



THESE DE DOCTORAT

Spécialité
INFORMATIQUE

(Ecole Doctorale Sciences et Technologies, UGB)

VERS UN SYSTEME DE GESTION DES CONNAISSANCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Présentée par

M. Ibrahima DIOP

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ GASTON BERGER

Soutenue le 15 mars 2014

Devant le jury composé de :

Examineurs

Cheikh Talibouya DIOP, Maitre de conférences, Université Gaston Berger (**Président jury**)

Ousmane SALL, Maitre de conférences, Université de Thiès

Jean Marie DEMBELE, Chargé d'enseignements, Université Gaston Berger

Adrien COLY, Chargé d'enseignements, Université Gaston Berger

Rapporteurs

Amadou COULIBALY, Maitre de conférences HDR, INSA Strasbourg (France)

Yahya SLIMANI, Professeur, Université de Tunis (Tunisie)

Directeur de thèse

Moussa LO, Maitre de conférences, Université Gaston Berger

Et Il apprit à Adam tous les noms,...

[Coran, sourate - La vache, verset 31]

Je dédie ce travail à ma femme.

Remerciements

Je remercie Monsieur **Moussa LO** pour avoir dirigé ma thèse. Ses critiques constructives ont été d'un apport déterminant, pour l'aboutissement de ma thèse.

Je remercie Messieurs **Amadou COULIBALY** de l'INSA Strasbourg et **Yahya SLIMANI**, de l'Université de Tunis d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse.

Je remercie Monsieur **Adrien COLY** gestionnaire du projet CLUVA de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis pour m'avoir accepté dans son équipe-projet et pour avoir participer au jury de ma thèse.

Je remercie également Messieurs **Cheikh Talibouya DIOP**, **Ousmane SALL** et **Jean Marie Dembele** d'avoir accepté de participer au jury de ma thèse.

Je remercie mes collègues informaticiens du LANI : **Cheikh, Gaoussou, Yaya, Saliou, Apo** pour leur soutien qui m'a facilité la compréhension de la problématique du changement climatique.

Je remercie mes collègues géographes et mathématiciens de CLUVA : **Abou, Faustin, Jule, Mariétou, Marème, Fatima, Timack** et **Oumar** pour leur soutien, qui m'a facilité la compréhension de la problématique du changement climatique.

Je remercie également l'assistante de l'équipe-Projet CLUVA Saint-Louis, **Amina**.

Je remercie tout le personnel **enseignant et administratif** de l'UFR SAT pour avoir participé et organisé ma soutenance de thèse.

Je remercie **mes parents, ma femme** et **mes amis** pour leur compréhension et leur patience.

Résumé

Les conséquences néfastes du changement climatique justifient l'intérêt des politiques et des scientifiques sur cette question. Le changement climatique constitue ainsi un domaine multidisciplinaire et complexe, au carrefour de plusieurs disciplines interdépendantes (la climatologie, l'urbanisme, la gouvernance des risques, etc.) et faisant intervenir plusieurs acteurs humains et institutionnels de spécialités différentes. Ces derniers doivent, entre autres, communiquer, partager et intégrer leurs connaissances pour mieux jouer leurs rôles.

Dans le domaine du changement climatique, la connaissance occupe une place stratégique dans la lutte contre les risques et les catastrophes. Par conséquent dans la gouvernance (la gestion et la prévention) des risques et des catastrophes climatiques, le manque de connaissances des populations ou des décideurs est considéré comme une cause de l'augmentation des conséquences de ces changements.

Les travaux de cette thèse se situent dans ce contexte du changement climatique et se donnent pour objectif de proposer un système de gestion des connaissances (SGC) de ce domaine du changement climatique, en partenariat avec le projet CLUVA¹ (CLimate Change and Urban Vulnerability in Africa) qui a pour objectif global de développer des méthodes et des connaissances pour la gestion des risques, la réduction de la vulnérabilité et l'amélioration de la capacité d'adaptation et de la résilience des villes africaines face aux changements climatiques.

Nos contributions sont :

- une architecture d'un SGC pour la représentation et l'évolution des connaissances, le catalogage et la recherche sémantique de ressources, la simulation multi-agent sémantique, l'intégration des ressources et l'aide à la décision. Cette architecture est la contribution générale de cette thèse. Les autres contributions sont spécifiques aux modules du SGC ;
- la construction d'un patron de conception d'ontologies du changement climatique, nommée *OntoCLUVA*. L'originalité de ce travail est la considération des caractéristiques multidisciplinaires et complexes de ce domaine pour la construction de ce patron de conception d'ontologies ;
- une architecture d'un système multi-agent (SMA) sémantique permettant aux agents, dans la simulation des systèmes complexes du domaine CC, d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement pour leurs comportements et leurs communications ;
- une spécification et une implémentation dans le cadre du projet CLUVA d'un catalogue de ressources de partenaires du changement climatique, nommé *Catalog2C*, permettant la description des ressources de partenaires, la recherche sémantique de ces ressources et l'évolution des connaissances utilisées ;
- une spécification et une implémentation dans le cadre du projet CLUVA d'un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique, nommé *SimSem2C*, basé sur l'architecture d'un SMA sémantique, que nous avons proposé.

¹CLUVA en français : Vulnérabilité des cités africaines aux changements climatiques, site web : www.duva.eu, projet soutenu par l'Union Européenne dans le cadre du FP7-ENV-2010.

Abstract

The harmful consequences of climate change justify the interest politicians and scientists have in this issue. Climate change is a multidisciplinary and complex field at the crossroads of several interrelated disciplines (climatology, urban planning, risks governance, etc...) and involving several human and institutional actors of different specialties. These actors must, among other things, communicate, share and integrate their knowledge to better play their roles.

In the field of climate change, knowledge plays a strategic role in fighting against risks and disasters. Therefore, in the governance (management and prevention) of climate risks and disasters, people's or decision makers' lack of knowledge is considered as a cause to the increase of these changes consequences.

The works of this thesis revolve around this context of climate change. They aim at providing a knowledge management system (KMA) of the field of climate change, in partnership with the CLUVA² (Climate Change and Urban Vulnerability in Africa) project which general objective is to develop methods and knowledge for the management of risks, the reduction of vulnerability and the enhancement of adaptive capacity and resilience of African cities to climate change.

Our contributions are:

- an architecture of a knowledge management system (KMA) for the representation and the evolution of knowledge, the cataloging and semantic search of resources, the multi-agent semantic simulation, the integration of resources, and for helping at decision making. This architecture is the overall contribution of this thesis. The other contributions are specific to the KMA modules ;
- the construction of an ontology design pattern of the climate change, called OntoCLUVA. The originality of this work lies in the consideration of the multidisciplinary and complex characteristics of the field main of climate change for the construction of this pattern ;
- an architecture of a semantic multi-agent system (SMAS) allowing agents, in the simulation of complex systems, to have access to the knowledge of the field of their environment for their behaviors and communications ;
- a specification and an implementation, within the CLUVA project, of a catalog of resources of climate change partners, named Catalog2C, allowing the description of resources, the semantic search of partners resources, and the evolution of used knowledge;
- a specification and an implementation, within the CLUVA project, of a semantic simulator of climate change complex systems, named SimSem2C, based on the architecture of a semantic SMA.

² Web site: www.cluva.eu

Sommaire

Chapitre 1 : Introduction générale	14
1.1 Contexte applicatif	16
1.2 Contexte scientifique	17
1.2.1 La gestion des connaissances	17
1.2.2 La simulation multi-agent	18
1.3 Problématique et questions de recherche	19
1.4 Contributions	23
1.5 Organisation du manuscrit	24
1.5.1 Partie I : Etat de l'art.....	24
1.5.2 Partie II : Contributions de la thèse.....	25
Chapitre 2 : Le changement climatique	30
2.1 Les généralités	32
2.1.1 Les Gaz à Effet de Serre (GES) et l'effet de serre naturel	32
2.1.2 Conséquences du changement climatique	35
2.1.3 Gouvernance.....	36
2.2 Multidisciplinarité et complexité du changement climatique	37
2.3 Les besoins de partager et d'intégrer les connaissances et les ressources	38
2.4 Les systèmes complexes pour l'atténuation et l'adaptation aux effets et impacts du changement climatique	39
2.4.1 Atténuation des conséquences.....	40
2.4.2 Adaptation au changement climatique	41
2.5 Conclusion	42
Chapitre 3 : La gestion des connaissances.....	43
3.1 Définitions des bases de la gestion des connaissances	43
3.2 Les enjeux de la gestion des connaissances dans les organisations	44
3.3 Les ontologies pour la représentation des connaissances	45
3.3.1 Les ontologies	45
3.3.2 Types d'ontologies.....	46
3.3.3 Méthodologies de construction d'ontologie	47

3.3.4 La gestion des changements des ontologies	52
3.4 Le web sémantique.....	54
3.4.1 Web sémantique d'entreprise ou organisationnel	54
3.4.2 Langages du web sémantique	55
3.4.3 Recherche sémantique	57
3.5 Conclusion.....	60
Chapitre 4 : Les ontologies et la simulation multi-agent.....	61
4.1 Les systèmes multi-agents.....	62
4.1.1 Les dimensions d'un SMA.....	62
4.1.2 Les applications des SMA	64
4.1.3 Plateformes de développement de systèmes multi-agents.....	67
4.2 La simulation multi-agent.....	69
4.3 Les ontologies dans les systèmes multi-agents et la simulation multi-agent des systèmes complexes.....	71
4.4 Conclusion.....	72
Chapitre 5 : Architecture d'un système de gestion des connaissances du changement climatique	75
5.1 Architecture générale et fonctionnelle.....	76
5.2 Conclusion.....	82
Chapitre 6 : Un patron de conception d'ontologies du changement climatique.....	83
6.1 La construction du patron	84
6.2 La phase de spécification	85
6.2.1 Groupe organisateur	85
6.2.2 Description des besoins motivant la création de ce patron.....	85
6.2.3 Découpage en sous domaines et identification des canaux de communications entre les sous domaines	86
6.2.4 Questionnaire de compétences.....	87
6.2.5 Détermination des experts de chaque sous domaine et des experts canaux.....	88
6.2.6 Consensus de conceptualisation et d'intégration.....	89
6.3 Phase d'acquisition des connaissances	91
6.3.1 Acquisition des connaissances dans la phase de spécification.....	91
6.3.2 Acquisition des connaissances dans la phase de conceptualisation.....	91
6.3.3 Acquisition des connaissances dans la phase d'intégration.....	92
6.3.4 Acquisition des connaissances dans les phases de formalisation et d'implémentation	92
6.4 Les autres phases.....	93
6.4.1 Phase de conceptualisation des sous domaines.....	93

6.4.2 Phase d'Intégration des conceptualisations des sous domaines.....	94
6.4.3 Les phases de formalisation et d'implémentation.....	95
6.4.4 La phase de documentation.....	96
6.5 Méthodologie de construction d'ontologies du changement climatique	97
6.6 Conclusion.....	99
Chapitre 7 : Catalogue de ressources de partenaires dans le domaine du changement climatique ..	100
7.1 L'architecture de Catalog2C.....	101
7.2 Hypothèse de recherche sémantique et de maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C	103
7.3 Distance et Recherche sémantique dans Catalog2C	105
7.3.1 Distance entre les labels d'une hiérarchie de concepts.....	106
7.3.2 Distance entre les mots clés des ressources d'un domaine.....	108
7.3.3 Recherche sémantique dans Catalog2C.....	109
7.4 Maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C	111
7.5 Conclusion.....	113
Chapitre 8 : La simulation multi-agent sémantique des systèmes complexes : Ajout d'une dimension ontologique pour la représentation sémantique de l'environnement.....	115
8.1 Une architecture de système multi-agent sémantique.....	116
8.1.1 Agent ciel sémantique : une couche sémantique de l'environnement.....	117
8.1.2 Les agents sémantiques	118
8.2 Les comportements des agents d'un SMA sémantique	119
8.2.1 Les comportements de l'agent ciel sémantique.....	119
8.2.2 Les comportements des agents sémantiques	121
8.3 Les communications entre les agents.....	123
8.4 Discussion.....	124
8.5 Conclusion.....	128
Chapitre 9 : Un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique	130
9.1 Les niveaux des éléments de l'architecture du SMA sémantique.....	131
9.2 Les éléments génériques du simulateur sémantique SimSem2C	133
9.2.1 Les connaissances génériques du domaine de l'environnement des agents.....	133
9.2.2 Formalismes de représentation des connaissances et Moteur d'inférence et de recherche sémantique.....	136
9.2.3 Les communications et les comportements génériques de l'agent ciel sémantique et de l'agent sémantique abstrait.....	137

9.3 Les éléments spécifiques à un modèle dans SimSem2C ; cas du modèle du principe du pollueur payeur.....	137
9.3.1 Description du modèle du principe du pollueur payeur	138
9.3.2 Les connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur	141
9.3.3 Les agents sémantiques pour pollueur payeur.....	145
9.4. Conclusion.....	147
Chapitre 10 : Les prototypes Catalog2C et SimSem2C dans le cadre du projet CLUVA.....	148
10.1 Le projet CLUVA	148
10.2 Catalog2C pour CLUVA.....	152
10.2.1 La description des ressources de partenaires	153
10.2.2 Recherche sémantique.....	155
10.2.3 Maintenance de l'ontologie du CC	158
10.3 SimSem2C pour CLUVA- La simulation du principe du pollueur payeur.....	164
10.3.1 La saisie des conditions initiales.....	164
10.3.2 Le déroulement de la simulation.....	166
10.3.3 Résultats de la simulation.....	167
10.3.4 Visualisation des résultats	168
10.4 Conclusion	172
Conclusion générale.....	173
Bilan	175
Revue des questions de recherche	176
Perspectives.....	179
Références	182
Annexes.....	191

