agents, ils ont non seulement des attributs et de méthodes, mais aussi des processus internes qui sont traduits par threads ou des comportements divers qui permettent à l'agent d'être tout le temps en mode d'analyse. Donc, à chaque fois qu'un comportement démarre, l'agent s'engage dans un objectif particulier, ce qui lui permet d'interagir avec d'autres agents en utilisant le langage de communication ACL. Voir les figures 5.2, 5.3 et 5.4 qui nous montrent les séquences de messages ACL issues de la plateforme Jade entre l'agent d'interface (InterfaceAgent) et l'agent de recherche (SearchAgent). Les théories cognitives de Searle et de Sperber sur le langage et ces types de messages ACLs portent sur des types d'actes de langage (Searle, 1969) et (Sperber et Wilson, 1986).

7.1.2.2 Auto-organisation et émergence

Le mécanisme d'auto-organisation est le mécanisme par lequel l'émergence d'une solution globale (niveau macroscopique) se produit à partir des interactions au niveau local (niveau microscopique) des agents, et ce, sans contrôle central. Selon Boisier et al., le côté auto-organisation est un processus décentralisé, implicite et endogène, laissé à la responsabilité des agents et souvent initié par une pression environnementale. Du côté de la réorganisation, ce processus peut être centralisé ou décentralisé, mais toujours explicite et directement réalisé par des entités (concepteur ou agent) manipulant des primitives organisationnelles (Boisier et al, 2009).

L'auto-organisation et l'émergence opèrent au cœur de notre équipe d'agents. Dans notre solution middleware, ces deux propriétés sont illustrées dans la figure

4.4. Cette dernière nous montre comment les propriétés de l'auto-organisation et de l'émergence se manifestent dans notre approche à partir d'un scénario d'une demande de données sur la qualité d'air. Chaque agent du système agit ainsi en fonction d'un but précis, pour accomplir une tâche donnée et c'est l'accomplissement et l'addition de chacune des tâches qui fait émerger le résultat du système.

Nous savons que, dans les systèmes multiagents, la structure émergente découle d'un ensemble de processus, de l'interaction et de la collaboration des agents ainsi que des changements enregistrés au niveau de leurs états (Morowitz, 2004). Pour interpréter la notion d'émergence, Harnad, dans ses travaux sur les sciences cognitives, a préféré parler de la cognition collaborative plutôt que la cognition distribuée (Harnad, 2005). De plus, Vygotsky et Minsky parlent de « Society of Mind » pour interpréter la notion d'émergence. (Vygotsky et Cole, 1978). Poirier et Chicoisne parlent que de la cognition distribuée, pour traduire la cognition qui émerge globalement du comportement collectif des agents (Poirier et Chicoisne, 2006). Voir la section 3.7.1 pour plus d'explication sur la notion d'émergence.

Dans la solution MISMA-IdO (module IQA), les agents collaborent à travers des messages, et ils utilisent un langage commun, ce qui nous a permis de découvrir une dimension sociale de leurs interactions. D'après la littérature, la dimension sociale chez l'agent est d'une importance capitale, puisqu'elle est à la base de toutes formes d'interaction et de collaboration, cette dernière a été bien répertoriée comme étant une dimension cognitive (Dignum *et al.*, 2004) et (Galland *et al.*, 2014).

Au vu de ces constats, nous pouvons déduire que la solution middleware (MISMA-IdO) proposée possède bien des dimensions cognitives, puisque cette dernière a été implémentée via les mécanismes des systèmes multiagents qui déjà répondent aux différentes exigences d'un système cognitif.

7.1.3 Analyse du module IQA

L'organisation de la structure de notre middleware présente une hiérarchie uniforme où l'autorité est répartie entre les différents agents du système en cas de défaillance mono et multipoints. Les décisions sont prises par des agents disposant des informations appropriées. Les décisions sont envoyées à l'agent d'interface en cas de conflit entre les agents, afin que ce dernier informe l'utilisateur ou l'application d'une éventuelle erreur. Cette structure fait référence à une société démocratique où le pouvoir est réparti entre les institutions et les décisions peuvent être prises par plusieurs citoyens (agents) en fonction de leurs rôles, (Balaji et Srinivasan, 2010a). À noter que toutes les communications au sein du prototype IQA sont faites via des messages, ces interactions sont considérées au sein de notre communauté d'agents comme des actes de langage.

Nous pouvons comparer notre structure à une structure d'intelligence à essaim où chacune des fourmis (représentant les agents) sont dépourvue de grande intelligence est autonomes; elles arrivent à communiquer et à se coordonner via des phéromones (comparables à des messages permettant les interactions entre les agents SMA). Un tel comportement permet à la colonie de fourmis de soulever des poids ensemble, de se nourrir et même d'accomplir de grandes œuvres ensemble. C'est le même cas pour notre prototypes IQA, un ensemble d'agents simples qui accomplissent des tâches complexes comme le calcul de la qualité de l'air pour un arrondissement et une date donnés et à partir d'un ensemble de valeurs de polluants recueilli via différents types de capteurs éparpillés dans différents arrondissements de la ville de Montréal.

7.2 Opportunités de la recherche

Ce travail de recherche nous a permis non seulement de mieux comprendre la problématique de l'interopérabilité des applications d'IdO dans une ville intelligente mais aussi de voir quelles sont les techniques ou outils qui pourraient potentiellement faciliter une meilleure interopérabilité entre les applications IdO par rapport aux autres applications de domaines divers. De plus, ce travail nous donne l'opportunité de sensibiliser, motiver et même de convaincre les développeurs que des applications de domaines différents, de natures autonomes et distribuées peuvent facilement être développées via les technologies SMA.

Enfin, ce travail nous montre qu'un outil SMA peut agir comme middleware au niveau de la couche applicative, ce qui permettrait de connecter un nombre plus important de données, de services et ceci quel que soit le protocole de transport utilisé.

7.3 Les limites de la recherche

En analysant le contexte et l'envergure de ce rapport, il est clair que les résultats obtenus accusent certaines limites. Ces dernières peuvent être vues sous deux aspects :

Aspect méthodologique

Dans cette étude, nous avons pris au hasard un nombre limité de données. Nous savons que la taille de l'échantillon est une phase primordiale d'une étude empirique ou d'un travail de recherche. Donc, il est évident que notre travail de recherche présente des limites au point de vue méthodologique. La grandeur de l'échantillon des données se trouve au premier rang parmi les principaux facteurs qui limitent, d'un point de vue méthodologique, les résultats de notre recherche. Il

existe cependant de nombreuses interprétations sur la notion de représentativité d'un échantillon. Nous discutons de quelques-unes ci-après.

Selon Olivier Sautory, « Un échantillon n'est jamais représentatif "en soi", il est représentatif par rapport à certaines variables » (Sautory, 2010).

Pour Gerville-Réache et Couallier, « La définition d'échantillon représentatif diffère selon le plan d'échantillonnage probabiliste ou non probabiliste (Gerville-Réache et Couallier, 2011).

Selon Yves Tillé, « Le concept de représentativité est aujourd'hui à ce point galvaudé qu'il est désormais porteur de nombreuses ambivalences. Cette notion, d'ordre essentiellement intuitif, est non seulement sommaire mais encore fausse et, à bien des égards, invalidée par la théorie » (Tillé, 2001).

ISO 3534-1 Statistique-Vocabulaire et symboles, définit le terme d'échantillon comme : « Une ou plusieurs unités d'échantillonnage prélevées dans une population et destinées à fournir des informations sur cette population. Un échantillon peut servir de base à une décision concernant cette population ou le processus qui l'a produite » (GUIDE et ISO, 2001).

Cet éventail de définitions remet en cause la notion de représentativité d'un échantillon ; ces définitions nous montrent l'apparente subtilité et complexité de cette notion. Aussi, le contexte dans lequel se déroule cette étude ne nous a pas permis d'étendre notre échantillon de données, puisque l'accès à certaines données de polluants n'était pas possible. C'était le cas de SO_2 , par exemple, qui était disponible seulement pour les six premiers mois de l'année 2020.