Liste des figures

Figure 1 : Discussion entre deux experts du domaine des risques.....	15
Figure 2 : Les relations entre les chapitres du manuscrit	27
Figure 3: Illustration du mécanisme d'échange de quotas d'émission entre deux sociétés.....	41
Figure 4: illustration de l'extraction des connaissances à partir de documents.....	48
Figure 5 : Décomposition verticale et horizontale d'une ontologie modulaire	49
Figure 6: illustration d'un patron de conception d'ontologies.....	50
Figure 7 : Vue d'ensemble de la méthodologie NeOn [58].....	52
Figure 8 : La pile ou pyramide des langages du web sémantique	56
Figure 9 : La distance sémantique entre deux concepts d'une hiérarchie	60
Figure 10: L'approche Voyelles.....	63
Figure 11: Interaction entre un agent et son environnement.....	64
Figure 12 : Une classification des différents types d'application des systèmes multi-agents	65
Figure 13: Pyramide des contributions sur le SGC du changement climatique	80
Figure 14 : les couches du système de gestion des connaissances du changement climatique.....	81
Figure 15 : Architecture générale et fonctionnelle d'un SGC du CC.	82
Figure 16 : Réseau de sous domaines du domaine du changement climatique.....	87
Figure 17 : Affectations des experts aux sous domaines et canaux de communications	89
Figure 18 : processus d'acquisition des connaissances.....	93
Figure 19 : illustration de la conceptualisation d'un sous domaine	94
Figure 20 : Alignement des deux concepts.....	95
Figure 21 : Extrait d'OntoCLUVA	96
Figure 22: Méthodologie de construction d'ontologie du CC à partir OntoCLUVA.....	97
Figure 23 Cycle de vie de l'ontologie noyau du domaine du changement climatique	98
Figure 24 : Architecture du Catalog2C	103
Figure 25 : illustration que les mots clés sont les labels de concepts de l'ontologie de ce domaine....	104
Figure 26 : Voisinage du mot clé risque.....	105
Figure 27 : Espace OntoCLUVA et métrique pour évaluer la distance sémantique.....	107
Figure 28 : Le voisinage du mot clé paramètre de la recherche.....	110
Figure 29 : La recherche de ressources qui ont un mot clé risque ou un voisin de risque	110
Figure 30: Architecture d'un système multi-agent sémantique.....	117
Figure 31: Architecture de l'agent sémantique	119
Figure 32: Diagrammes d'activités de l'agent ciel sémantique	121

Figure 33: Les diagrammes d'activités d'un agent sémantique	122
Figure 34 : illustration de la communication d'humanisation.....	123
Figure 35 : illustration de la communication naturelle entre deux agents sémantiques.	123
Figure 36 : illustration de la communication d'enregistrement.....	124
Figure 37 : Abstraction du système multi-agent sémantique en son agent ciel sémantique	126
Figure 38 : communication entre deux agents de deux systèmes multi-agents.....	127
Figure 39 : différentes architectures possibles pour la conception d'un SMA sémantique	128
Figure 40 : la décomposition des éléments de l'architecture du SMA sémantique.	132
Figure 41 : Extrait de l'ontologie conceptuelle OntoCLUVA	134
Figure 42: illustration de l'ajout de la relation de composition.....	135
Figure 43 : Pyramide des connaissances génériques du domaine changement climatique.	136
Figure 44 : Système Multi-agent (SMA) sémantique pollueur payeur 1	139
Figure 45: Système Multi-agent (SMA) sémantique pollueur payeur 2	140
Figure 46 : Un Extrait de connaissances génériques et spécifiques	142
Figure 47: Extrait base de faits conditions initiales : agents S1 et L1 à l'instant t0.	143
Figure 48 : Extrait base de faits résultats simulation	143
Figure 49: Le contenu de l'agent ciel sémantique du phénomène pollueur payeur.....	144
Figure 50 : Les agents sémantiques du principe du pollueur payeur	145
Figure 51 : les communications naturelles entre les agents sémantiques.	146
Figure 52: La carte des cinq villes sélectionnées pour servir de cas d'étude.....	150
Figure 53 : Page d'accueil de Catalog2C - CLUVA	153
Figure 54 : les formulaires d'ajout de partenaires et des descriptions	154
Figure 55 : Base de faits CatalogCLUVA.rdf ouverte dans l'éditeur PSPad.....	154
Figure 56 : Nuage de mots clés (Tag Cloud) à partir des connaissances du domaine du CC.....	155
Figure 57 : Les résultats correspondant à la navigation en appuyant sur le mot clé "Risque (6)"	156
Figure 58 : Résultats de la recherche de ressources par mot clé sur "risque"	157
Figure 59 : Navigation en passant par le partenaire LANI.....	157
Figure 60 : Navigation en passant par le modèle « modeleAdaptation » du partenaire LANI.....	158
Figure 61 : Tableau de statistiques d'utilisation des labels des concepts l'ontologie du CC	158
Figure 62 : Statistiques d'utilisation des mots clés dans Catalog2C.....	159
Figure 63 : formulaire pour ajouter de nouveaux labels.....	160
Figure 64 : Formulaire d'ajout de concept.....	160
Figure 65 : Une suite du tableau de statistiques (Figure 61).....	161
Figure 66 : Formulaire de modification d'un concept.....	162
Figure 67 : Formulaire d'ajout de relation.....	163
Figure 68 : Statistiques d'utilisation des mots clés dans Catalog2C.....	163
Figure 69: La saisie de conditions initiales.....	165

Figure 70 : Fenêtre pour la saisie de la durée de la simulation	165
Figure 71 : Fenêtre affichant les conditions initiales saisies.....	166
Figure 72 : Fenêtre montrant le déroulement de la simulation.....	167
Figure 73 : Fenêtre montrant les résultats de la simulation	168
Figure 74 : Demande de visualisation du comportement des Sociétés émettrices de Méthane	170
Figure 75 : Etat des Sociétés émettrices de Méthane à la période $t = 5$	170
Figure 76 : Etat des Sociétés émettrices de Méthane à la période $t = 20$	170
Figure 77 : Demande de visualisation du comportement des Sociétés	171
Figure 78 : Etat des Sociétés émettrices de CO ₂ à la période $t = 6$	171
Figure 79 : Etat des Sociétés émettrices de CO ₂ à la période $t = 20$	171
Figure 80 : Utilisation de Catalog2C par les partenaires du projet CLUVA.....	180

Chapitre 1

Introduction générale

La connaissance occupe une place importante dans la communication et le comportement humain. Pour mieux voir cette dimension de la connaissance, observons la Figure 1 suivante. Elle représente deux situations de la discussion entre deux personnes P1 et P2 expertes sur les risques relatifs au changement climatique. Ces deux personnes partagent les connaissances de ce domaine dont un extrait est dans le cercle à droite de la Figure 1.

Situation 1 : P1 pose la question (1) : « Quelles sont les zones à risque à Saint-Louis ? ». P2 répond par (2) : « Les zones inondables sont : Darou et Sor et les zones exposées à l'avancée de la mer sont : Hydrobase et Guet Ndar ». Dans cette réponse notée (2), P2 ne répond pas par "les zones à risque sont...". Mais, il répond par "les zones inondables sont..." et "les zones exposées à l'avancée de la mer sont...". En regardant dans le cercle de la Figure 1 contenant les connaissances, on se rend compte que P2 n'a pas tort car "Inondation" et "Avancée de la mer" sont des sous-concepts (sous-types) de "Risque". Cette situation 1 montre la place de la connaissance dans cette communication entre P1 et P2.

Situation 2 : P1, après avoir reçu la réponse notée (2) de P2 (les zones inondables et les zones exposées à l'avancée de la mer) prend la décision de ne pas s'installer dans les zones à risque d'inondation. Dans les connaissances partagées par P1 et P2, "Inondation" a une relation "causer" avec "Maladie" ce qui signifie que les risques d'inondations peuvent causer des risques de maladies. La situation 2 montre que la connaissance a aussi pris place dans la décision de P1: ce qui pourrait déterminer le comportement de P1 dans un avenir proche.

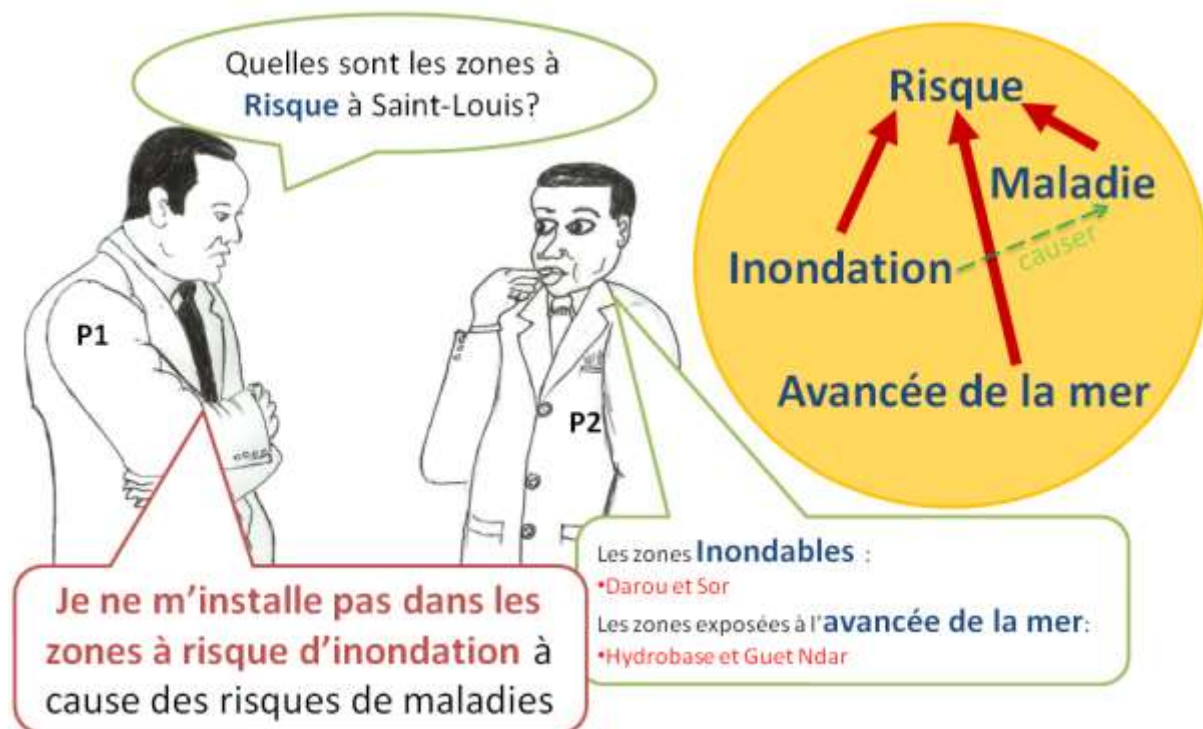


Figure 1 : Discussion entre deux experts du domaine des risques relatifs au changement climatique. Une illustration de la connaissance dans la communication et le comportement des agents dans les systèmes complexes des sciences de l'homme et de la vie relatives aux changements climatiques comme l'adaptation, la résilience, le principe du pollueur payeur, etc.

Cette importance de la connaissance dans la communication et dans le comportement humain a poussé les organisations à une économie de l'immatériel où le capital tend de plus en plus à devenir un capital de savoir et de savoir-faire, un capital de connaissances. Ainsi, la gestion des connaissances est un grand défi pour ces organisations. Elle permet, entre autres, aux ordinateurs (machines) et aux personnes d'accéder aux connaissances de leur domaine pour mieux communiquer et mieux se comporter afin d'atteindre les objectifs de ces organisations.

Dans la gouvernance des risques et des catastrophes, la connaissance occupe une place stratégique dans la lutte contre ces derniers. Ainsi, dans ce domaine, les experts étudient des systèmes pour l'adaptation, l'atténuation, la résilience, la diminution de la vulnérabilité, etc. Des systèmes devenus de plus en plus complexes dont leurs simulations ne peuvent laisser de côté cette place de la connaissance dans les communications et les comportements des entités autonomes : personnes, populations, organisations, etc.

De la discussion entre P1 et P2 (dans la Figure 1), montrant que le comportement des personnes peut être influencé par leurs connaissances seulement à un niveau ontologique (leurs connaissances des concepts et des relations entre les concepts), imaginons comment la simulation multi-agent peut nous permettre de comprendre ces modèles complexes des

sciences de l'homme et de la vie en se limitant aux quatre dimensions de l'approche Voyelles [40] suivantes : *agent, environnement, interaction et organisation* en ignorant jusque-là (à notre connaissance) une dimension *ontologique* ? C'est pourquoi, le défi est grand d'utiliser les connaissances du domaine de l'environnement des agents dans la simulation multi-agent de systèmes complexes de ce domaine.

Dans ce chapitre introductif, nous allons présenter d'abord le contexte applicatif, ensuite le contexte scientifique, suivi de la problématique puis des contributions et enfin de l'organisation du manuscrit.

1.1 Contexte applicatif

Le contexte applicatif de cette thèse est le domaine du changement climatique (CC), mais en partenariat avec le projet CLUVA³ (CLimate Change and UrbanVulnerability in Africa).

La Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC⁴) définit le changement climatique comme : « *un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui est, en plus de la variabilité naturelle du climat, observé sur des périodes comparables.* » [34].

Pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC⁵), le changement climatique est défini comme : « *un changement dans l'état du climat, qui peut être identifié (par exemple en utilisant des tests statistiques) par des changements dans la moyenne et / ou la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, généralement pendant des décennies, voire plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.* » [34]. Cette définition du GIEC prend en compte les deux positions des experts sur les causes des changements climatiques.

³CLUVA en français : Vulnérabilité des cités africaines aux changements climatiques, site web : www.cluva.eu

⁴CCNUCC est la convention adoptée le 9 mai 1992 à New York et signée par plus de 150 pays et par la Communauté européenne lors du Sommet Planète Terre, qui s'est tenu à Rio de Janeiro en 1992. Son objectif ultime est de «stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique». Elle contient des engagements pour toutes les Parties. Aux termes de la Convention, les Parties figurant à l'annexe I doivent s'employer à ramener en 2000 les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal à leurs niveaux de 1990. La Convention est entrée en vigueur en mars 1994. [Source : Glossaire du rapport du GIEC 2001[34]]

⁵GIEC, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat a été formé en 1988 conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il est chargé d'évaluer les informations disponibles portant sur la science, les incidences et les aspects économiques de l'évolution du climat ainsi que les possibilités d'adaptation aux changements climatiques et les moyens d'atténuer leurs effets [32].

Ces conséquences actuelles et futures du changement climatique justifient l'intérêt que les politiques et les scientifiques mettent sur cette question qui fait du changement climatique un domaine multidisciplinaire et complexe, c'est-à-dire étudié en sous domaines interdépendants par plusieurs disciplines.

Dans la gouvernance des risques, c'est-à-dire la gestion et la prévention des risques climatiques, le manque de connaissances des populations ou des entreprises est considéré comme cause de l'augmentation des conséquences de ces changements. Certains de ces travaux dans la gouvernance des risques s'intéressent à l'adaptabilité des populations face aux risques, à la résilience des populations, au principe du pollueur payeur - qui veut mettre fin à la gratuité des émissions des gaz à effet de serre - et à d'autres problématiques où la connaissance prend une place importante. Ainsi, les modèles du changement climatique sont devenus plus complexes faisant interagir des personnes, des institutions ou entreprises qui sont des entités autonomes influencées dans leurs communications et leurs comportements par les connaissances de leur environnement.

Malgré que l'Afrique soit considérée comme l'un des continents les plus vulnérables au changement climatique et à la variabilité climatique par le GIEC, l'impact réel du changement climatique en Afrique, notamment à l'échelle locale, est encore mal compris [68]. Ainsi, c'est pour la compréhension des risques climatiques et de la vulnérabilité des systèmes urbains africains face à ces risques qu'intervient le projet CLUVA, projet soutenu par l'Union Européenne dans le cadre du FP7-ENV-2010.

Dans son cadre d'étude constitué de cinq (5) villes africaines, le projet CLUVA avec ses treize (13) partenaires internationaux a pour objectif global de développer des méthodes et des connaissances pour la gestion des risques, la réduction de la vulnérabilité et l'amélioration de la capacité d'adaptation et de la résilience des villes africaines face aux changements climatiques.

La partie qui suit présente le contexte scientifique de la thèse.

1.2 Contexte scientifique

Le contexte scientifique de cette thèse est la gestion des connaissances et la simulation multi-agent pour des systèmes complexes.

1.2.1 La gestion des connaissances

L'économie actuelle est dominée par les échanges de savoir et par la production de connaissances; on parle d'économie de l'immatériel [93]. Dans cette économie, le capital tend

de plus en plus à devenir un capital de savoir et de savoir-faire, un capital de connaissances. Sa gestion devient un des impératifs majeurs de toute réflexion prospective et stratégique au sein d'une organisation [93].

La gestion des connaissances est l'ensemble des méthodes et des techniques permettant de percevoir, d'identifier, d'analyser, d'organiser, de mémoriser et de partager des connaissances entre les membres des entreprises ou des organisations [wikipédia, (date de consultation : 15/01/2014)].

Pour la gestion des connaissances, une étape importante est la représentation des connaissances avant leur utilisation et leur maintenance. La représentation des connaissances permet de passer de l'expression linguistique des connaissances, telles que nous autres humains pouvons les considérer, à une représentation formelle et calculable des connaissances, propres à une exploitation informatique [9].

L'ingénierie des connaissances est la discipline qui se charge de modéliser un problème ou une tâche de manière à obtenir une représentation formelle. Pour cela, elle fait appel aux ontologies définies par [78] comme une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée.

Après la représentation des connaissances une autre étape est l'utilisation de ces connaissances. L'avènement du web sémantique, qui est l'utilisation de connaissances par le web, marque une étape importante dans l'utilisation des ontologies. De nombreuses ontologies sont construites avec des méthodologies différentes.

Les ontologies comme les connaissances qu'elles représentent doivent évoluer dans leur contexte d'utilisation. Dans la gestion des connaissances, les travaux sur la représentation et l'utilisation des connaissances ont attiré plus l'attention des recherches que ceux sur l'évolution des ontologies.

1.2.2 La simulation multi-agent

La simulation est définie dans [6] comme la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues.

Il existe plusieurs approches pour la simulation des modèles. On peut en citer les approches analogique, numérique et multi-agent.

L'approche de simulation multi-agent est une application des systèmes multi-agents (SMA) qui se situent à l'intersection entre l'intelligence artificielle distribuée (IAD) et la vie

artificielle. Elle a été proposée dans le contexte de la simulation de systèmes complexes ne résultant pas d'un calcul effectué par un programme monolithique, mais des interactions entre plusieurs entités autonomes [47].

Des travaux récents sur les SMA donnent de plus en plus une place aux ontologies qui sont une représentation des connaissances, mais cette place est surtout consacrée à l'identification des agents [8], communication entre les agents pour l'intégration de systèmes [25], pour la modélisation [55] et pour le déploiement de SMA [17]. Ces travaux ne permettent pas à la simulation multi-agents d'accéder aux connaissances du domaine de l'environnement d'exécution des agents pour leurs communications et leurs comportements.

Nos recherches dans cette thèse, nous ont montré que d'une part, peu de travaux se sont intéressés à la gestion des connaissances, notamment par des ontologies, pour le changement climatique. Et d'autre part, les techniques classiques de simulations ne parviennent qu'à proposer des réponses limitées pour la simulation des systèmes complexes comme ceux du domaine du changement climatique, qui font interagir des entités autonomes (personnes, institutions) accédant aux connaissances du domaine de leur environnement dans leurs communications et dans leurs comportements.

1.3 Problématique et questions de recherche

L'objectif général de cette thèse est de contribuer à la gestion des connaissances du changement climatique, pour aller vers un système de gestion des connaissances (SGC) de ce domaine. Ce SGC est composé de plusieurs modules. Chaque module a un besoin spécifique de connaissances du changement climatique, mais dans ces connaissances CC, il y a une partie, qui est partagée par tous les modules. Ainsi, nous pouvons définir les connaissances génériques du changement climatique pour le SGC comme suit :

Définition 1.1 : connaissances génériques du CC dans SGC

Les connaissances génériques du changement climatique (CC) sont les connaissances du CC partagées par tous les modules du système de gestion des connaissances (SGC), qui (les modules) ont pourtant des besoins différents de connaissances du domaine du changement climatique à cause des tâches différentes qu'elles ont dans ce SGC.

Les objectifs spécifiques sont d'abord la représentation des connaissances génériques en collaboration avec les experts du domaine du changement climatique (CC) dans le cadre du projet CLUVA ; ensuite l'utilisation et la maintenance de ces connaissances génériques pour le partage de descriptions de ressources, l'intégration et la simulation multi-agent de modèles

des systèmes complexes de ce domaine ; enfin la production d'un prototype pour la gestion des connaissances du changement climatique par les partenaires du projet CLUVA.

La représentation des connaissances génériques

Nous n'avons pas trouvé dans nos recherches des ressources ontologiques déjà existantes pour ce domaine. Ce que nous avons trouvé c'est plutôt un modèle conceptuel sur les risques et les catastrophes [18]. Ce modèle conceptuel n'est pas dans le contexte du changement climatique mais dans un contexte général de gestion des risques et des catastrophes. Il ne traite pas les risques et les catastrophes en fonction du changement climatique. Pour cela, nos recherches ont permis de représenter un patron de conception d'ontologie du domaine du changement climatique, qui est une ontologie générique contenant les connaissances génériques de ce domaine, pour gérer les besoins de connaissances différents des modules du SGC. L'originalité de ce travail de représentation des connaissances génériques portera sur la considération des caractéristiques multidisciplinaire et complexe de ce domaine pour la construction de ce patron de conception d'ontologies.

Utilisation et maintenance des connaissances génériques

Nous voulons aller vers un système de gestion des connaissances (SGC) du domaine du changement climatique. Ce SGC permet à des partenaires du changement climatique (voir Définition 1.2 suivante) de partager leurs connaissances dans ce domaine pour faciliter leurs communications, la gestion de leurs ressources, l'intégration de leurs ressources, la simulation de leurs modèles, etc.

Définition 1.2 : partenaires du changement climatique

Des partenaires du changement climatique sont des organisations ou des experts qui décident de travailler en collaboration sur des problématiques du changement climatique.

Ce SGC apporte comme originalité la simulation sémantique de systèmes complexes pour faire un pont entre les connaissances et la simulation multi-agents du changement climatique. Cela permettra aux agents dans la simulation d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement pour leurs communications et leurs comportements.

Un prototype

Un prototype de ce SGC du CC a été produit pour les treize (13) partenaires du CC associés dans le cadre du projet CLUVA.

Les recherches de cette thèse vont constituer un apport pour l'ingénierie ontologique mais aussi pour la simulation multi-agent des systèmes complexes. Elles doivent répondre aux questions de recherche suivantes :

Question 1 : Quelle architecture proposer pour un système de gestion des connaissances du changement climatique ?

Cette thèse doit répondre à cette question en proposant une architecture générale et fonctionnelle composée de plusieurs modules pour :

- la gestion des ressources de partenaires du changement climatique en disposant d'un catalogue de ressources permettant de connaître les ressources disponibles des partenaires et d'un système d'intégration des ressources ;
- la simulation sémantique de modèles de systèmes multi-agents permettant aux agents d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement dans leurs communications et leurs comportements ;
- et l'aide à la décision ;

Cette architecture est centrée sur les connaissances génériques du domaine du changement climatique.

Question 2 : Comment représenter les connaissances génériques du changement climatique en considérant que ce domaine est multidisciplinaire et complexe?

Pour cette question, il s'est agi de voir à partir des ressources disponibles (experts dans le projet CLUVA, ingénieurs de connaissances, sources de données et modèles, etc.) et des méthodologies et approches pour la construction d'ontologie du domaine de l'ingénierie des connaissances (IC), comment construire un patron de conception d'ontologie du domaine du CC en tenant compte de son caractère multidisciplinaire et complexe et de notre préoccupation de satisfaire les besoins différents de connaissances des modules du système de gestion des connaissances ?

Question 3 : Quelle architecture proposer pour cataloguer les ressources de partenaires du changement climatique ?

Nous voulons voir ici, quelle architecture il faut proposer pour permettre à des partenaires du CC distribués géographiquement et qui doivent collaborer, de décrire leurs ressources (données, modèles et expertises). Ce catalogue devra permettre la recherche sémantique de ressources à partir de ces descriptions des ressources des partenaires dans le catalogue et des connaissances du domaine du CC. Cette fonctionnalité de recherche sémantique devrait proposer la possibilité d'effectuer une recherche par la navigation sur les descriptions des ressources de partenaires et la recherche à partir d'un mot clé donné en entrée d'un formulaire de recherche. Ce catalogue devra permettre aussi la maintenance des connaissances du domaine du CC utilisées dans ce catalogue.

Question 4 : Quelle est la distance sémantique à formaliser, dans ce contexte du catalogue des ressources de partenaires du changement climatique, pour permettre la recherche sémantique dans ce dernier?

Pour permettre cette recherche sémantique de ressources de partenaires dans le catalogue, nous avons choisi comme espace l'ontologie du CC qui est construite à partir du patron d'ontologie du domaine du CC. Mais dans cette question, nous verrons la distance sémantique appliquée pour déterminer la proximité entre les mots clés dans les descriptions de ressources en passant par la proximité entre les labels des concepts de cette ontologie du CC.

Question 5 : Quelle architecture d'un système multi-agent (SMA) proposer pour permettre aux agents, dans la simulation multi-agent, d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement dans leurs communications et dans leurs comportements ?

Nous allons voir, avec cette question, comment compléter l'architecture classique d'un SMA qui a quatre dimensions : *agent*, *environnement*, *interaction* et *organisation* pour permettre aux agents dans la simulation multi-agent d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement et d'utiliser ces connaissances dans leurs communications et leurs comportements. Cette architecture sémantique devra proposer des perspectives d'intégration de modèles de SMA sémantique dans la simulation multi-agent.

Nous verrons aussi dans cette question comment appliquer l'architecture de SMA sémantique que nous proposerons dans le cadre d'un simulateur sémantique des modèles des systèmes complexes du changement climatique.

Question 6 : Comment assurer la maintenance de l'ontologie du domaine du CC dans chaque utilisation par un module du système de gestion des connaissances que nous proposons?

Les connaissances du domaine du CC sont très dynamiques. Dans cette question, nous allons voir comment faire la maintenance (évaluer afin de faire évoluer) de l'ontologie du CC dans le cadre de son utilisation par chaque module du système de gestion des connaissances. Pour cela nous allons voir d'abord, comment les statistiques sur l'utilisation ou non des concepts de l'ontologie dans la description des ressources pourraient-ils contribuer à l'évolution de cette ontologie du CC utilisée dans le catalogue de façon semi-automatique (car interviennent dans ce processus les experts). Ensuite, nous essayerons de montrer comment, avec le simulateur sémantique des modèles de ce domaine, faire évoluer l'ontologie du CC utilisée comme méta modèle dans ce contexte.

Pour ces questions de recherche, nous avons apporté des solutions. Dans la partie qui suit, nous présentons nos contributions de façon à résumer les solutions apportées à ces questions.

1.4 Contributions

Nos contributions portent essentiellement sur la réalisation d'un système de gestion des connaissances du changement climatique. Ce système de gestion des connaissances est centré sur un module de représentation des connaissances génériques. Il dispose aussi d'autres modules utilisant ces connaissances génériques pour satisfaire les besoins de cataloguer des ressources, de recherche sémantique, de simulation sémantique de systèmes complexes, d'intégration des données et des modèles et d'aide à la décision des utilisateurs disposant de ressources (sources données, modèles, expertises) hétérogènes, propriétaires et distribuées. Parmi ces modules, nous avons un module pour la maintenance des connaissances accessibles à des experts pour faire évoluer les connaissances du CC utilisées par chaque module dans son contexte.

Dans ce besoin de réaliser un SGC, nous avons contribué en :

- proposant une architecture d'un système de gestion des connaissances pour la représentation et l'évolution des connaissances, le catalogage et la recherche

sémantique de ressources, la simulation multi-agent sémantique, l'intégration des ressources et l'aide à la décision ;

- construisant un patron de conception d'ontologies du changement climatique nommé OntoCLUVA pour le SGC du CC [39] et [40] ;
- proposant un catalogue de ressources pour des partenaires du changement climatique, nommé Catalog2C permettant la description des ressources, la recherche sémantique de ressources de partenaires et la maintenance des connaissances du CC. Initialement les connaissances du CC utilisées dans ce catalogue sont représentées dans le patron OntoCLUVA ;
- proposant une architecture sémantique de système multi-agent (SMA) pour la prise en compte de la connaissance des agents de leur environnement dans la simulation des systèmes complexes en ajoutant une dimension ontologique dans les SMA [41];
- proposant un simulateur sémantique des systèmes complexes du changement climatique, nommé SimSem2C, basé sur cette architecture ;

Dans la section suivante, nous présentons l'organisation du manuscrit qui expose plus en détail les contributions de cette thèse.

1.5 Organisation du manuscrit

L'organisation de ce manuscrit s'articule autour de deux parties principales. Une première partie est consacrée à l'étude bibliographique abordant les différents champs de recherche qui rentrent dans le contexte des sujets que nous traitons dans cette thèse. La deuxième partie présente nos contributions qui visent principalement à apporter des solutions aux problèmes évoqués dans la section 1.3 de ce chapitre, relatifs à la gestion des connaissances du domaine du changement climatique.