Aspect pratique

Les résultats de cette étude découlent uniquement des cas pratiques, réalisés sous formes de simulations avec des données du service de l'environnement (des polluants) qui concernent uniquement la qualité de l'air de la ville de Montréal. Nous pensons qu'une étude qualitative préliminaire de nature exploratoire des données axées sur les thématiques des transports, des stationnements payants, de l'agriculture, etc. pourraient nous permettre non seulement d'augmenter notre échantillon de données, mais aussi de mieux valider notre approche.

Étant donné que nous sommes dans un contexte de ville intelligente, il est clair qu'il y aura à manipuler certaines données et processus complexes. Ainsi, nous pensons à une phase d'agentification qui permettrait de déterminer le type d'agent à assigner à certains noeuds d'objets. On pourrait ainsi avoir des noeuds d'agents cognitifs versus réactifs en fonction de l'ampleur du cycle décisionnel des objets actifs du système ; ceci permettra de mieux valider notre approche.

De ce fait, le risque pour que cette étude ne soit pas adaptée à tout type de projet demeure possible. Ainsi, le fait de ne pas pouvoir généraliser les résultats de ce travail constitue une limite qui doit être levée par des études subséquentes.

7.4 Perspectives

Notre première perspective se focalisera sur la possibilité de concevoir un modèle avec des mécanismes d'intelligence artificielle qui pourraient potentiellement nous permettre de faire de la prévision à partir des sous-indices et indices de la qualité de l'air de la ville de Montréal.

Notre deuxième perspective consistera à proposer un modèle d'intégration de données intelligentes afin de pouvoir déduire de la connaissance de nature et de formats différents, en fonction des domaines d'applications d'une ville dite intelligente.

Notre troisième perspective portera sur la conception d'un modèle d'agents qui prendra en compte les exigences de différents domaines d'applications dans une ville intelligente. Dans une telle perspective, ces agents apprendront à résoudre des conflits internes et implémenteront une certaine capacité d'apprentissage afin de pouvoir faire de l'induction en fonction d'une succession de situations issues de domaine divers.

De plus, nous pensons qu'il serait intéressant de mettre en place ou de simuler un environnement de déploiement distribué, c'est-à-dire, distribuer dans le Cloud ou sur plusieurs machines les agents afin qu'ils aient accès soit à des ressources propres, soit accès à des données propres, qu'ils soient plus près géographiquement ou sur le réseau des sources de données ou des utilisateurs (dans une perspective basée sur l'approche Edge to Cloud Computing), l'idée est de jouir de la caractéristique distribuée des SMA afin de résoudre la problématique de latence due aux échanges ou aux traitements locaux des différents agents système.

ANNEXE A

LISTE DES BORNES DE STATIONS

Numéro station	Nom	Adresse	Arrondissement/Ville	Latitude	Longitude
1	Jardin Botanique	Jardin Botanique, Montréal	Rosemont-La Petite-Patrie	45.56221	-73.571785
3	Saint-Jean-Baptiste	1050 A, St-Jean-Baptiste	Rivière-des-Prairies	45.641026	-73.499682
6	Anjou	7650 rue Châteauneuf	Anjou	45.602846	-73.558874
7	Chénier	Aréna Chénier (coin Chénier et Avenue de l'Aréna)	Anjou	45.60176	-73.541992
12	Ontario	1125 Ontario	Ville-Marie	45.52055	-73.563222
13	Drummond	1212 Drummond	Ville-Marie	45.497859	-73.573035
17	Caserne 17	4240 rue Charlevoix	Montréal-Nord	45.593325	-73.637328
28	Échangeur Décarie	2495 Duncan	Mont-Royal	45.502648	-73.663913
29	Parc Pilon	11280 Pie IX, (Parc Pilon)	Montréal-Nord	45.594576	-73.641535
43	Saint-Michel	8110 Boul. St-Michel	St-Michel	45.563697	-73.610447
49	Dorval	55 ave. Lilas	Dorval	45.439119	-73.7333
50	Hochelaga-Maisonneuve	3250, Ste-Catherine Est	Hochelaga-Maisonneuve	45.539928	-73.540388
55	Rivière-des-Prairies	12400, Wilfrid-Ouellette, coin Louis-Lumière	Rivière-des-Prairies	45.651722	-73.573896
59	Rivière-des-Prairies	12145 boul. Rivière-des-Prairies	Rivière-des-Prairies	45.652701	-73.562951
61	Maisonneuve, Ville-Marie	1001 de Maisonneuve Ouest	Ville-Marie	45.501531	-73.574311
66	Aéroport de Montréal Dorval	Aéroport de Montréal, 90-A rue Hervé-St-Martin	Dorval	45.468297	-73.741185
68	Verdun	3161 Joseph	Verdun	45.472854	-73.57296

Tableau A.1 Liste des bornes de stations

ANNEXE B

LISTE DES POLLUANTS ET VALEURS DE LA STATION ID 3

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Date	Station id	O3	NO	NO2	SO2	CO	PM2.5	PM10	PST	BC1_370nm	BC6_880nm
01-01-2020 01:00	3	15.7	0.1	8.7	0.0		8.7				
01-01-2020 02:00	3	16.7	0.1	5.9	0.0		5.6				
01-01-2020 03:00	3	13.3	0.8	10.1	0.0		6.9				
01-01-2020 04:00	3	15.8	0.3	6.8	0.0		6.8				
01-01-2020 05:00	3	17.4	0.1	4.8	0.0		6.2				
01-01-2020 06:00	3	16.0	0.5	6.4	0.0		5.2				
01-01-2020 07:00	3	16.6	0.3	5.3	0.0		3.7				
01-01-2020 08:00	3	18.4	0.0	2.3	0.0		2.8				
01-01-2020 09:00	3	17.8	0.3	2.3	0.0		3.0				
01-01-2020 10:00	3	17.0	1.3	3.0	0.0		3.0				
01-01-2020 11:00	3	17.8	1.1	2.0	0.0		2.9				
01-01-2020 12:00	3	17.9	1.0	1.9	0.0		2.8				
01-01-2020 13:00	3	18.0	1.3	2.6	0.0		3.1				
01-01-2020 14:00	3	19.8	1.1	2.4	0.1		3.3				
01-01-2020 15:00	3	20.0	1.2	2.7	0.1		2.8				
01-01-2020 16:00	3	18.1	0.8	3.8	0.0		3.8				
01-01-2020 17:00	3	16.3	0.5	5.8	0.0		5.1				
01-01-2020 18:00	3	15.6	0.4	6.7	0.0		5.7				
01-01-2020 19:00	3	14.9	0.6	5.7	0.0		6.0				
01-01-2020 20:00	3	15.4	0.5	6.4	0.0		4.9				
01-01-2020 21:00	3	17.0	0.7	7.4	0.0		3.6				
01-01-2020 22:00	3	25.3	0.1	3.0	0.0		2.3				
01-01-2020 23:00	3	28.8	0.0	1.9	0.0		2.1				
01-01-2020 24:00	3	32.6	0.2	3.0	0.0		2.0				
02-01-2020 01:00	3	36.2	0.0	1.7	0.0		2.3				
02-01-2020 02:00	3	36.4	0.0	2.0	0.0		2.6				
02-01-2020 03:00	3	30.9	0.0	5.5	0.0		2.7				
02-01-2020 04:00	3	27.6	0.1	9.4	0.0		2.7				

Tableau B.1 Liste des polluants de la station id 3

ANNEXE C

COMMUNICATIONS ET RÉCUPÉRATIONS DES DONNÉES AVEC LA VILLE DE MONTRÉAL

Bonjour Mme Melançon,

Merci d'avoir pris le temps de m'écrire, vos explications ont bien confirmé ma compréhension au sujet des données. Je travaille présentement sur mon projet de thèse à l'UQAM. Pour des fins de simulation et de tests, j'aimerais avoir accès à des données non traitées, afin que l'application que je développe puisse calculer l'indice et sous-indice de la qualité de l'air en fonction des formules et des valeurs de références que vous avez appliquées à la ville.