1.5.1 Partie I : Etat de l'art

Le **chapitre 2 – Le changement climatique** – est un état de l'art sur le changement climatique. Il présente d'abord les généralités sur ce phénomène en revenant sur les causes du changement climatique comme les émissions des gaz à effet de serre, les conséquences de ces changements (l'augmentation des aléas, les risques et les catastrophes) et la gouvernance qui apporte des solutions à ces problèmes. Ensuite, il explique le besoin d'intégration et de partage des connaissances dans ce domaine. Ce chapitre se termine par les systèmes complexes du changement climatique (adaptation, atténuation, etc.) pour montrer le besoin de simulation sémantique de ces systèmes complexes.

Le **chapitre 3 – La gestion des connaissances** – présente un état de l’art partant sur la gestion des connaissances. Il définit dans un premier temps les bases de la gestion des connaissances (donnée, information, connaissance et compétence), ensuite il aborde les enjeux de la gestion des connaissances dans l’organisation, puis il explique les ontologies pour la représentation et l’évolution des connaissances. Enfin ce chapitre présente le web sémantique qui est une application de la gestion des connaissances pour le web.

Le **chapitre 4 – Les ontologies et la simulation multi-agent** – traite d’abord des systèmes multi-agents par leurs quatre dimensions décrites dans l’approche Voyelle [92], leurs applications et leurs plateformes de développement. Ensuite nous revenons sur l’application des SMA qui nous intéresse dans cette thèse : la simulation multi-agent. Nous terminons ce chapitre par la place des ontologies dans les SMA et particulièrement dans la simulation multi-agent.

2.5.2 Partie II : Contributions de la thèse

Le **chapitre 5 – Une architecture d’un système de gestion des connaissances du changement climatique** – présente l’architecture d’un système de gestion des connaissances du changement climatique qui permet le partage de descriptions de ressources (données, modèles, expertises, etc.) de partenaires, la simulation sémantique des modèles de systèmes complexes du changement climatique, l’intégration des données et des modèles et l’aide à la décision. Ce système est centré sur les connaissances du domaine du changement climatique qui sont représentées par le module de représentation des connaissances génériques et maintenues par le module de maintenance des connaissances.

Le **chapitre 6 – Un patron de conception d’ontologies du domaine multidisciplinaire et complexe du changement climatique** – présente la construction manuelle et collaborative d’un patron de conception d’ontologies (une ontologie noyau) nommé *OntoCLUVA* du domaine du changement climatique. Ce patron est construit pour les besoins de connaissances des modules, qui ont des tâches différentes, d’un système de gestion des connaissances (SGC) de ce domaine du changement climatique. Ainsi, il permettra à chaque module du SGC de partir d’une base générique pour construire de façon semi-automatique son ontologie de domaine du changement climatique pour ses tâches, consistant à découvrir et à adapter des composants d’ontologies.

Le **chapitre 7 – Un catalogue de ressources de partenaires dans le domaine du changement climatique** – présente notre travail sur la gestion des ressources de partenaires

du changement climatique par un catalogue de ressources, nommé Catalog2C. Ainsi, nous présentons dans ce chapitre l'architecture de Catalog2C, la recherche sémantique de ressources et la maintenance de l'ontologie du CC utilisée dans ce catalogue. Nous présentons aussi notre hypothèse (faisant le lien entre les mots clés utilisés dans les descriptions des ressources avec le vocabulaire du domaine du changement climatique) et une distance sémantique entre mots clés (qui est d'abord utilisée pour la recherche sémantique et, ensuite, pour découvrir et adapter des composants d'ontologie pour la maintenance).

Le chapitre 8 – La simulation multi-agent sémantique des systèmes complexes : Ajout d'une dimension ontologique pour la représentation sémantique de l'environnement – propose une architecture pour un système multi-agent sémantique pour la simulation dans lequel les agents peuvent accéder aux connaissances du domaine de leur environnement et utiliser ces connaissances dans leurs communications et dans leurs comportements. Cette architecture se fonde sur une théorie de modélisation prenant en compte les connaissances du domaine de l'environnement des agents dans la simulation multi-agent.

Le chapitre 9 – Un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique – présente un simulateur sémantique de modèles du domaine du CC, nommé SimSem2C. Celui-ci est fondé sur l'architecture d'un système multi-agent sémantique, présentée dans le chapitre précédent, dans lequel les agents peuvent accéder aux connaissances du domaine de leur environnement et utiliser ces connaissances dans leurs communications et dans leurs comportements. Ce chapitre décrit les éléments de l'architecture qui sont génériques pour les modèles du domaine du CC puis les éléments spécifiques à un modèle de système complexe de ce domaine. Pour illustrer ces derniers, nous prenons le modèle du principe du pollueur payeur comme exemple.

Le chapitre 10 – Les prototypes Catalog2C et SimSem2C dans le cadre du projet CLUVA – présente les prototypes de modules du système de gestion des connaissances du changement climatique qui sont Catalog2C et SimSem2C dans le cadre du projet CLUVA. Ainsi dans ce chapitre, nous présentons le projet CLUVA et son besoin spécifique d'utiliser ce système. Ensuite, nous présentons l'interface du Catalog2C et nous terminons par les captures pour présenter la simulation sémantique du modèle du principe du pollueur payeur dans SimSem2C.

La Figure 2 montre les relations entre les chapitres dans ce mémoire de thèse.

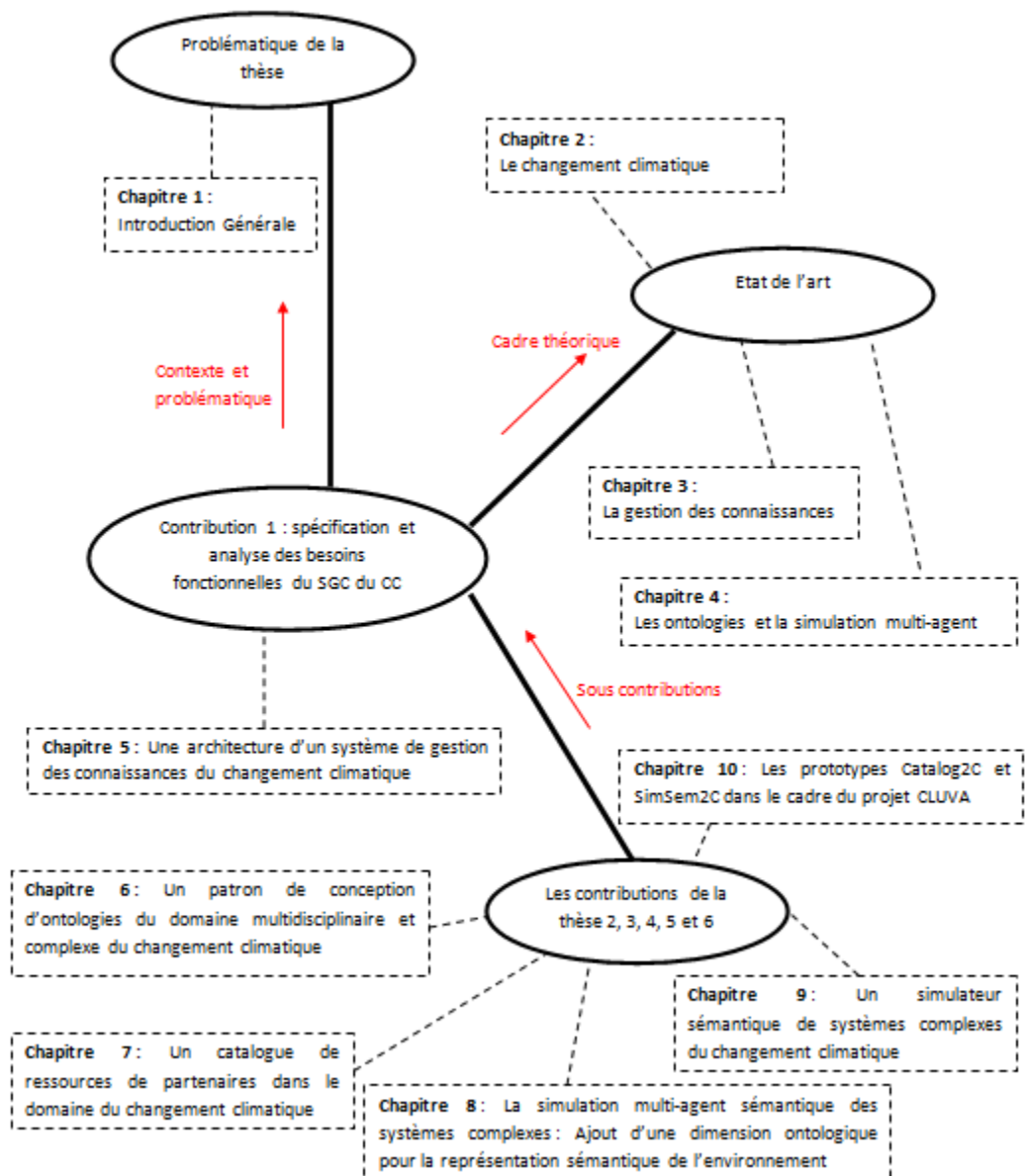


Figure 2 : Les relations entre les chapitres du manuscrit. Cela montre que les chapitres 6, 7, 8, 9 et 10 sont les sous contributions de la contribution présentée dans le chapitre 5, le chapitre central, qui est la réponse à la problématique (traitée dans le chapitre 1) dans le cadre théorique (présenté par les chapitres 2, 3 et 4).

Première partie

Etat de l'art

Chapitre 2

Le changement climatique

Nous commençons ce chapitre par le conte⁶ :

L'homme était assis seul...

... plongé dans une profonde tristesse.

Les animaux se sont rapprochés et ont dit : « Nous n'aimons pas te voir si triste. Demande ce que tu veux et tu l'auras ».

L'homme dit : « Je veux de bons yeux ».

Le vautour a répondu : « Tu auras les miens ».

Puis l'homme dit : « Je veux être fort ».

Le jaguar a dit : « Tu auras ma force ».

Puis l'homme dit : « Je veux connaître les secrets de la terre ».

Le serpent a répondu : « Je te les montrerai ».

Ainsi ont répondu tous les animaux.

Après avoir obtenu tous les dons qu'ils pouvaient lui donner, l'homme est parti.

Et le hibou a dit aux autres animaux : « Maintenant, l'homme sait tout et il peut faire beaucoup de choses... soudain, j'ai peur ».

Le chevreuil a dit : « l'homme a tout ce dont il a besoin. Il ne sera plus triste ».

Mais le hibou a répondu : « Non. J'ai vu un vide dans l'homme... immense comme une faim impossible à rassasier... c'est ce qui le rend triste et vorace. Il va prendre et toujours prendre... Jusqu'à ce qu'un jour, le monde dise : « Je ne suis plus et je n'ai plus rien à donner ».

⁶Extrait du film « Apocalypto » écrit par : Mel GIBSON & Farhad SAFINIA

Ce conte illustre que l'homme, principal bénéficiaire des dons de la nature, serait à l'origine de la destruction de cette nature par surexploitation. Ce qui est la position de nombreux experts qui mettent l'homme responsable du changement climatique de cette époque. Cette position est soutenue par la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC⁷) qui définit le changement climatique comme : « *un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui est, en plus de la variabilité naturelle du climat, observé sur des périodes comparables.* »[34].

D'autres experts soutiennent que c'est une variation naturelle du climat qui est à l'origine du changement climatique que nous observons aujourd'hui. Ainsi le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC⁸) définit le changement climatique comme : « *un changement dans l'état du climat, qui peut être identifié (par exemple en utilisant des tests statistiques) par des changements dans la moyenne et / ou la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, généralement pendant des décennies, voire plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.* » [34].

Pour la réduction des risques de catastrophe, chacune de ces définitions peut être adaptée en fonction des contextes particuliers. Celle de la CCNUCC est la définition la plus restreinte, car elle exclut les changements climatiques imputables à des causes naturelles. Ainsi, pour la définition du GIEC, les changements peuvent être des réchauffements comme des refroidissements. Alors que pour la CCNUCC, le changement climatique est seulement le réchauffement climatique. C'est pourquoi tous les experts du changement climatique sont d'accord sur le fait que le réchauffement de la planète observée est un changement climatique, mais ce qui les divise sont les causes de ce changement climatique, car pour certains, c'est anthropique et pour d'autres c'est une variabilité naturelle du climat.

⁷CCNUCC est la convention adoptée le 9 mai 1992 à New York et signée par plus de 150 pays et par la Communauté européenne lors du Sommet Planète Terre, qui s'est tenu à Rio de Janeiro en 1992. Son objectif ultime est de «stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique». Elle contient des engagements pour toutes les Parties. Aux termes de la Convention, les Parties figurant à l'annexe I doivent s'employer à ramener en 2000 les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal à leurs niveaux de 1990. La Convention est entrée en vigueur en mars 1994. [Source : Glossaire du rapport du GIEC 2001[34]]

⁸GIEC, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat a été formé en 1988 conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il est chargé d'évaluer les informations disponibles portant sur la science, les incidences et les aspects économiques de l'évolution du climat ainsi que les possibilités d'adaptation aux changements climatiques et les moyens d'atténuer leurs effets [32].

Le résultat du changement climatique est l'augmentation des fréquences des aléas naturels qui sont entre autres l'élévation du niveau des mers, l'accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, ...), la déstabilisation des forêts, les menaces sur les ressources d'eau douce, les difficultés agricoles, la désertification, la réduction de la biodiversité, l'extension des maladies tropicales, etc.

Nous présentons d'abord les généralités sur le changement climatique dans la section 2.1 suivante. Ensuite dans la section 2.2, nous revenons sur les caractères multidisciplinaire et complexe du changement climatique. Puis, nous montrons les besoins de partager et d'intégrer des ressources ou des connaissances du changement climatique dans la section 2.3. Enfin, nous présentons dans la section 2.4, les systèmes complexes du changement climatique pour l'adaptation des populations et l'atténuation des conséquences.

2.1 Les généralités

Nous allons, dans cette partie, revenir d'abord sur les concepts **gaz à effet de serre** (GES) et **effet de serre naturel** pour comprendre les causes du changement climatique selon la CCNUCC, ensuite des **Aléas climatiques**, qui est l'un des éléments constituant le **risque climatique** et les **catastrophes** qui sont les conséquences du changement climatique et enfin de la **gouvernance** des risques et des catastrophes.

2.1.1 Les Gaz à Effet de Serre (GES) et l'effet de serre naturel

Les **gaz à effet de serre** sont contenus dans l'atmosphère. Ils permettent ainsi à l'atmosphère de retenir la chaleur par un processus qui s'appelle **l'effet de serre naturel**. Sans ce processus dans l'atmosphère, il ferait trop froid pour permettre la vie sur terre. Il (le processus) commence par le soleil, qui est le moteur de toute vie sur la terre. L'énergie du soleil est à l'origine de la lumière et de la chaleur sur la terre. La moitié des rayons du soleil est renvoyée par l'atmosphère ou absorbée par celle-ci. L'autre moitié atteint la surface de la terre. Une partie de ces rayons qui atteint la terre est renvoyée dans l'espace, **c'est l'effet d'albédo**. Finalement c'est moins de que la moitié des rayons du soleil qui réchauffe la surface de la terre. Grâce à ce réchauffement, la terre produit elle-même un rayonnement sous forme de rayons infrarouges de grandes longueurs d'onde. Une partie de ces rayons s'échappe de l'atmosphère et est renvoyée dans l'espace. Une autre partie des rayons reste emprisonner à cause des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. Ces rayons sont renvoyés de partout et retournent vers la terre. En effet, il y a un échange constant entre la terre et l'atmosphère de

rayon de grandes longueurs d'onde : cela provoque un réchauffement. L'atmosphère joue un rôle d'isolant thermique : **c'est l'effet de serre naturel**. C'est grâce à ce phénomène que nous avons une température en moyenne de 15°C à la surface de la terre. Sans l'effet de serre, il ferait en moyenne -18°C⁹.

Les gaz à effet de serre sont des constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO₂, le N₂O et le CH₄, le Protocole de Kyoto traite, quant à lui, d'autres gaz à effet de serre tels que l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC) [33].

2.1.1.1 Potentiel de réchauffement global (PRG) des gaz à effet de serre

Les gaz ne possèdent pas tous les mêmes capacités d'absorption du rayonnement infrarouge terrestre et ils n'ont pas tous la même durée de vie. Afin de comparer leur impact sur le réchauffement planétaire, le GIEC propose de calculer un Potentiel de Réchauffement Global (PRG). Ce PRG est un indice fondé sur les propriétés radiatives d'un mélange homogène de gaz à effet de serre, qui sert à mesurer le forçage radiatif d'une unité de masse d'un tel mélange dans l'atmosphère actuelle, intégré pour un horizon temporel donné par rapport à celui du dioxyde de carbone. Le PRG représente l'effet combiné des temps de séjour différents de ces gaz dans l'atmosphère et de leur pouvoir relatif d'absorption du rayonnement infrarouge thermique sortant. Le Protocole de Kyoto est basé sur des PRG à partir d'émissions d'impulsions sur une durée de 100 ans [33].

Cet indice ne se mesure pas dans l'absolu, mais relativement au CO₂. Le PRG permet d'évaluer la contribution relative au réchauffement climatique de l'émission d'1kg de gaz à effet de serre par comparaison avec l'émission d'1kg de CO₂ pendant une période déterminée qui est en général de 100 ans.

⁹ Explication tirée du site web : <http://globetrotteurs.be/effet-de-serre-naturel/> (date de visite 14/01/2014)

Exemple : Par définition, le PRG à 100 ans du CO₂ est fixé à 1. Le PRG à 100 ans du protoxyde d'azote qui est de 298 signifie que l'impact de 1 kg de N₂O est équivalent à l'impact de 298 kg de CO₂ au bout d'un siècle.

2.1.1.2 L'équivalence en carbone des gaz à effet de serre

Équivalent CO₂ (éqCO₂) est la quantité de dioxyde de carbone qui entraînerait un forçage radiatif de même importance qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre. S'agissant de concentrations, le terme désigne le forçage radiatif instantané provoqué par un gaz à effet de serre ou sa quantité équivalente de CO₂. S'agissant d'émissions, le terme désigne le forçage radiatif, intégré dans le temps jusqu'à une date donnée, qui est provoqué par la variation des concentrations imputable aux émissions. Voir également Potentiel de réchauffement global [32].

L'équivalent carbone est obtenu en multipliant le PRG par le rapport entre la masse d'un atome de carbone ($C = 12\text{g.mol}^{-1}$) et celle d'une molécule de dioxyde de carbone ($\text{CO}_2 = 44\text{g.mol}^{-1}$). Ainsi on a : $\text{Equivalent carbone} = \text{PRG} \times 12/44$.

Pour les carburants fossiles qui produisent du CO₂, cette unité représente précisément leur masse de carbone. Elle est également utilisée pour tous les autres gaz même pour ceux qui ne contiennent pas de carbone. Exemple : l'équivalent carbone de 1 tonne de CO₂ est de 12/44 teC (tonne équivalent Carbone), soit 0,2727 teC, voir le Tableau 2. 1 qui suit.

Tableau 2. 1: Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Gaz à effet de serre	Formule	PRG relatif	Equivalent carbone par kg émis
Gaz carbonique	CO ₂	1	0,273
Méthane	CH ₄	25	6,82
Protoxyde d'azote	N ₂ O	298	81,3
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	7400 à 12200	2.015 à 3.330
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	120 à 14800	34 à 4.040
Hexafluorure de soufre	SF ₆	22800	6.220

Les positions différentes des experts sont au niveau des causes, mais pas pour les conséquences du changement climatique.

2.1.2 Conséquences du changement climatique

Les conséquences du changement climatique sont l'augmentation des aléas. **Un aléa** est défini selon la terminologie UNISDR¹⁰[87], comme un processus ou phénomène naturel qui peut causer des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, des dommages aux biens, la perte de moyens de subsistance et de services, des perturbations socio-économiques, ou des dommages à l'environnement.

Les aléas peuvent être soit des évolutions tendanciellles, soit des extrêmes climatiques, voir le Tableau 2. 2 suivant.

Tableau 2. 2¹¹ : Exemples d'aléas évolutions tendanciellles et extrêmes climatiques

Evolution tendancielle	Extrêmes climatiques
• Augmentation des températures moyennes de l'air • Augmentation des températures maximales • Evolution du régime de précipitations • Augmentation de la température des cours d'eau et des lacs • Elévation du niveau de la mer (érosion et submersion permanente) • Diminution de l'enneigement (quantité et durée) • Changement dans le cycle de gelées (diminution du nombre, décalage dans le temps) • Perturbation dans les conditions de vent • Variation de l'irradiation solaire (ampleur, durée)	• Sécheresse • Inondation • Surcote marine (submersion temporaire) • Vague de chaleur • Mouvement de terrain • Feux de forêt

Ces aléas ne sont dangereux que lorsqu'il y a des enjeux vulnérables exposés. Dans la suite, nous allons voir définitions des concepts : enjeux, exposition, vulnérabilités, risques et catastrophes.

Les enjeux sont les personnes, biens, équipements, environnement, susceptibles d'être affectés par un phénomène d'origine naturelle et/ou anthropique et de subir des préjudices ou des dommages. Les enjeux ne sont étudiés que dans la mesure où ils présentent une certaine

¹⁰ Terminologie pour la Prévention des risques de catastrophe, Publié par la Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies (UNISDR), Genève, Suisse, mai 2009

¹¹ Tiré du site web <http://www.pcet-ademe.fr/content/risques-climatiques-et-impacts>

vulnérabilité face aux aléas [31]. Dans le cas où l'aléa présente une certaine vulnérabilité face aux aléas, on parle d'exposition.

L'exposition aux aléas climatiques correspond à l'ensemble des populations, milieux et activités qui peuvent être affectés par les aléas climatiques. L'exposition peut inclure le nombre de personnes ou les types de bien dans une région (nature de l'exposition). Elle peut être combinée avec la vulnérabilité spécifique des éléments exposés pour un risque particulier (type de l'exposition), afin d'estimer le risque associé en cette zone [87].

La vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel (aléa naturel) sur des enjeux (l'homme, ses activités et son environnement). Elle évalue dans quelle mesure un système socio-spatial risque d'être affecté par les effets néfastes des aléas. » [84].

Le risque est communément défini dans [21] comme la possibilité de voir se manifester un phénomène (aléa naturel) dommageable pour la vie, les biens et les activités (vulnérabilité). Il représente ainsi la combinaison entre un aléa et une vulnérabilité ; $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$. (1) » Dans cette définition (1) vulnérabilité sous entend la combinaison d'un enjeu et d'une vulnérabilité et c'est pourquoi dans [68] le risque est défini comme la combinaison entre un aléa, un enjeu et une vulnérabilité ; $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité} * \text{Enjeu}$.

Le risque s'exprime virtuellement, **la catastrophe** dite « naturelle » le concrétise quant à elle par l'expression d'un endommagement, résultat de l'impact de phénomènes naturels sur les sociétés et leurs territoires [28].

Les conséquences graves des risques et des catastrophes ont poussé à leur gouvernance abordée dans la suite de cette section.

2.1.3 Gouvernance

La gouvernance perçue comme l'ensemble des processus mis en œuvre pour la prévention, et la résolution de ces risques en intégrant non seulement les autorités étatiques mais aussi les acteurs internationaux et locaux pour une efficacité des politiques. Cette gouvernance est ainsi pilotée par un ensemble d'acteurs qui sont de différentes catégories. Ces acteurs ont des missions spécifiques dans la gestion des risques et catastrophes et utilisent et mettent également en place des instruments pour une gestion efficace des problèmes soulevés dans ce domaine.

Un **acteur** est une personne physique ou morale qui joue un rôle déterminant dans la gouvernance du risque de catastrophes naturelles. Pour cela, il dispose d'instruments (conventions, protocoles, règlements, etc.) pour jouer son rôle de prévention, de gestion et de retour d'expériences du risque de catastrophes naturelles. Les acteurs de ce domaine sont très nombreux et jouent des rôles à des échelles différentes : internationale, nationale, étatique, régionale, départementale, communale et locale. Ces acteurs sont aussi publics ou privés, organisés ou non organisés et stratégiques, pertinents ou secondaires.

Une **mission** est une charge donnée à quelqu'un d'accomplir une tâche définie. Nous avons rencontré plusieurs catégories de mission dans la gouvernance des risques. Nous n'en citerons que cinq : alerte, information, organisation, coordination, assistance, soutien, etc.

Le terme **instrument** est aussi appelé instrumentation, **outil de gestion**, outil de techniques, outil de méthodes, outil de concepts managériaux, etc. Et il le définit comme un dispositif formalisé permettant l'action organisée. Les instruments permettent à chacun de s'approprier des nouvelles façons de se représenter l'organisation et ses interdépendances, et donc de développer des comportements adaptés à la nouvelle situation [61]. On peut citer quelques instruments de gouvernance des risques et des catastrophes : plan, convention, protocole, système d'alerte précoce, etc.

Ces généralités du changement climatique constituent le cadre conceptuel pour la construction d'un patron de conception d'ontologies de ce domaine du changement climatique dans le chapitre 6 de ce manuscrit.

2.2 Multidisciplinarité et complexité du changement climatique

Dans cette section, nous revenons sur les caractères multidisciplinaire et complexe du changement climatique.

Les conséquences du réchauffement climatique justifient l'intérêt que les politiques et les scientifiques mettent sur cette question qui fait du changement climatique un domaine multidisciplinaire et complexe. C'est-à-dire qu'il est au carrefour de plusieurs disciplines interdépendantes comme le climat, l'urbanisme, la gouvernance des risques, etc. Par conséquent, il fait intervenir plusieurs experts : géographes, urbanistes, hydrologues, climatologues, économistes, sociologues, mathématiciens, etc.

Si la science a évolué à pas de géants, la météorologie reste un domaine éminemment complexe. S'il est fort probable que l'activité humaine soit responsable du réchauffement climatique, il est extrêmement ardu de définir avec précision l'impact de l'homme. Il se peut que le réchauffement climatique soit le fruit d'une augmentation cyclique de la température et de la pollution, l'un ou l'autre. Pour l'instant, personne ne peut déterminer avec précision les causes exactes. Ceci parce que le changement climatique est un domaine complexe, il fait intervenir plusieurs choses qui sont fortement liées.

Le domaine du changement climatique fait intervenir plusieurs acteurs humains et institutionnels de spécialités différentes qui doivent entre autres partager et intégrer leurs connaissances pour mieux jouer leurs rôles dans ce domaine.

Dans la section suivante, nous revenons sur la question du partage et de l'intégration des connaissances du changement climatique.

2.3 Les besoins de partager et d'intégrer les connaissances et les ressources

Vu la multidisciplinarité et la complexité du domaine du changement climatique, les acteurs de la gouvernance des risques et des catastrophes ont besoin de partager et d'intégrer leurs ressources et leurs connaissances.

Le changement climatique est multidisciplinaire et complexe, il est étudié par plusieurs disciplines qui sont interconnectées. Les experts dans ces différentes disciplines constituant le changement climatique ont le besoin de partager leurs connaissances.

Selon la CCNUCC, les gouvernements doivent¹² :

- rassembler et partager des informations relatives aux gaz à effet de serre, mais aussi aux politiques nationales et bonnes pratiques mises en œuvre ;
- lancer des stratégies nationales pour faire face aux émissions de gaz à effet de serre et s'adapter aux impacts prévus, y compris la mise à disposition de soutien financier et technologique aux pays en développement ;
- coopérer pour se préparer à l'adaptation aux impacts des changements climatiques.

¹² Source : <http://biodurable.blogspot.com>

Des projets se sont vite intéressés à cette question de partage des connaissances. Nous pouvons citer deux projets en Afrique :

- « AfricaAdapt¹³ » est une plateforme à l'échelle continentale, de promotion et de partage des connaissances sur l'adaptation au changement climatique, dont la mission première est d'appuyer les collectivités locales vulnérables à devenir plus résistantes aux impacts actuels et futurs des variations, par la circulation des connaissances sur l'adaptation, pour des moyens d'existence durables.
- AAKN¹⁴ (Africa Adaptation Knowledge Network) est un portail d'informations. Il est une plateforme pour le partage des connaissances, de la recherche, des initiatives réussies et des partenariats collaboratifs. « Il s'appuie sur les efforts en cours dans le continent pour mobiliser les connaissances existantes et fournir des solutions solides à l'impact majeur du changement climatique sur les vies et les moyens de subsistance en Afrique », indique le PNUE dans son communiqué.