Donc, en gros, c'est aux concentrations que j'aimerais avoir accès afin de pouvoir réaliser ces calculs via des agents logiciels.

Dans l'espoir de vous lire sou peu recevez Mme mes salutations les plus sincères.

Pour plus d'explication, vous pouvez m'appeler au : xxx-ccc-~~aaaa~~

Merci et bonne semaine

Bonjour M. Pierre,

Vous pouvez télécharger les fichiers de données (horaire) sur notre site web : http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,74687650&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Pour le SO₂, il vous faudra des données minutes qui ne sont pas disponibles en ligne. Vous pouvez consulter le tableau des polluants mesurés sur notre site web afin de m'indiquer les stations qui vous intéressent; http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,74687589&_dad=portal&_schema=PORTAL. De plus, prière de m'indiquer pour quelle période vous voulez ces données.

Merci et bonne journée,

Sonia Melançon, Ph.D.
Chimiste -Réseau de surveillance de la qualité de l'air (RSQA)
Service de l'environnement
Division du contrôle des rejets et suivi environnemental
1555, rue Carrie-Derick, 2e étage

Figure C.1 Communication 1 avec la ville de Montréal

Bonjour M. Pierre,

Je viens de regarder votre fichier ~~excel~~. Votre premier problème est que vous utilisez les normes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (SO_2 , O_3 et NO_2) ou mg/m^3 (CO) alors que les données des gazeux sont en ~~ppb~~ donc soit vous convertissez toutes les données soit vous convertissez les normes.

Voici le tableau des facteurs de conversion:

O3	1 ppb =	1,96	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	1 ppb =	1,15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO2	1 ppb =	2,63	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO2	1 ppb =	1,88	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

De plus, vous utilisez une donnée horaire pour le SO_2 alors que la moyenne est sur **10 minutes mobiles** et vous utilisez une donnée horaire pour les $\text{PM}_{2,5}$ alors que la moyenne est sur **3 heures mobiles**.

La moyenne mobile inclut la moyenne sur la période de temps données avec les heures passées, donc pour les $\text{PM}_{2,5}$, la moyenne mobile de 3h est la sommes des valeurs des 3h divisée par 3 ($V_{1h} + V_{2h} + V_{3h}$)/3. Pour celle de 1h vous devez aller chercher les données de la journée précédente. Même chose avec SO_2 ~~sauf qu'on~~ utilise les données minutes sur 10 minutes.

Sonia Melançon, ~~Ph.D.~~
Chimiste -Réseau de surveillance de la qualité de l'air (RSQA)
Service de l'environnement
Division du contrôle des rejets et suivi environnemental
1555, rue Carrie-Derick, 2e étage
Montréal (Québec) H3C 6W2

Figure C.2 Communication 2 avec la ville de Montréal

ANNEXE D

RÉSULTATS DES CAS DE TESTS DU SCÉNARIO APPLICATION TIERCE

```
Date: 05-04-2020 02:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 02:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 05-04-2020 02:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 02:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 02:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 03:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 03:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 05-04-2020 03:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 03:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 03:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 04:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 04:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 05-04-2020 04:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 04:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 04:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 05:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 06:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1

Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 07:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 08:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 09:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 10:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 10:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 10:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 10:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 10:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 05-04-2020 11:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1
Date: 05-04-2020 11:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 05-04-2020 11:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 05-04-2020 11:00 La valeur du sous-indice de PM est 1
Date: 05-04-2020 11:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
```

Figure D.1 Résultats cas de test Saint-Anne-de-Bellevue

Figure D.2 Résultats cas de test Saint-Anne-de-Bellevue

ANNEXE E

RÉSULTATS DES CAS DE TESTS DU SCÉNARIO APPLICATION TIERCE RIVIÈRE- DES-PRAIRIES

```
Date: 06-05-2020 02:00 La valeur du sous-indice de o3 est 17
Date: 06-05-2020 02:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 02:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 02:00 La valeur du sous-indice de PM est 4
Date: 06-05-2020 02:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 03:00 La valeur du sous-indice de o3 est 17
Date: 06-05-2020 03:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 03:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 03:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 03:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 04:00 La valeur du sous-indice de o3 est 15
Date: 06-05-2020 04:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 04:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 04:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 04:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 15
Date: 06-05-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 05:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 14
Date: 06-05-2020 06:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 6
Date: 06-05-2020 06:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 16
Date: 06-05-2020 07:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 07:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 08:00 La valeur du sous-indice de o3 est 18
Date: 06-05-2020 08:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 08:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 08:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 08:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 09:00 La valeur du sous-indice de o3 est 17
Date: 06-05-2020 09:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 09:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 09:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 09:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 10:00 La valeur du sous-indice de o3 est 18
Date: 06-05-2020 10:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 10:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 10:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 10:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 11:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20
Date: 06-05-2020 11:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 1
Date: 06-05-2020 11:00 La valeur du sous-indice de CO est 0
Date: 06-05-2020 11:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 11:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
```

Figure E.1 Résultats cas de test Rivières-Des-Prairies

```

Date: 06-05-2020 12:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 12:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 06-05-2020 12:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 12:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 12:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 13:00 La valeur du sous-indice de o3 est 23
Date: 06-05-2020 13:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 06-05-2020 13:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 13:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 13:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 14:00 La valeur du sous-indice de o3 est 23
Date: 06-05-2020 14:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 06-05-2020 14:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 14:00 La valeur du sous-indice de PM est 4
Date: 06-05-2020 14:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 24
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de N02 est 1
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 15:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de o3 est 23
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de PM est 5
Date: 06-05-2020 16:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1

Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 17:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 18:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 19:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 20:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20
Date: 06-05-2020 20:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 20:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 20:00 La valeur du sous-indice de PM est 8
Date: 06-05-2020 20:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1
*****
Date: 06-05-2020 21:00 La valeur du sous-indice de o3 est 19
Date: 06-05-2020 21:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2
Date: 06-05-2020 21:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0
Date: 06-05-2020 21:00 La valeur du sous-indice de PM est 9
Date: 06-05-2020 21:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1

```

Figure E.2 Résultats cas de test Rivières-Des-Prairies

ANNEXE F

DAVANTAGE DE SIMULATIONS POUR MIEUX VALIDER LE MODULE IQA

Test pour la journée du 10-02-2020 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Rosemont-La-Petite-Patrie	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActual?date=200210
Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de o3 est 2 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 9 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de PM est 41 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de o3 est 7 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 7 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de PM est 40 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 7 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 7 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 36 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 2 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 10 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 32 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 1 Date: 10-02-2020 07:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 10 Date: 10-02-2020 07:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PM est 29 Date: 10-02-2020 07:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 2	<pre> <echantillon heure="3"> <qualite value="41"/> <polluant nom="NO2" value="9"/> <polluant nom="O3" value="2"/> <polluant nom="PM" value="41"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="4"> <qualite value="40"/> <polluant nom="NO2" value="7"/> <polluant nom="O3" value="7"/> <polluant nom="PM" value="40"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="5"> <qualite value="36"/> <polluant nom="NO2" value="7"/> <polluant nom="O3" value="7"/> <polluant nom="PM" value="36"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="6"> <qualite value="32"/> <polluant nom="NO2" value="10"/> <polluant nom="O3" value="2"/> <polluant nom="PM" value="32"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="7"> <qualite value="29"/> <polluant nom="NO2" value="10"/> <polluant nom="O3" value="1"/> <polluant nom="PM" value="29"/> <polluant nom="SO2" value="2"/> </echantillon> </pre>
Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : PROPOSE Content : J'ai reçu la station id 80 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 21:05:20 EST 2022: J'ai reçu la proposition po ur rechercher la liste des polluants pour la station 80 pour l e : 10-02-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 21:05:27 EST 2022: L'indice est :41 PM	<pre> <station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="41" polluant="PM"/> </pre>