Ces plateformes, comme nous les avons constatées, sont juste des sites web ou des portails web où des experts viennent publier leurs ressources d'informations. Ces connaissances sont non formalisées car disponibles sur des formats (textes, données brutes,...) accessibles seulement aux humains.

Le partage de connaissances est important pour l'identification des ressources disponibles mais aussi pour l'intégration des connaissances et des ressources dans ce domaine du changement climatique.

2.4 Les systèmes complexes pour l'atténuation et l'adaptation aux effets et impacts du changement climatique

Un autre besoin, après celui de partager et d'intégrer les connaissances, est la simulation sémantique des modèles des systèmes complexes du changement climatique, qui sont des modèles des sciences de la vie et de l'homme. Dans cette section, nous revenons sur l'atténuation et l'adaptation aux effets et impacts du changement climatique nécessitant la simulation de système multi-agent accédant aux connaissances du domaine de l'environnement des agents pour proposer de meilleures stratégies aux décideurs politiques.

¹³ Source : <http://www.africa-adapt.net/>

¹⁴ Source : <http://www.aaknet.org/>

2.4.1 Atténuation des conséquences

L'atténuation est définie, dans le glossaire du rapport du GIEC 2007 [33], comme la modification et la substitution des techniques employées dans le but de réduire les ressources engagées et les émissions par unité de production. Bien que certaines politiques sociales, économiques et technologiques puissent contribuer à réduire les émissions, du point de vue du changement climatique, l'atténuation signifie la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits.

Les Mécanismes de Kyoto (également appelés mécanismes de flexibilité) sont des mécanismes économiques fondés sur des principes du marché, auxquels les Parties au Protocole de Kyoto peuvent recourir pour atténuer les incidences économiques possibles des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces mécanismes comprennent en particulier la **mise en œuvre conjointe** (article 6), le **mécanisme pour un développement « propre »** (article 12) et l'**échange de droits d'émission** (article 17) [33].

Le **mécanisme pour un développement « propre »** est défini dans l'article 12 du Protocole de Kyoto. Il poursuit un double objectif : 1) aider les Parties ne figurant pas à l'annexe I à parvenir à un développement durable ainsi qu'à contribuer à l'objectif ultime de la Convention ; et 2) aider les Parties visées à l'annexe I à remplir leurs engagements chiffrés de limitation et de réduction de leurs émissions. Les unités de réduction certifiées des émissions obtenues dans le cadre de projets relevant du mécanisme pour un développement « propre » exécutés dans des pays ne figurant pas à l'annexe I qui contribuent à limiter ou à réduire les émissions de GES, lorsqu'elles sont certifiées par des entités opérationnelles désignées par la Conférence des Parties agissant en tant que Réunion des Parties, peuvent être portées au crédit des investisseurs (publics ou privés) des Parties visées à l'annexe B. Une part des fonds provenant d'activités de projets certifiées est utilisée pour couvrir les dépenses administratives et aider les pays en développement, qui constituent les parties qui sont particulièrement vulnérables aux effets défavorables des changements climatiques, à financer le coût de l'adaptation [33]. Pour l'**échange de droits d'émission** (article 17), nous parlons dans cette partie du principe du pollueur payeur. Ce principe du pollueur payeur plutôt que de sanctionner les gros pollueurs signataires du protocole de Kyoto les fait tabler sur des principes régulant l'économie de marché pour encourager la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Dans les faits, cela consiste à mettre fin à la gratuité de l'émission de ces gaz, qui est désormais réglée par un système de quotas par tonne, ou "permis de polluer", que l'on achète, selon les lois de l'offre et de la demande (voir Figure 3).

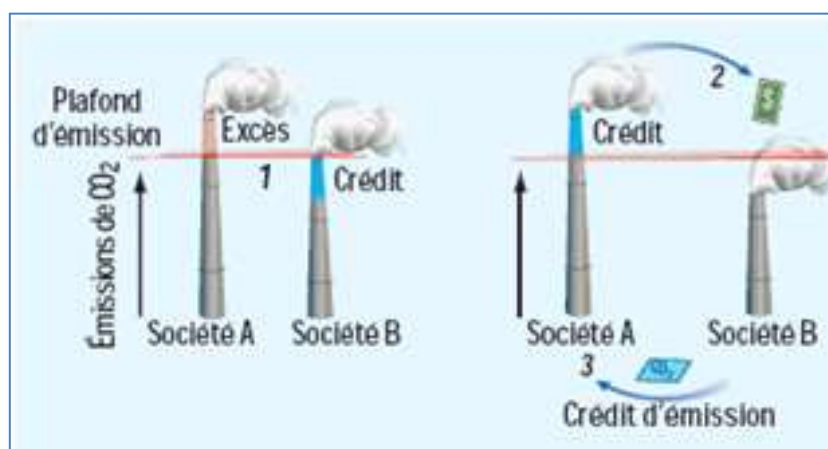


Figure 3: Illustration du mécanisme d'échange de quotas d'émission entre deux sociétés : la société B émet moins de CO₂ que la limite qui lui a été assignée, alors que la Société A en émet en excès (1). La Société A peut acheter à B ses quotas inutilisés (2) et ainsi remplir ses obligations (3).

Ce principe du pollueur payeur se fonde sur les concepts : le Potentiel de réchauffement global (PRG) des gaz à effet de serre et l'équivalence en carbone des gaz à effet de serre sont déterminés. Pour lutter contre le changement climatique, le principe du pollueur payeur est un modèle important. Dans la mesure où, il essaye de trouver une solution pour pousser progressivement les pollueurs à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre, qui selon la CCNUCC sont les principales causes du changement climatique de cette époque.

2.4.2 Adaptation au changement climatique

L'adaptation est l'ensemble des initiatives et des mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus. On distingue plusieurs sortes d'adaptation : anticipative ou réactive, de caractère privé ou public, autonome ou planifiée. Citons à titre d'exemple l'édification de digues le long des cours d'eau ou des côtes et le remplacement des plantes fragiles par des espèces résistant aux chocs thermiques [33].

Les stratégies d'adaptation sont complémentaires des stratégies d'atténuation, qui visent à émettre moins de gaz à effet de serre et à restaurer ou protéger les capacités de puits de carbone des écosystèmes ou agroécosystèmes.

Les stratégies d'adaptation et d'atténuation peuvent être vérifiées ou même obtenues à partir de simulations sémantiques de modèles de systèmes complexes avec une dimension prenant en compte les connaissances des populations et des entreprises.

2.5 Conclusion

Le domaine du changement climatique est un défi international, multidisciplinaire et complexe. Il fait intervenir différents acteurs disposant de ressources hétérogènes et distribuées. Cela a créé le besoin de partager et d'intégrer les ressources des acteurs dans ce domaine pour la gouvernance. La gestion des connaissances du domaine du changement climatique pourrait aider le partage et l'intégration des ressources des acteurs dans la gouvernance des risques. Le chapitre 3 suivant présente un état de l'art sur la gestion des connaissances.

Les modèles du changement climatique que nous voulons comprendre aujourd'hui sont des modèles des sciences de la vie et de l'homme pour l'atténuation et l'adaptation aux effets et impacts du changement climatique sont des systèmes complexes qu'on peut étudier avec les systèmes multi-agents en ajoutant une nouvelle dimension, l'ontologie du domaine de l'environnement des agents. Ainsi, dans le chapitre 4 nous faisons un état de l'art sur les ontologies et la simulation multi-agent.

Chapitre 3

La gestion des connaissances

La connaissance est la principale richesse d'une organisation et elle est considérée comme un capital qui a une valeur économique évaluable et valorisable. La perte de cette connaissance ou sa mauvaise exploitation conduit potentiellement à un échec de l'organisation [80]. C'est pour cela que la gestion des connaissances s'est affirmée dans les entreprises comme un enjeu majeur et a fait depuis l'objet de plusieurs recherches dans le domaine de l'informatique.

Ces recherches se sont intéressées à plusieurs problématiques comme la représentation des connaissances, les ontologies pour la représentation des connaissances, la construction d'ontologies et leur évolution, utilisation des connaissances, le web sémantique, la recherche sémantique et tant d'autres problématiques.

Dans ce chapitre, après quelques définitions sur la gestion des connaissances, nous présentons les défis de la gestion des connaissances, la représentation des connaissances, les ontologies, les méthodologies de construction d'ontologies, utilisation des connaissances, le web sémantique et la recherche sémantique.

3.1 Définitions des bases de la gestion des connaissances

Dans [26], l'auteur propose les définitions suivantes sur les notions de donnée, information et connaissance en renforçant les définitions dans [57] et [89].

Une donnée est une perception, un signal, un signe ou un quantum d'interaction (par exemple, '40' ou 'T'sont des données). La donnée est la représentation symbolique des nombres, faits,

quantités ; un élément de donnée est comme un capteur naturel ou artificiel qui indique une variable. Les données sont composées de symboles et de chiffres qui reflètent une perception du monde expérientiel.

L'information est une donnée structurée selon une convention (par exemple $T=40^{\circ}$). L'information est le résultat de la comparaison de données qui sont situationnellement structurées de manière à arriver à un message qui est important dans un contexte donné. Les informations sont obtenues à partir des données qui ont une signification et sélectionnées comme utile.

La connaissance est l'information avec un contexte et qui a une valeur qui la rend utilisable (par exemple, "le patient de la chambre 313 de l'hôpital d'Orléans a une température $T=40^{\circ}$ "). La connaissance est ce qui place une personne dans la position pour effectuer une tâche particulière en sélectionnant, en interprétant et en évaluant des informations en fonction du contexte. C'est pourquoi la connaissance donne de l'emploi aux gens.

La compétence est considérée comme l'ensemble des ressources disponibles pour faire face à une situation nouvelle dans le travail. Ces ressources sont constituées par des connaissances stockées en mémoire et par des moyens d'activation et de coordination de ces connaissances [37].

Le but de la gestion des connaissances est donc de permettre aux ordinateurs (machines) d'avoir des compétences, c'est-à-dire à travers des systèmes d'accéder aux connaissances stockées et de coordonner ces connaissances pour aider à la prise de décision dans un domaine ou à l'exécution d'une tâche. Dans la section suivante, nous présentons les enjeux de la gestion des connaissances dans les organisations.

3.2 Les enjeux de la gestion des connaissances dans les organisations

Parmi les objectifs attendus de la gestion des connaissances, on peut citer : la sauvegarde de la connaissance pour éviter sa perte et surtout pour faciliter la réutilisation, le partage de la connaissance et le travail collaboratif entre les membres de l'entreprise, l'amélioration des relations interne et externe à l'entreprise pour augmenter l'apprentissage et aussi être à mesure de gérer les situations d'urgence ou de crises [80].

La gestion de connaissances (en anglais KM : Knowledge Management) peut être définie comme étant une démarche stratégique pluridisciplinaire visant à atteindre l'objectif fixé grâce à une exploitation optimale des connaissances de l'entreprise [46].

Dans la suite de cette section, nous présentons seulement certains enjeux de la gestion des connaissances qui font objet de contributions dans cette thèse, l'aide à l'identification des ressources mais aussi le partage et l'intégration des ressources.

Parmi les enjeux de la gestion des connaissances, nous avons le partage, l'identification et l'intégration des ressources qui seront abordées dans cette thèse.

3.3 Les ontologies pour la représentation des connaissances

La représentation des connaissances désigne un ensemble d'outils et de procédés destinés d'une part à représenter et d'autre part à organiser le savoir humain pour son utilisation ainsi que son partage. La représentation des connaissances permet de passer de l'expression linguistique des connaissances, telles que nous autres humains pouvons les considérer, à une représentation formelle et calculable des connaissances, propres à une exploitation informatique [9].

L'ingénierie des connaissances est la discipline qui se charge de modéliser un problème ou une tâche de manière à obtenir la représentation formelle. Pour cela, elle fait appel, entre autres, aux ontologies. Dans [9], l'auteur montre l'importance des ontologies dans la représentation des connaissances en disant que : « *la représentation des connaissances n'est possible que quand le problème des ontologies est résolu* ». Cette importance des ontologies et l'intensité des travaux dans ce domaine ont donné naissance à l'ingénierie ontologique.

3.3.1 Les ontologies

Selon le Petit Robert (Petit Robert, 1984) la notion d'ontologie remonte à 1646 (lat. philo. Ontologia, 1646) et elle concerne la « *partie de la métaphysique qui s'applique à l'être en tant qu'être, indépendamment de ses déterminations particulières* ». Le Petit Larousse (Larousse, 2006) évoque une « *Etude de l'être en tant qu'être, de l'être en soi. C'est aussi l'étude de l'existence en général, dans l'existentialisme* ».

L'ontologie est apparue dans le domaine de l'ingénierie des connaissances au début des années 90. Elle a depuis lors plusieurs définitions proposées. Dans un premier temps nous donnons la définition simple de [65] : « *Une ontologie définit les termes et les relations de base du vocabulaire d'un domaine ainsi que les règles qui permettent de combiner les termes et les relations afin de pouvoir étendre le vocabulaire* ».

D'autres définitions sont proposées, mais la plus couramment citée est celle de [85] la définissant par : « *Une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation* ». Cette définition de l'ontologie est très abstraite. Elle a été modifiée par [14]: « *une ontologie est une spécification formelle d'une conceptualisation partagée* » puis les définitions de [85] et [14] sont regroupées dans celle de [78] : « *Une ontologie est une spécification formelle, explicite d'une conceptualisation partagée* ».

Nous avons trouvé une discussion de la signification des termes de cette dernière définition proposée dans [62] comme suit : « Qu'une conceptualisation est une vue abstraite et simplifiée du monde que l'on souhaite représenter dans un but donné ; Qu'une spécification formelle explicite est la transposition de la conceptualisation dans un langage qui soit utilisable par une machine ; Et enfin que la notion de partage renvoie à une notion de compromis dans la modélisation, un socle de commun accord qui permet de satisfaire une communauté de personnes. »

Depuis son apparition dans le domaine de l'informatique, l'intérêt de l'ontologie dans ce domaine ne cesse de grandir et de susciter plus de recherches et d'applications. Allant de leur construction à leur évolution et en passant par des recherches sur leur enrichissement, leur alignement, les ontologies ne cessent aussi de nous inspirer dans des applications de plus en plus ambitieuses.

L'ingénierie ontologique, au sein de l'ingénierie des connaissances, se réfère à toutes les activités liées au processus de développement d'une ontologie, le cycle de vie des ontologies, des méthodes et des méthodologies pour la construction des ontologies, des outils et des langages qui les soutiennent.