Figure F.1 Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 10-02-2020

Test pour la journée du 15-02-2020 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Rosemont-La-Petite-Patrie	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActuel?date=200215
Date: 15-02-2020 13:00 La valeur du sous-indice de o3 est 22 Date: 15-02-2020 13:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2 Date: 15-02-2020 13:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 15-02-2020 13:00 La valeur du sous-indice de PH est 6 Date: 15-02-2020 13:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 15-02-2020 14:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20 Date: 15-02-2020 14:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 15-02-2020 14:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 15-02-2020 14:00 La valeur du sous-indice de PH est 7 Date: 15-02-2020 14:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 15-02-2020 15:00 La valeur du sous-indice de o3 est 21 Date: 15-02-2020 15:00 La valeur du sous-indice de N02 est 2 Date: 15-02-2020 15:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 15-02-2020 15:00 La valeur du sous-indice de PH est 7 Date: 15-02-2020 15:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 15-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de o3 est 20 Date: 15-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 15-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 15-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de PH est 8 Date: 15-02-2020 16:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 15-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de o3 est 17 Date: 15-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de N02 est 4 Date: 15-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 15-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de PH est 8 Date: 15-02-2020 17:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1	<pre> <echantillon heure="13"> <qualite value="22"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="22"/> <polluant nom="PM" value="6"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="14"> <qualite value="20"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="20"/> <polluant nom="PM" value="7"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="15"> <qualite value="21"/> <polluant nom="NO2" value="2"/> <polluant nom="O3" value="21"/> <polluant nom="PM" value="7"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="16"> <qualite value="20"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="20"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="17"> <qualite value="17"/> <polluant nom="NO2" value="4"/> <polluant nom="O3" value="17"/> <polluant nom="PM" value="8"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : PROPOSE Contenu : J'ai reçu la station id 80 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 21:16:13 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station 80 pour l à : 15-02-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 21:16:20 EST 2022: L'indice est :22 o3	<pre> <station id="80" donnees="oui"> <iqa-val value="22" polluant="O3"/> </pre>

Figure F.2 Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 15-02-2020

Test pour la journée du 30-01-2020 MISMA-IdO, (module IQA) pour la station de Sainte-Anne-de-Bellevue	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActuel?date=200130
Date: 30-01-2020 03:00 La valeur du sous-indice de o3 est 14 Date: 30-01-2020 03:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 30-01-2020 03:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 30-01-2020 03:00 La valeur du sous-indice de PH est 20 Date: 30-01-2020 03:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 30-01-2020 04:00 La valeur du sous-indice de o3 est 12 Date: 30-01-2020 04:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 30-01-2020 04:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 30-01-2020 04:00 La valeur du sous-indice de PH est 24 Date: 30-01-2020 04:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 30-01-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 12 Date: 30-01-2020 05:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 30-01-2020 05:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 30-01-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PH est 24 Date: 30-01-2020 05:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 30-01-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 12 Date: 30-01-2020 06:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 30-01-2020 06:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 30-01-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PH est 23 Date: 30-01-2020 06:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1 ***** Date: 30-01-2020 07:00 La valeur du sous-indice de o3 est 11 Date: 30-01-2020 07:00 La valeur du sous-indice de N02 est 3 Date: 30-01-2020 07:00 La valeur du sous-indice de C0 est 0 Date: 30-01-2020 07:00 La valeur du sous-indice de PH est 21 Date: 30-01-2020 07:00 La valeur du sous-indice de S02 est 1	<pre> <echantillon heure="3"> <qualite value="20"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="14"/> <polluant nom="PM" value="20"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="4"> <qualite value="24"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="12"/> <polluant nom="PM" value="24"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="5"> <qualite value="24"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="12"/> <polluant nom="PM" value="24"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="6"> <qualite value="23"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="12"/> <polluant nom="PM" value="23"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="7"> <qualite value="21"/> <polluant nom="NO2" value="3"/> <polluant nom="O3" value="11"/> <polluant nom="PM" value="21"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </pre>
Sender: searchAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : PROPOSE Contenu : J'ai reçu la station id 99 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 20:12:36 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour le 30-01-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 20:12:42 EST 2022: L'indice est .24 PM	<pre> </station> <station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="24" polluant="PM"/> </pre>

Figure F.3 Sainte-Anne-de-Bellevue pour la journée du 30-01-2020

Test pour la journée du 10-02-2020 MISMA-idO, (module IQA) pour la station de Sainte-Anne-de-Bellevue	Ville de Montréal http://ville.montreal.qc.ca/rsqa/servlet/makeXmlActuel?date=200210
Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de o3 est 9 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de PM est 47 Date: 10-02-2020 03:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de o3 est 9 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de PM est 46 Date: 10-02-2020 04:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de o3 est 10 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 6 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de PM est 41 Date: 10-02-2020 05:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1 ***** Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de o3 est 11 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de NO2 est 5 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de CO est 0 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de PM est 37 Date: 10-02-2020 06:00 La valeur du sous-indice de SO2 est 1	<pre> <echantillon heure="3"> <qualite value="47"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="9"/> <polluant nom="PM" value="47"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="4"> <qualite value="46"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="9"/> <polluant nom="PM" value="46"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="5"> <qualite value="41"/> <polluant nom="NO2" value="6"/> <polluant nom="O3" value="10"/> <polluant nom="PM" value="41"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> <echantillon heure="6"> <qualite value="37"/> <polluant nom="NO2" value="5"/> <polluant nom="O3" value="11"/> <polluant nom="PM" value="37"/> <polluant nom="SO2" value="1"/> </echantillon> </station> <station id="99" donnees="oui"> <iqa-val value="47" polluant="PM"/> </pre>
Contenue : J'ai reçu la station id 99 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 12:56:41 EST 2022: J'ai reçu la proposition pour rechercher la liste des polluants pour la station:99 pour l ie : 10-02-2020 Sender: airAgent@169.254.188.169:1099/JADE Act de message : INFORM Thu Nov 17 12:56:52 EST 2022: L'indice est :47 PM	

Figure F.4 Rosemont-La-Petite-Patries pour la journée du 15-02-2020

RÉFÉRENCES

- Aazam, M., Khan, I., Alsaffar, A. A. et Huh, E.-N. (2014). Cloud of things : Integrating internet of things and cloud computing and the issues involved. Dans *Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 14th-18th January, 2014*, 414–419. IEEE.
- Abuarafah, A. G., Mohammed, H. A. et Khozium, M. O. (2013). Agent vs object with an in-depth insight to multi-agent systems. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 4(3).
- Adam, E., MANDIAU, R. et KOLSKI, C. (2002a). Une méthode de modélisation et de conception d’organisations multi-agents holoniques.
- Adam, E., Mandiau, R. et Kolski, C. (2002b). Une methode de modelisation et de conception d’organizations multi-agents holoniques. *Hermes, Paris*.
- Al-Ali, A.-R., Gupta, R., Zaman Batool, T., Landolsi, T., Aloul, F. et Al Nabulsi, A. (2020). Digital twin conceptual model within the context of internet of things. *Future Internet*, 12(10), 163.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. et Ayyash, M. (2015). Internet of things : A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(4), 2347–2376.
- Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K. et Alzubaidi, M. (2017). Internet of things (iot) communication protocols. Dans *2017 8th International conference on information technology (ICIT)*, 685–690. IEEE.
- Amaral, L. A., de Matos, E., Tiburski, R. T., Hessel, F., Lunardi, W. T. et Marczak, S. (2016). Middleware technology for iot systems : Challenges and perspectives toward 5g. In *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies* 333–367. Springer.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C. et Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological review*, 111(4), 1036.
- Anderson, J. R. et Bower, G. H. (2014). *Human associative memory*. Psychology press.