Dans la suite, nous exposons différents types d'ontologies dans l'ingénierie ontologique.

3.3.2 Types d'ontologies

En regroupant les types d'ontologies abordés dans la littérature, en particulier dans les récents travaux de notre équipe [30] et [15], nous distinguons:

Les ontologies de fondement ou de référence représentent un niveau d'abstraction des connaissances indépendantes de tout domaine mais relatives, par exemple, à des notions d'espace, de temps, d'évènements, etc.

Les ontologies génériques ou noyaux n'ont pas une finalité de couverture universelle de tous les domaines de connaissances, à la différence des ontologies de fondement. Elles modélisent les concepts génériques et communs à plusieurs sous-domaines d'un même domaine et les

relations qui les lient. Exemple, dans le domaine du changement climatique la connaissance : *« le risque est la composition d'aléa et de vulnérabilité »* est générique. Elle peut être représentée dans une ontologie générique (noyau) qui est ensuite réutilisée dans la construction d'ontologies dans ce domaine du changement climatique.

Les ontologies de domaine expriment les connaissances spécifiques à des domaines précis tels que : l'agriculture, la médecine, le tourisme, etc. Ce sont les types d'ontologies les plus répandus dans la littérature. Les ontologies de domaine sont par ailleurs réutilisables pour des applications sur ce domaine. Les ontologies de domaine peuvent aussi réutiliser des ontologies noyaux ou une ontologie de fondement si elles adhèrent à leur engagement ontologique. On distingue aussi d'autres types d'ontologie qu'on pourrait classer dans le même niveau d'abstraction que les ontologies de domaine. Il s'agit principalement des ontologies de tâche et d'application.

Les ontologies d'application modélisent les connaissances requises pour une application particulière. Elles sont souvent spécifiques à l'application et ne sont pas réutilisables en elles-mêmes.

Les ontologies de représentation appelées aussi méta-ontologies, elles sont souvent utilisées pour formaliser un modèle de représentation des connaissances. Elles peuvent fournir les primitives nécessaires pour construire les ontologies génériques et de domaine.

Les ontologies de tâches sont destinées à modéliser des processus de résolution de problèmes (tâches) comme, par exemple, le diagnostic, la surveillance, la planification, la conception, etc.

3.3.3 Méthodologies de construction d'ontologie

La construction d'une ontologie n'est pas une activité aisée, d'autant plus qu'il n'existe pas aujourd'hui une méthodologie communément admise.

Ces méthodologies pour l'ingénierie ontologique peuvent être classées en trois grandes catégories à savoir les méthodologies manuelles, les méthodologies d'apprentissages semi-automatiques (qui sont en deux catégories ceux sur la réutilisation d'ontologies existantes et ceux sur les processus d'extraction de connaissances à partir de ressources terminologiques et ontologiques) et les méthodologies mixtes utilisant les approches des deux catégories de méthodologies.

3.3.3.1 Les méthodologies manuelles à partir d'expertises des experts

Les méthodologies manuelles de construction d'ontologies [53], [54], [56] et [59] sont sans doute les plus connues des méthodologies de construction d'ontologies. En effet, la plupart des méthodes existantes décrivent une démarche intégrale de construction d'une ontologie. Ces méthodologies s'appuient sur les mêmes principes que celles appliquées en génie logiciel.

3.3.3.2 Les méthodologies d'apprentissages semi-automatiques

La construction d'ontologies par apprentissage (ou ontology learning) se réfère donc à l'ensemble des méthodes et techniques exploitant de manière (semi)-automatique diverses sources de connaissances pour construire une ontologie à partir de rien, ou encore enrichir ou adapter une ontologie existante. L'objectif principal est de réduire le temps et les efforts nécessaires au processus de développement d'une ontologie [15].

Nous présentons ici les **processus d'extraction de connaissances à partir de corpus de textes** et les méthodologies de construction d'ontologies par réutilisation d'ontologies existantes.

3.3.3.2.1 Processus d'extraction de connaissances à partir de corpus de textes

Les méthodologies basées sur les processus d'extraction de connaissances à partir de corpus de textes [64] et [79] permettent de construire une ontologie à partir des documents, textes non structurés, du domaine en utilisant des méthodes de TALN, la Figure 4 est une illustration de cette méthodologie.

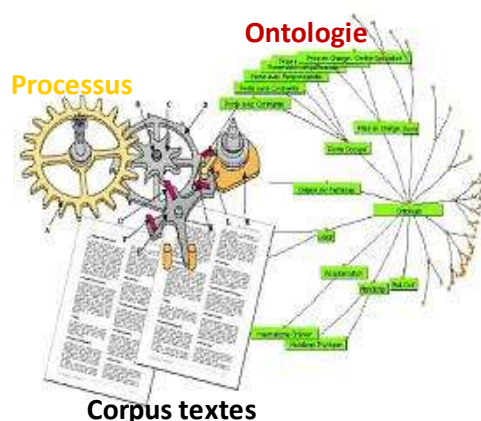


Figure 4: illustration de l'extraction des connaissances à partir de documents, textes non structurés, par les processus pour construire une ontologie¹⁵.

¹⁵ tirée de <http://www.condillac.org/terminologie-ontologie/>

3.3.3.2 Réutilisation d'ontologies existantes

Les méthodologies basées sur la réutilisation d'ontologies comme [4] permettent de construire une ontologie à partir d'autres ontologies (ontologie de référence, ontologie générique, ontologie de domaine ou patron de conception d'ontologie).

Dans [30], la réutilisation d'ontologies de fondement et noyau peut avoir une modularisation en deux niveau d'abstraction : la décomposition verticale et la décomposition horizontale, voir la Figure 5.

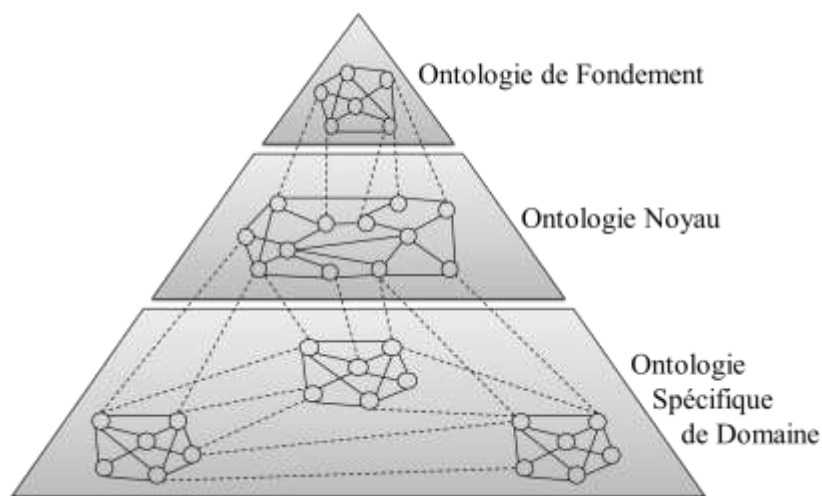


Figure 5 : Décomposition verticale et horizontale d'une ontologie modulaire (tirée de [30])

Dans la réutilisation d'ontologie, des patrons de conception d'ontologies (Ontology Design Patterns – ODP) [2], [3] et [22] ont été proposés pour fournir des guides de bonnes pratiques et des catalogues de composants ontologiques réutilisables. Un patron de conception d'ontologies est un bloc générique qui va entrer dans la conception de plusieurs ontologies ou encore qui va servir de base via une adaptation à la création de plusieurs composants, voir la Figure 6. Un composant d'ontologie est un bloc élémentaire qui va entrer dans la conception d'une ontologie et qui peut être très spécifique, voir Figure 6.

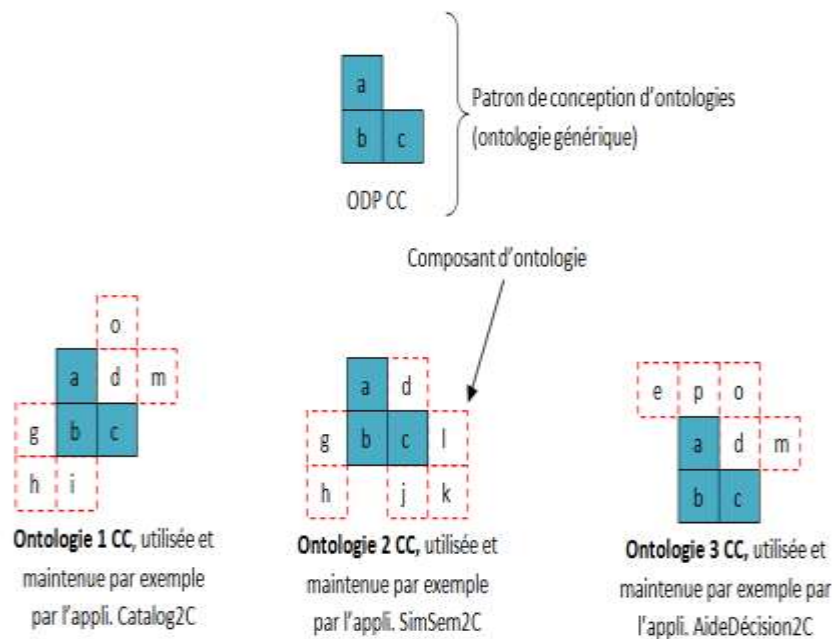


Figure 6: illustration d'un patron de conception d'ontologies et de composants d'ontologies dans le cadre d'un SGC du CC.

3.3.3.3 Les méthodologies mixtes (hybrides)

Les méthodologies manuelles de construction d'ontologies, souvent à partir de zéro, sont très coûteuses en ressources personnes (ingénieurs de connaissances et experts) et en temps. Mais aussi, il y a des contraintes de présences (interviews, brainstorming) des experts et des ingénieurs de connaissances même si aujourd'hui des outils de communications (forums, chats,...) sont disponibles pour diminuer ces contraintes. Ce sont ces problèmes qui ont poussé les recherches vers les méthodologies semi-automatiques par apprentissage : réutilisation d'ontologies et processus d'extraction de connaissances à partir des textes et des données. L'objectif principal de ces méthodologies semi-automatiques par apprentissage est de réduire le temps et les efforts nécessaires au processus de développement d'une ontologie [15].

Le problème avec ces méthodologies par apprentissage semi-automatique est que les techniques utilisées ne sont pas encore en mesure de relever les défis d'extraction de connaissances à partir des textes et de réutilisation d'ontologies construites dans des contextes ou pour des tâches différentes. Ce qui fait qu'aujourd'hui des ontologies sont construites, bien que contenant les concepts et les relations du domaine, mais sans une bonne abstraction qui

est la justification de la pertinence des concepts et relations d'une ontologie pour son contexte d'utilisation ou pour ses tâches.

Ces problèmes avec les techniques d'apprentissage semi-automatique deviennent plus difficiles à résoudre dans le cas de domaines multidisciplinaires et complexes, comme le domaine du changement climatique. Car dans ces domaines, on a plusieurs disciplines qui interviennent et de ce fait plusieurs corpus sont à mettre en place. Si on veut tenir compte de la complexité de ces domaines, les corpus sont interdépendants. Il est difficile d'extraire certains savoirs si on laisse de côté l'interdépendance entre les corpus. De même, si des ontologies existent dans ces domaines, pour tenir compte de la multidisciplinarité et de la complexité, une méthodologie basée sur la réutilisation d'ontologies demande de disposer de techniques très avancées.

On peut noter que ces méthodologies de l'ingénierie ontologique vues séparément ne résolvent pas le problème de la construction d'ontologies de domaines multidisciplinaires et complexes. Mais si on regarde la complémentarité de ces méthodologies, comme dans la vision des méthodologies mixtes, dans la construction d'ontologies de domaines multidisciplinaires et complexes, alors les résultats pourraient être meilleurs.

Une approche mixte connue dans le domaine de l'ingénierie ontologique est NeOn [58]. Dans cette approche les auteurs proposent différents scénarios pour la construction d'une ontologie en tenant compte des ressources de connaissances disponibles, voir la Figure 7. Ces ressources de connaissances peuvent être des ressources ontologiques ou non ontologiques.

Par exemple, pour la construction d'ontologies de domaines multidisciplinaires et complexes, nous pouvons utiliser un patron de conception d'ontologies, qui a été construit avec une méthodologie manuelle et qui fait une bonne abstraction du domaine, avec une méthodologie semi-automatique d'apprentissage basée sur la découverte et l'adaptation de composants d'ontologies.

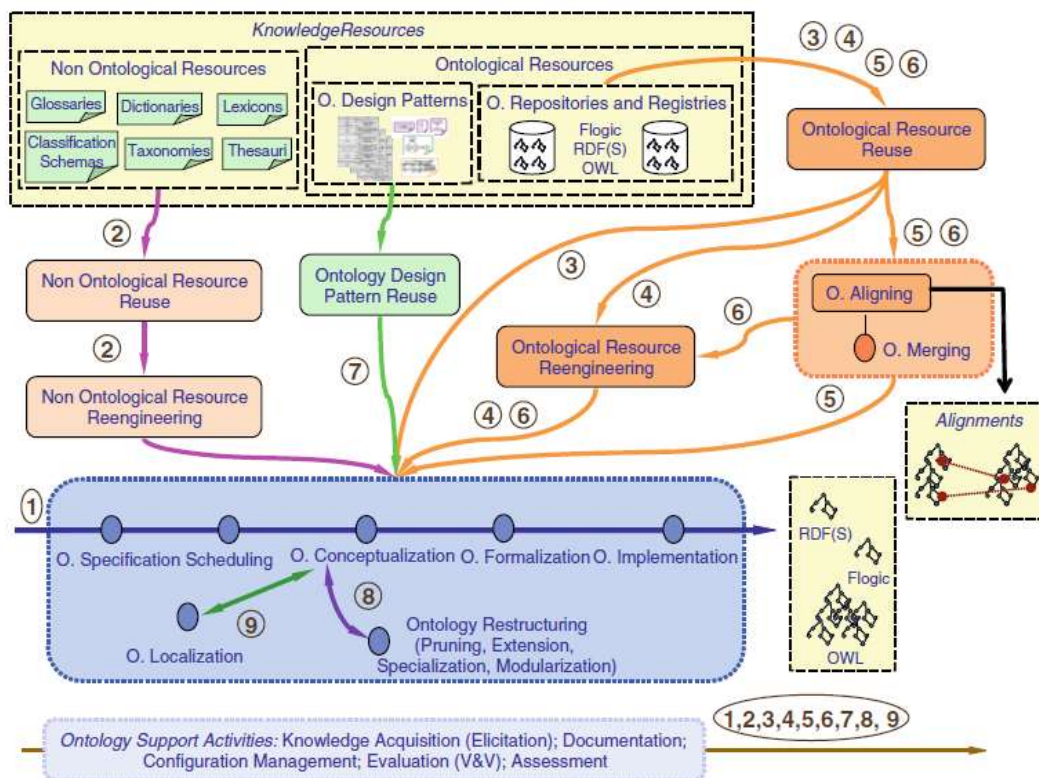


Figure 7 : Vue d'ensemble de la méthodologie NeOn [58]

Après la construction d'une ontologie, il y a la problématique de la gestion des changements des ontologies, car les connaissances représentées par les ontologies évoluent, alors les ontologies doivent aussi évoluer pour être plus précise et plus adéquates aux domaines qu'elles modélisent et à leurs objectifs d'usage.