- Arlabosse F., Gleizes M.-P., O. M. (2004). Méthodes de conception de systèmes multi-agents. in systèmes multi-agents. Dans *Collection ARAGO - N 29*.
- Assoudi, H. et Lounis, H. (2017). Reflex-smas, a complex adaptive system : An empirical evaluation. Dans *International Conference on E-Technologies*, 300–318. Springer.
- Atzori, L., Iera, A. et Morabito, G. (2010). The internet of things : A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787–2805.
- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. et Nitti, M. (2012). The social internet of things (siot)—when social networks meet the internet of things : Concept, architecture and network characterization. *Computer networks*, 56(16), 3594–3608.
- Azzouzi, S., Benattou, M., Charaf, M. E. H. et Abouchabaka, J. (2010). Sma and mobile agents actors for distributed testing. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 7(5), 231.
- Baars, B. J. et al. (1997). *In the theater of consciousness : The workspace of the mind*. Oxford University Press, USA.
- Baars, B. J. et Franklin, S. (2003). How conscious experience and working memory interact. *Trends in cognitive sciences*, 7(4), 166–172.
- Balaji, P. et Srinivasan, D. (2010a). An introduction to multi-agent systems. In *Innovations in multi-agent systems and applications-1* 1–27. Springer.
- Balaji, P. et Srinivasan, D. (2010b). Multi-agent system in urban traffic signal control. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 5(4), 43–51.
- Balbo, F., Boissier, O. et Badeig, F. (2010). Spécification des modes d’interaction au sein d’organisations multi-agents. Dans *JFSMA*, 141–150.
- Baldasano, J. M., Valera, E. et Jiménez, P. (2003). Air quality data from large cities. *Science of the Total Environment*, 307(1-3), 141–165.
- Bandyopadhyay, S., Sengupta, M., Maiti, S. et Dutta, S. (2011). Role of middleware for internet of things : A study. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, 2(3), 94–105.
- Bansal, M., Chana, I. et Clarke, S. (2020). A survey on iot big data : current status, 13 v’s challenges, and future directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(6), 1–59.
- Batty, M. (1990). Intelligent cities : using information networks to gain competitive advantage.

- Batty, M. (2012). Smart cities, big data.
- Batty, M. (2013). We make our technologies and then they make us.
- Benda, R., Fagiani, T., Giovachini, P. et de Saint Maurice, C. P. (2018). La ville et l'internet des objets.
- Bendavid, Y., Wamba, S. F. et Barjis, J. (2013). Special issue on rfid-towards ubiquitous computing and the web of things : Guest editors' introduction.
- Bergenti, F. et Poggi, A. (2000). Exploiting uml in the design of multi-agent systems. Dans *International Workshop on Engineering Societies in the Agents World*, 106–113. Springer.
- Berners-Lee, T. (1992). Le futur du web le web sémantique. *Policy*.
- Besharati, M. R. et Khameneh, A. S. (2021). Modeling of resource allocation mechanisms in distributed computing systems using petri nets and stochastic activity networks (san) : a review and reo-based suggestion. *arXiv preprint arXiv :2103.07237*.
- Billet, B. (2015). *Système de gestion de flux pour l'Internet des objets intelligents*. (Thèse de doctorat). Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines.
- Boissier, O., Bordini, R. H., Hübner, J. F., Ricci, A. et Santi, A. (2013). Multi-agent oriented programming with jacamo. *Science of Computer Programming*, 78(6), 747–761.
- Boissier O., Gitton, S. G. P. (2004). *Caractéristiques des Systèmes et des Applications. Systèmes Multi-Agents, Observatoire Français des Techniques Avancées, ARAGO 29*. TEC DOC.
- Bougrain, L. et Boniface, Y. (2000). Détermination de l'architecture de modèles neuromimétiques par implantation parallèle. Dans *Journées Scientifiques du Centre Charles Hermite*, 3–p.
- Boussaid, O., Bentayeb, F., Duffoux, A. et Clerc, F. (2003). Smaidoc : A multi-agent system-based for complex data integration. Dans *First International Conference on Holotic and Multi-Agent System (Holomas 03)*, p. 201.
- Bratman, M. et al. (1987). *Intention, plans, and practical reason*, volume 10. Harvard University Press Cambridge, MA.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, 47(1-3), 139–159.

- Buckley, J. (2006). From rfid to the internet of things : Pervasive networked systems in report on the conference organized by dg information society and media, networks and communication technologies directorate, brussels, march 6-7. Dans *2012 international conference on collaboration technologies and systems (CTS)*. IEEE.
- Burg, B. et FIPA, V. P. (2002). Foundation for intelligent physical agents. *Official FIPA presentation, Lausanne, February*.
- Burmeister, D., Altakrouri, B. et Schrader, A. (2015). Ambient reflection : Towards self-explaining devices. Dans *LMIS@ EICS*, 16–20.
- Castelfranchi, C. (1995). Commitments : From individual intentions to groups and organizations. Dans *ICMAS*, volume 95, 41–48.
- Challal, Y. (2012). *Sécurité de l’Internet des Objets : vers une approche cognitive et systémique*. (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Compiègne.
- Chaqfeh, M. A. et Mohamed, N. (2012). Challenges in middleware solutions for the internet of things. Dans *2012 international conference on collaboration technologies and systems (CTS)*, 21–26. IEEE.
- Chen, M., Mao, S. et Liu, Y. (2014). Big data : A survey. *Mobile networks and applications*, 19(2), 171–209.
- Chomsky, N. (1984). La connaissance du langage. *Communications*, 40(1), 7–24.
- Chomsky, N. et Schaff, A. (1997). Language and cognition. *The future of the cognitive revolution*, 15–31.
- Chung, E., Lefrançois, M. et Boissier, O. (2020). Increasing interoperability in the web of things using autonomous agents (position paper). Dans *18e Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle 2020 (RJCIA)*.
- COM (2009). Commission des communautés européennes, l’internet des objets : un plan d’action pour l’europe. *Internet des objets*.
- comtech (2017). an-open-source-project-for-the-iot-5-638
[http ://comtech2.com/the-internet-of-things-7-challenges-2/an-open-source-project-for-the-iot-5-638/](http://comtech2.com/the-internet-of-things-7-challenges-2/an-open-source-project-for-the-iot-5-638/). Visité 10-janvier-2022.
- Cossentino, M. (2012). From requirements to code with the passi methodology, agent-oriented methodologies, b. henderson-sellers and p. giorgini. *Idea Group Inc., Hershey, PA, USA*.
- Cossentino, M., Fortino, G., Garro, A., Mascillaro, S. et Russo, W. (2008). Passim : a simulation-based process for the development of multi-agent systems.

- International Journal of Agent-Oriented Software Engineering*, 2(2), 132–170.
- Cranefield, S. et Purvis, M. (1999). Uml as an ontology modelling language.
- Crist, E. (2004). Can an insect speak ? the case of the honeybee dance language. *Social Studies of Science*, 34(1), 7–43.
- CÉSTQ (2017). La ville intelligente au service du bien commun : Lignes directrices pour allier l'éthique au numérique dans les municipalités du québec.
- Daclin, N., Chen, D. et Vallespir, B. (2005). Développement de l'interopérabilité des applications de gestion industrielles : concepts de base et définitions. *6e Congrès international de génie industriel–7-10 juin*.
- Damba, A. (2010). Policy control in multiagent system with hierarchical representation.
- De Wolf, T., Samaey, G. et Holvoet, T. (2005). Engineering self-organising emergent systems with simulation-based scientific analysis. Dans *Proceedings of the third international workshop on engineering self-Organising applications*, 146–160.
- DeLoach, S. A. (1999). *Multiagent systems engineering : a methodology and language for designing agent systems*. Rapport technique, AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH DEPT OF ELECTRICAL AND . . .
- Demazeau, Y. (1995). From interactions to collective behaviour in agent-based systems. Dans *In : Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science. Saint-Malo*. Citeseer.
- Demazeau, Y. et Costa, A. R. (1996). Populations and organizations in open multi-agent systems. Dans *Proceedings of the 1st National Symposium on Parallel and Distributed AI*, 1–13.
- Demazeau, Y. et Müller, J.-P. (1990). *Decentralized Ai*. Elsevier.
- Detzner, A., Eigner, M. et al. (2018). A digital twin for root cause analysis and product quality monitoring. Dans *DS 92 : Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 1547–1558.
- Dib, A. T. E. (2017). *Une approche formelle basée BRS pour la spécification et la vérification des architectures des systèmes Multi-Agents*. (Thèse de doctorat). Université constantine 2.
- Dignum, V., Vázquez-Salceda, J. et Dignum, F. (2004). Omni : Introducing social structure, norms and ontologies into agent organizations. Dans *International Workshop on Programming Multi-Agent Systems*, 181–198. Springer.

- Dixon, J. (2010). Pentaho, hadoop, and data lakes. *blog, Oct.*
- Doran, J., Palmer, M., Gilbert, N. et Mellars, P. (2018). The eos project : modelling upper palaeolithic social change. In *Simulating societies* 195–221. Routledge.
- Drogoul, A. (1993). *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*. (Thèse de doctorat). Thesis at University of Paris IV.
- Drogoul A., Ferrand N., M. J. (2004). Emergence : L’articulation du local au global. in : Observatoire français des techniques avancées. systèmes multi-agents. Dans *Paris : OFTA*, p. 105-136.
- Dubois, D., Gaha, M., Nkambou, R. et Poirier, P. (2008). Cognitive tutoring system with "consciousness". Dans *Intelligent Tutoring Systems : 9th International Conference, ITS 2008, Montreal, Canada, June 23-27, 2008 Proceedings 9*, 803–806. Springer.
- EasyPark, G. (2017). Smart city index 2017. <https://www.parking-net.com/parking-news/easypark-group/smart-city-index-2017>.
- Edmonds, B. (2004). Using the experimental method to produce reliable self-organised systems. Dans *International workshop on engineering self-organising applications*, 84–99. Springer.
- EliceGUI, I., López, C., Sánchez, L., Lanza, J., Muñoz, L., Pintus, A., Manchinu, A. et Serra, A. (2017). Design and implementation of a cloud-based platform for unleashing the personal and communal internet of things. *Mobile Information Systems, 2017*.
- Elwessabi, A. A. Y. (2014). *Une approche basée agent mobile pour le cloud computing*. (Thèse de doctorat). Université de Batna 2.
- et Morgan T, E. R. (1987). Blackboard systems. addison-wesley. Dans *collection of historical blackboard papers*.
- Evans, D. (2011). L’internet des objets comment l’évolution actuelle d’internet transforme-t-elle le monde? *Livre Blanc, Édition : Cisco IBSG, États-Unis*.
- Fan, T. et Chen, Y. (2010). Smartsantander : A scheme of data management in the internet of things. Dans *2011 Future Network & Mobile Summit*, pp. 110–114. IEEE.
- Fang, H. (2015). Managing data lakes in big data era : What’s a data lake and why has it became popular in data management ecosystem. Dans *2015 IEEE*

- International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 820–824. IEEE.
- Fayon, D. (2021). L'intelligence artificielle : une certaine intelligence du social.
- Ferber, J. (1995). *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*, volume 1. Addison-Wesley Reading.
- Ferber, J. (1996). Intelligence : Principles and applications. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, 9, 287.
- Ferguson, I. A. (1992). Touring machines : Autonomous agents with attitudes. *Computer*, 25(5), 51–55.
- Fersi, G. (2015). Middleware for internet of things : A study. Dans *2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, 230–235. IEEE.
- FIPA00003, S. (2000). Fipa interaction protocol library specification.
- Fiske, A. P. (1992). The four elementary forms of sociality : framework for a unified theory of social relations. *Psychological review*, 99(4), 689.
- Flores-Mendez, R. A. (1999). Towards a standardization of multi-agent system framework. *XRDS : Crossroads, The ACM Magazine for Students*, 5(4), 18–24.
- Franklin, S. (2000). Modeling consciousness and cognition in software agents. Dans *Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Modeling, Groningen, NL*.
- Frenois, M. (2016). Internet of things, services and applications categorization. *advances in internet of things*, 1, 27–31.
- Galland, S., Gaud, N., Rodriguez, S., Balbo, F., Picard, G. et Boissier, O. (2014). Contextualiser l'interaction entre agents en combinant dimensions sociale et physique au sein de l'environnement. Dans *JFSMA*, 65–74.
- Garcia, J. et Colosio, J. (2001). *Les indices de qualité de l'air : élaboration, usages et comparaisons internationales*. Presses des MINES.
- Gartner, S. (2017). Integrate iot-connected products. Récupéré le 2017-03-28 de <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/as-an-alternative-to-do-it-yourself-integration-many-companies-take-their-first>
- Geraci, A. (1991). *IEEE standard computer dictionary : Compilation of IEEE standard computer glossaries*. IEEE Press.

- Gerville-Réache, L. et Couallier, V. (2011). Échantillon représentatif (d'une population finie) : définition statistique et propriétés.
- Ghorbel, H., Bahri, A. et Bouaziz, R. (2008). Les langages de description des ontologies : Rdf & owl. *Acte des huitièmes journées scientifique des jeunes chercheurs en Génie Electrique et Informatique (GEI), Sousse-Tunisia*.
- Ghurburn, R. (2008). *Intégration de données à partir de connaissances : une approche multi-agent pour la gestion des changements*. (Thèse de doctorat).
- Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Meijers, E. *et al.* (2007). City-ranking of european medium-sized cities. *Cent. Reg. Sci. Vienna UT*, 9(1), 1–12.
- Gigli, M. et Koo, S. (2011). Internet of things, services and applications categorization. *advances in internet of things*, 1, 27–31.
- Gilbert, N. (2006). Emergence in social simulation. In *Artificial societies* 134–143. Routledge.
- Ginsberg, M. L. (1991). Knowledge interchange format : The kif of death. *AI magazine*, 12(3), 57–57.
- Grieves, M. et Vickers, J. (2017). Digital twin : Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems* 85–113. Springer.
- Grouls, A. (2013). Agents et systemes multi-agents : vers une synthese de ces concepts/memoire presente comme exigence partielle de la maitrise en informatique par alexandre grouls;[directeur de recherche, roger nkambou].
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5(2), 199–220.
- GUIDE, D. I. et ISO, P. D. G. (2001). Gestion du risque—vocabulaire—principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. *PROJET*, 2, 01–103.
- Gunsberg, D., Callow, B., Ryan, B., Suthers, J., Baker, P. A. et Richardson, J. (2018). Applying an organisational agility maturity model. *Journal of Organizational Change Management*.
- Gyrard, A. (2015). *Concevoir des applications internet des objets sémantiques*. (Thèse de doctorat). Paris, ENST.
- Gyrard, A., Datta, S. K., Bonnet, C. et Boudaoud, K. (2015a). Cross-domain internet of things application development : M3 framework and evaluation. Dans *2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud*, 9–16. IEEE.

- Gyrard, A., Serrano, M. et Atemezing, G. A. (2015b). Semantic web methodologies, best practices and ontology engineering applied to internet of things. Dans *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 412–417. IEEE.
- Harnad, S. (2005). Distributed processes, distributed cognizers, and collaborative cognition. *Pragmatics & Cognition*, 13(3), 501–514.
- Hassan, A., MRABET, A. et DARMON, P. (2022). Vers une modélisation orientée privacy des métadonnées d’un lac de données.
- Helleboogh, A., Vizzari, G., Uhrmacher, A. et Michel, F. (2007). Modeling dynamic environments in multi-agent simulation. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1), 87–116.
- Hervás, R., Bravo, J., Fontecha, J. et Villarreal, V. (2013). Achieving adaptive augmented reality through ontological context-awareness applied to aal scenarios.
- Heylighen, F. *et al.* (2001). The science of self-organization and adaptivity. *The encyclopedia of life support systems*, 5(3), 253–280.
- Holmquist, L. E., Mattern, F., Schiele, B., Alahuhta, P., Beigl, M. et Gellersen, H.-W. (2001). Smart-its friends : A technique for users to easily establish connections between smart artefacts. Dans *international conference on Ubiquitous Computing*, 116–122. Springer.
- Hoorens, V. et Poortinga, Y. H. (2000). Behavior in the social context.
- Horling, B. et Lesser, V. (2004). A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge engineering review*, 19(4), 281–316.
- Hsia, T. C. et Soderstrand, M. (1996). Development of a micro robot system for playing soccer games. Dans *Proceedings of the Micro-Robot World Cup Soccer Tournament*, 149–152.
- Huang, X., Fan, J., Deng, Z., Yan, J., Li, J. et Wang, L. (2021). Efficient iot data management for geological disasters based on big data-turbocharged data lake architecture. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 743.
- Hübner, J. F., Sichman, J. S. et Boissier, O. (2007). Developing organised multiagent systems using the moise+ model : programming issues at the system and agent levels. *International Journal of Agent-Oriented Software Engineering*, 1(3/4), 370–395.

- Hung, M. (2017). Leading the iot, gartner insights on how to lead in a connected world. *Gartner Research*, 1–29.
- Jaiswal, A., Dwivedi, V. K. et Yadav, O. P. (2020). Big data and its analyzing tools : A perspective. Dans *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 560–565. IEEE.
- Jalaludin, B. et Cowie, C. (2014). Particulate air pollution and cardiovascular disease—it is time to take it seriously. *Reviews on environmental health*, 29(1-2), 129–132.
- Jean-Michel, C., Franck, G., Pablo, G. et Abder, K. (2008). Evaluation of global system state thanks to local phenomena. In *ECAI 2008* 865–866. IOS Press.
- Jennings, N. R. et Wooldridge, M. (1998). Applications of intelligent agents. In *Agent technology* 3–28. Springer.
- JFSMA, C. (2008). Jsma systèmes multi-agents jfsma 08. Récupéré de <https://www.cephadues.com/livres/sma-systemes-multi-agents-jfsma-08-9782854288612.html>
- Johnson, S. (2002). *Emergence : The connected lives of ants, brains, cities, and software*. Simon and Schuster.
- Julien, N. et Martin, É. (2020). *Le jumeau numérique : De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod.
- Katasonov, A., Kaykova, O., Khriyenko, O., Nikitin, S. et Terziyan, V. (2008). Smart semantic middleware for the internet of things. Dans *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, volume 2, 169–178. ScitePress.
- Khalil, A., Mbarek, N. et Togni, O. (2020). Gestion du niveau de service dans l'internet des objets (ido). *Gestion du niveau de service dans les environnements émergents*, p. 5.
- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R. et Khan, S. (2012). Future internet : the internet of things architecture, possible applications and key challenges. Dans *2012 10th international conference on frontiers of information technology*, 257–260. IEEE.
- Khine, P. P. et Wang, Z. S. (2018). Data lake : a new ideology in big data era. Dans *ITM web of conferences*, volume 17, p. 03025. EDP Sciences.
- Khomsy, M. R. (2016). The smart city ecosystem as an innovation model : lessons from montreal. *Technology Innovation Management Review*, 6(11).

- Klein, F. (2009). *Contrôle d'un Système Multi-Agents Réactif par Modélisation et Apprentissage de sa Dynamique Globale*. (Thèse de doctorat). Université Nancy II.
- Knowles, E. M., Partington, A. et al. (1999). *The Oxford dictionary of quotations*. Oxford [England] : Oxford University Press.
- Koestler, A. (1967). The ghost in the machine, hutchinson.
- Kos, A., Pristov, D., Sedlar, U., Sterle, J., Volk, M. et Besteré, V. (2012). Smart-santander : Open and scalable iot platform and its applications for real time access line monitoring and alarm correlation.
- LAIADI, A. (2020). Une approche sémantique pour la gestion de données issues de l'internet des objets dans un contexte de big data.
- Lajunen, T., Parker, D. et Summala, H. (1999). Does traffic congestion increase driver aggression? *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 2(4), 225–236.
- Larman, C. (2012). *Applying UML and patterns : an introduction to object oriented analysis and design and interative development*. Pearson Education India.
- Lécué, F., Tallevi-Diotallevi, S., Hayes, J., Tucker, R., Bicer, V., Sbodio, M. et Tommasi, P. (2014). Smart traffic analytics in the semantic web with star-city : Scenarios, system and lessons learned in dublin city. *Journal of web semantics*, 27, 26–33.
- Leitao, P., Valckenaers, P. et Adam, E. (2009). Self-adaptation for robustness and cooperation in holonic multi-agent systems. In *Transactions on Large-Scale Data-and Knowledge-Centered Systems I* 267–288. Springer.
- Lejouad-Chaari, W. K. (2014). Une ontologie pour la réutilisation des interactions dans un système multi-agents.
- Leong, P. et Lu, L. (2014). Multiagent web for the internet of things. Dans *2014 International Conference on Information Science & Applications (ICISA)*, 1–4. IEEE.
- Liu, C., Yang, C., Zhang, X. et Chen, J. (2015). External integrity verification for outsourced big data in cloud and iot : A big picture. *Future generation computer systems*, 49, 58–67.
- Lorente, Q., Villeneuve, E., Merlo, C., Boy, G. A. et Thermy, F. (2022). Development of a digital twin for collaborative decision-making, based on a multi-agent system : application to prescriptive maintenance. Dans *INCOSE International*

- Symposium*, volume 32, 109–117. Wiley Online Library.
- Malekshahi Rad, M., Rahmani, A. M., Sahafi, A. et Nasih Qader, N. (2020). Social internet of things : Vision, challenges, and trends. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 10(1), 1–40.
- Mamei, M. et Zambonelli, F. (2006). *Field-based coordination for pervasive multi-agent systems*. Springer Science & Business Media.
- Mandler, B., Marquez-Barja, J., Campista, M. E. M., Cagáňová, D., Chaouchi, H., Zeadally, S., Badra, M., Giordano, S., Fazio, M., Somov, A. et al. (2016). *Internet of Things. IoT Infrastructures : Second International Summit, IoT 360 2015, Rome, Italy, October 27-29, 2015. Revised Selected Papers, Part I*, volume 169. Springer.
- Martin, D. L., Cheyer, A. J. et Moran, D. B. (1999). The open agent architecture : A framework for building distributed software systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13(1-2), 91–128.
- Marzougui, B. et Barkaoui, K. (2013). Interaction protocols in multi-agent systems based on agent petri nets model. *Int J Adv Comput Sci Appl*, 4(7).
- Mella, P. (2009). The holonic perspective in management and manufacturing. *International management review*, 5(1), 19–30.
- Minsky, M. (1988). *Society of mind*. Simon and Schuster.
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F. et Chlamtac, I. (2012). Internet of things : Vision, applications and research challenges. *Ad hoc networks*, 10(7), 1497–1516.
- Morowitz, H. J. (2004). *The emergence of everything : How the world became complex*. Oxford University Press, USA.
- Muller, P.-A. et Gaertner, N. (2003). *Modélisation objet avec UML*, volume 514. Eyrolles Paris.
- Mzahm, A. M., Ahmad, M. S. et Tang, A. Y. (2013). Agents of things (aot) : An intelligent operational concept of the internet of things (iot). Dans *2013 13th international conference on intelligent systems design and applications*, 159–164. IEEE.
- Nazari Shirehjini, A. A. (2007). A multidimensional classification model for the interaction in reactive media rooms. Dans *International Conference on Human-Computer Interaction*, 431–439. Springer.
- Nazari Shirehjini, A. A. et Semsar, A. (2017). Human interaction with iot-based

- smart environments. *Multimedia Tools and Applications*, 76(11), 13343–13365.
- Newell, A. (1982). The knowledge level. *Artificial intelligence*, 18(1), 87–127.
- Ngu, A. H., Gutierrez, M., Metsis, V., Nepal, S. et Sheng, Q. Z. (2016). Iot middleware : A survey on issues and enabling technologies. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 1–20.
- Niwa, T., Okaya, M. et Takahashi, T. (2014). Tendenko : Agent-based evacuation drill and emergency planning system. Dans *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, 167–179. Springer.
- Noisette, T. (2013). La mairie de nice inaugure le « stationnement intelligent » en centre ville.
- Olivié-Paul, E. (2015). Conférence acsel objet connectés : enjeux et confiance. Récupéré le 2019-03-28 de <https://www.acsel.eu/objets-connectes-enjeux-et-confiance/>
- Olsson, R. A. et Keen, A. W. (2004). The dining philosophers. *The JR Programming Language : Concurrent Programming in an Extended Java*, 159–171.
- Park, D. (2018). Future computing with iot and cloud computing. *the Journal of Supercomputing*, 74(12), 6401–6407.
- Patel, P. et Cassou, D. (2015). Enabling high-level application development for the internet of things. *Journal of Systems and Software*, 103, 62–84.
- Picard G, Hubner JF, B. O. G. M. (2009). Réorganisation et auto-organisation dans les systèmes multi-agents. journées francophones sur les systèmes multi-agents—génie logiciel multiagent (jfsma09). 2009 oct 19 :89-97. *Science of Computer Programming*.
- Pico-Valencia, P., Holgado-Terriza, J. A., Herrera-Sánchez, D. et Sampietro, J. (2018). Towards the internet of agents : an analysis of the internet of things from the intelligence and autonomy perspective. *Ingeniería e Investigación*, 38(1), 121–129.
- Poggi, A. (2010). Hds : a software framework for the realization of pervasive applications. wseas transactions on computers. *Journal of Web Semantics*, 27, pp.1149-1159.
- Poirier, P. et Chicoisne, G. (2006). A framework for thinking about distributed cognition. *Pragmatics & Cognition*, 14(2), 215–234.
- Poudel, S. (2016). Internet of things : underlying technologies, interoperability, and threats to privacy and security. *Berkeley Technology Law Journal*, 31(2),

- 997–1022.
- Raje, R. R., Qiao, M., Mukhopadhyay, S., Palakal, M., Peng, S. et Mostafa, J. (2002). Homogeneous agent-based distributed information filtering. *Cluster Computing*, 5(4), 377–388.
- Remondino et Correndo (2006). Mabs validation through repeated execution and data mining analysis.
- Roalter, L., Kranz, M. et Möller, A. (2010). A middleware for intelligent environments and the internet of things. Dans *International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*, 267–281. Springer.
- Roques, P. (2013). *Modélisation de systèmes complexes avec SysML*. Editions Eyrolles.
- Russell, S. et Norvig, P. (1995). Artificial intelligence : A modern approach prentice-hall. *Englewood cliffs, NJ*, 26.
- Sabouret, N. (2009). *Interactions sur le fonctionnement dans les systèmes multi-agents ouverts et hétérogènes*. (Thèse de doctorat).
- Sadowski, J. et Bendor, R. (2019). Selling smartness : Corporate narratives and the smart city as a sociotechnical imaginary. *Science, Technology, & Human Values*, 44(3), 540–563.
- Saleh, I. (2017). Les enjeux et les défis de l’internet des objets (ido). *Internet des objets*, 1(1), 5.
- Saleh, I. (2018). Internet des objets (ido) : Concepts, enjeux, défis et perspectives. *Revue Internet des objets*, 2(10.21494).
- Sanchez, L., Galache, J. A., Gutierrez, V., Hernandez, J. M., Bernat, J., Gluhak, A. et Garcia, T. (2011). Smartsantander : The meeting point between future internet research and experimentation and the smart cities. Dans *2011 Future Network & Mobile Summit*, 1–8. IEEE.
- Sautory, O. (2010). Journée d’études sur la représentativité. *ENS Paris*.
- Savaglio, C., Fortino, G. et Zhou, M. (2016). Towards interoperable, cognitive and autonomic iot systems : An agent-based approach. Dans *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 58–63. IEEE.
- Scuotto, V., Ferraris, A. et Bresciani, S. (2016). Internet of things : Applications and challenges in smart cities : a case study of ibm smart city projects. *Business Process Management Journal*.

- Searle, J. R. (1969). *Speech acts : An essay in the philosophy of language*, volume 626. Cambridge university press.
- Séguaran, M. (2004). Résolution de conflits sémantiques dans les systèmes d'information coopératifs : proposition d'un modèle d'interaction entre agents. Dans *INFORSID*, 231–247.
- Seydoux, N., Ben Alaya, M., Hernandez, N., Monteil, T. et Haemmerlé, O. (2015). Sémantique et internet des objets : d'un état de l'art à une ontologie modulaire.
- Shannon, R. E. (1975). simulation ; the art and science.
- Shehory, O. et Sturm, A. (2001). Evaluation of modeling techniques for agent-based systems. Dans *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, 624–631.
- Soldatos, J., Kefalakis, N., Hauswirth, M., Serrano, M., Calbimonte, J.-P., Riahi, M., Aberer, K., Jayaraman, P. P., Zaslavsky, A., Zarko, I. P. *et al.* (2015). Openiot : Open source internet-of-things in the cloud. In *Interoperability and open-source solutions for the internet of things* 13–25. Springer.
- Soma Bandyopadhyay, Munmun Sengupta, S. M. et Dutta, S. (2011). Role of middleware for internet of things : A study. Dans *International Journal of Computer Science Engineering Survey (IJCSSES) Vol.2, No.3,* 230–235. IEEE.
- Sperber, D. et Wilson, D. (1986). *Relevance : Communication and cognition*, volume 142. Citeseer.
- Stergiou, C., Psannis, K. E., Kim, B.-G. et Gupta, B. (2018). Secure integration of iot and cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 78, 964–975.
- Stergiou, C. L. et Psannis, K. E. (2022). Digital twin intelligent system for industrial iot-based big data management and analysis in cloud. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 4(4), 279–291.
- Taillandier, P., Therond, O. et Gaudou, B. (2012). Une architecture d'agent bdi basée sur la théorie des fonctions de croyance : application à la simulation du comportement des agriculteurs. Dans *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, 107–116. Cépadués.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y. et Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935–3953.
- Tillé, Y. (2001). Théorie des sondages. *Dunod, Paris*, 13, 23–26.
- Van De Vijssel, M. et Anderson, J. (2004). Coalition formation in multi-agent

- systems under real-world conditions. *Proceedings of association for the advancement of artificial intelligence*.
- Vercouter, L. (2001). A distributed approach to design open multi-agent systems. Dans *International Workshop on Engineering Societies in the Agents World*, 25–38. Springer.
- Vygotsky, L. S. et Cole, M. (1978). *Mind in society : Development of higher psychological processes*. Harvard university press.
- Weiser, M. (1991). the computer for the 21st century, • h scientific american, vol. 265, no. 3.
- Weiser, M., Gold, R. et Brown, J. S. (1999). The origins of ubiquitous computing research at parc in the late 1980s. *IBM systems journal*, 38(4), 693–696.
- Weiss, G. (1999). *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT press.
- Weyns, D. et Parunak, H. V. D. (2005). *Environments for Multi-Agent Systems : First International Workshop, E4MAS, 2004, New York, NY, July 19, 2004, Revised Selected Papers*, volume 1. Springer.
- Wooldridge, M. et Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : Theory and practice. *The knowledge engineering review*, 10(2), 115–152.
- YOUNES, M., CHEN, B., KRYSZANOWSKI, M. et VAN LEEUWEN, F. (1997). La politique de l’oms. *Science et décision en santé environnementale*, p. 197.
- Yu, H., Shen, Z. et Leung, C. (2013). From internet of things to internet of agents. Dans *2013 IEEE international conference on green computing and communications and IEEE Internet of Things and IEEE cyber, physical and social computing*, 1054–1057. IEEE.
- Zambonelli, F., Jennings, N. R. et Wooldridge, M. (2001). Organisational rules as an abstraction for the analysis and design of multi-agent systems. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 11(03), 303–328.
- Zheng, X., Psarommatis, F., Petralli, P., Turrin, C., Lu, J. et Kiritsis, D. (2020). A quality-oriented digital twin modelling method for manufacturing processes based on a multi-agent architecture. *Procedia Manufacturing*, 51, 309–315.
- Zouaq, A. et Nkambou, R. (2008). Building domain ontologies from text for educational purposes. *IEEE Transactions on learning technologies*, 1(1), 49–62.