Dans la suite, nous présentons la gestion des changements des ontologies.

3.3.4 La gestion des changements des ontologies

La gestion des changements des ontologies n'a pas connu beaucoup de travaux comme celui de la construction des ontologies, bien que indispensable dans le cycle de vie de l'ontologie. Mais parmi les études sur ces changements de l'ontologie, [71] explique que les deux approches (i) évolution de l'ontologie et (ii) la gestion des versions de l'ontologie ont attiré le plus de travaux actuels.

Dans [71] l'auteur explique que pour une évolution de l'ontologie le système de gestion de l'ontologie facilite la modification d'une ontologie en préservant son état de consistance. Il explique aussi que pour la gestion des versions de l'ontologie (versioning) le système de gestion de l'ontologie permet la manipulation des changements de l'ontologie en créant et en gérant ses différentes versions.

En se basant sur [20] et [71] nous présentons dans la suite des éléments méthodologiques pour la gestion des changements d'une ontologie :

- **Représentation des changements.** Les changements d'une ontologie sont des changements élémentaires ou des changements complexes [20]. Un changement élémentaire est un changement simple et indécomposable, à la base de tout processus d'évolution, c'est-à-dire l'ajout ou l'effacement de composantes d'une ontologie selon [20] pour qui aussi un changement complexe est une collection ordonnée de changements élémentaires qui forment ensemble une seule et unique entité logique, dont la signification est bien définie et identifiée, par exemple le déplacement, la fusion ou la séparation des entités ontologiques.
- **Sémantique des changements.** L'ontologie doit évoluer d'un état consistant vers un autre état consistant, c'est-à-dire un état où les contraintes du modèle ontologique sont respectées. Afin de résoudre les inconsistances introduites par certains changements, d'autres changements peuvent être nécessaires. Cette étape vise alors à permettre la résolution de tous les changements additionnels d'une manière systématique [20].
- **La propagation des changements.** Le but de cette étape est de modifier automatiquement les instances et les ontologies dépendantes afin de préserver leur consistance avec l'ontologie évoluée. Pour cela, les auteurs proposent la modification des ontologies dépendantes par l'application récursive du processus d'évolution en fonction des changements apportés à l'ontologie évoluée [20].
- **Validation des changements.** [20] explique que, dans cette étape, la séquence des changements est validée conjointement par les auteurs de l'évolution de l'ontologie. Il ajoute (en faisant référence à [72] et [83]) que si cette validation n'est pas possible en raison du caractère distribué de l'environnement d'occurrence du processus d'évolution, alors des mécanismes de gestion des conflits entre des changements doivent être prévus.
- **La gestion des versions (versionning).** La gestion des versions de l'ontologie permet de créer les différentes versions et d'accéder aux données à travers ces versions [38]. Dans [27], les auteurs différencient la gestion des versions et l'évolution de l'ontologie. Ils (les auteurs de [27]) considèrent l'évolution comme le processus de modification de l'ontologie en maintenant sa validité, tandis que la gestion des versions est le processus par lequel sont gérées plusieurs versions de l'ontologie en maintenant l'interopérabilité entre ces versions et permettant d'accéder à chaque

version selon les exigences de l'élément d'accès (données, service, application ou une autre ontologie).

Les ontologies peuvent valoriser le fonctionnement du web de plusieurs façons. On peut les utiliser de façon simple pour améliorer la pertinence des recherches - le programme de recherche peut ne rechercher que les pages faisant référence à un concept précis au lieu de celles qui utilisent des mots-clés ambigus. C'est l'objectif du web sémantique que nous présentons dans la section suivante.

3.4 Le web sémantique

Avant que le web existe, nous avions besoin d'ouvrir les programmes avec lesquels avaient été écrits les documents numérisés pour les lire successivement. Le web a simplifié le problème en inventant un langage unique HTML (Hyper Text Markup Language), qui permet de lire toutes sortes de documents et de les relier. Avec le web sémantique "le web de données", la philosophie est la même : créer un lien automatique pour relier les données qui sont stockées dans les différents fichiers et bases de données de nos ordinateurs [86].

Le web sémantique au sens du consortium W3C est défini comme « *un web dans lequel les données sont définies et reliées de sorte qu'elles puissent être traitées par les ordinateurs, non seulement pour être affichées et lues par des êtres humains, mais pour être (ré) utilisées par des applications* ».

Dans cette section, nous présentons les enjeux du web sémantique, le web sémantique d'entreprise, les langages du web sémantique et la recherche sémantique qui sont des concepts abordés dans les contributions de cette thèse.

3.4.1 Web sémantique d'entreprise ou organisationnel

Le web sémantique avec ses nombreux avantages s'applique dans un cadre très vaste et complexe : le web. Il est aussi intéressant d'appliquer cette philosophie du web sémantique dans un cadre plus restreint, c.à.d. dans le cadre de mémoire d'entreprise, comme le souligne [77], *le fait de se restreindre au contexte d'une organisation limitée permet de faire certaines hypothèses simplificatrices dans le cas d'un web sémantique d'entreprise (mémoire d'entreprise), par rapport au web sémantique : les frontières limitées de l'organisation permettent de supporter un accord plus facile sur une politique d'entreprise, une création plus facile des ontologies et des annotations, une vérification plus facile de la validité et de la fiabilité des ressources d'information, une description des profils d'utilisateurs plus précis, une échelle plus réduite pour les corpus de documents et pour les ontologies* [77].

La mémoire d'entreprise ou mémoire organisationnelle est une approche particulière de la gestion des connaissances. Elle peut être définie comme « *La matérialisation explicite et persistante des connaissances et informations cruciales d'une organisation en vue de faciliter leur accès, partage, réutilisation par les membres de l'organisation dans leurs tâches individuelles et collectives* » [77].

Une mémoire d'entreprise utilisant la philosophie et les outils du web sémantique est dite web sémantique d'entreprise ou web sémantique organisationnel.

Un web sémantique d'entreprise est une approche particulière de la mémoire d'entreprise préconisant donc de matérialiser cette dernière par :

- *des ressources* (celles-ci peuvent être des documents, mais aussi ces ressources peuvent correspondre à des personnes, des services, des logiciels ou des programmes);
- *des ontologies* (décrivant le vocabulaire conceptuel partagé par une ou plusieurs communautés dans l'entreprise) ;
- *des annotations sémantiques sur ces ressources* (c'est-à-dire le contenu des documents ou les compétences des personnes ou les caractéristiques des services/logiciels/programmes), en se basant sur ces ontologies ;
- le tout avec diffusion sur l'Internet ou le web d'entreprise [77].

3.4.2 Langages du web sémantique

La proposition du W3C s'appuie au départ sur une pyramide de langages dont seulement les couches basses sont aujourd'hui relativement stabilisées [70]. La Figure 8 montre une des versions de l'organisation en couches proposée par le W3C. Deux types de bénéfices peuvent être attendus de cette organisation :

- Elle permet une approche graduelle dans les processus de standardisation et d'acceptation par les utilisateurs.
- Elle doit permettre à chacun de sélectionner un langage au bon niveau de complexité, celle-ci étant fonction de l'application à réaliser.

Un aspect central de l'infrastructure est sa capacité d'identification et de localisation des diverses ressources. Elle repose sur la notion d'URI (Uniform Resource Identifier) qui permet d'attribuer un identifiant unique à une ressource sur le Web, mais aussi dans d'autres domaines. Un cas particulier est celui des URL qui en plus d'identifier les ressources fournissent un chemin pour y accéder. L'URI est à la base même des langages du W3C [70].

Une autre caractéristique de tous ces langages est d’être systématiquement exprimable et échangeables dans une syntaxe XML ¹⁶. Ceci permet de bénéficier de l’ensemble des technologies développées autour d’XML [70].

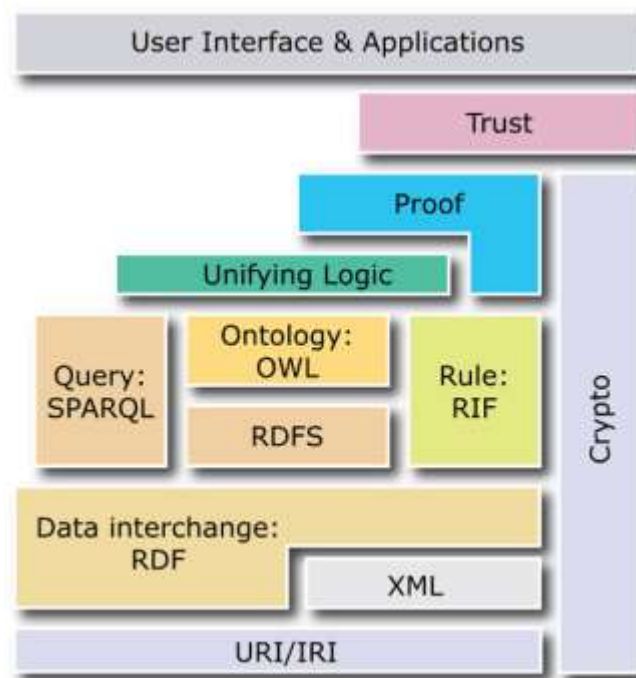


Figure 8 : La pile ou pyramide des langages du web sémantique [44].

Les objectifs de **RDF** ¹⁷ (Resource Description Framework) sont la représentation de l’information et une meilleure exploitation des méta-données. RDF normalisé par le W3C est un modèle conceptuel permettant de *décrire des ressources*, simplement et sans ambiguïté sous forme de triplets. Ses applications visent initialement le web sémantique mais elles peuvent s’étendre plus largement à l’ingénierie des connaissances.

RDFS¹⁸ (RDF Schema), fondé sur RDF, permet de définir des vocabulaires. C’est un des piliers du web sémantique puisqu’il permet de déclarer des concepts, définis par rapport à d’autres concepts et ayant la particularité d’être partagés à travers le web. Mais RDFS ne permet que de décrire des vocabulaires simples.

OWL¹⁹ (Web Ontology Language) est un langage basé sur RDF. Il enrichit le modèle RDFS en définissant un vocabulaire riche pour la description d’ontologies complexes. OWL est basé sur une sémantique formelle définie par une syntaxe rigoureuse.

¹⁶ <http://www.w3.org/XML/>

¹⁷ <http://www.w3.org/RDF/>

¹⁸ <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

¹⁹ <http://www.w3.org/2004/OWL/>

Comparaisons entre OWL et RDFS

RDFS définit le plus petit nombre de notions et de propriétés nécessaires à la déclaration d'un vocabulaire simple, essentiellement :

- les notions de classe, ressource, littéral;
- les propriétés de sous-classe, de sous-propriété, de champ de valeur, de domaine d'application.

OWL est un langage beaucoup plus riche qui, aux notions définies par RDF Schema, ajoute les propriétés de classe équivalente, de propriété équivalente, d'identité de deux ressources, de différences de deux ressources, de contraire, de symétrie, de transitivité, de cardinalité, etc., permettant de définir des rapports complexes entre des ressources.

RIF²⁰ (Rule Interchange Format) est un langage universel d'échange de règles pour les systèmes de raisonnement. La syntaxe de RIF est XML et il est compatible avec aux autres standards du web sémantique qui sont RDF, RDFS, OWL. Il propose une résolution des problèmes d'échange de règles par plusieurs dialectes, les trois suivantes sont prédéfinies : RIF-CORE, RIF-BLD et RIF-PRD. D'autres dialectes peuvent être définis à partir de l'extension de RIF-FLD (RIF framework for logic dialect). RIF-BLD vient de RIF-FLD.

SPARQL²¹ (Simple Protocol And RDF Query Language) est un langage de requête pour RDF, sur le point d'être normalisé dans le cadre de l'activité Web sémantique du W3C.

Le langage SPARQL définit le protocole, la syntaxe et la sémantique nécessaire à l'expression et l'envoi de requêtes à une base de données de type RDF et la forme possible des résultats.

SPARQL permet d'exprimer des requêtes interrogatives, constructives ou existentielles:

- Une requête *SELECT*, de type interrogative, permet d'extraire du graphe RDF un sous graphe correspondant à un ensemble de ressources vérifiant les conditions définies dans une clause *WHERE*.
- Une requête *CONSTRUCT*, de type constructive, engendre un nouveau graphe qui complète le graphe interrogé.
- Une requête *ASK* permet de savoir s'il existe au moins une réponse.

3.4.3 Recherche sémantique

La recherche sémantique a pour objectif d'améliorer la précision de recherche par la compréhension de l'objectif de recherche et la signification contextuelle des termes tels qu'ils

²⁰ <http://www.w3.org/2005/rules/wg/charter>

²¹ <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

apparaissent dans l'espace de données recherché, que ce soit sur le web ou dans un système fermé, afin de générer des résultats plus pertinents. L'auteur Seth Grimes liste le "onze (11) approches qui lie la sémantique à la recherche²²", et (Hildebrand et al.²³) donnent un aperçu qui liste les systèmes de recherche sémantique et identifie d'autres utilisations de la sémantique dans le processus de recherche [wikipédia, (date de consultation 15/01/2014)]. (Guha et al.²⁴) distinguent deux formes principales de recherche: la recherche par navigation et la recherche par mot clé. Dans la recherche par navigation, l'utilisateur utilise le moteur de recherche comme outil de navigation pour trouver le document ciblé. Dans la recherche sémantique, l'utilisateur fournit au moteur de recherche une phrase qui est destinée à désigner un objet sur lequel l'utilisateur tente de recueillir de l'information et de recherche. Il n'y a pas de document particulier que l'utilisateur connaît à ce sujet. Au contraire, l'utilisateur tente de localiser un certain nombre de documents qui, lui donne les informations qu'il essaie de trouver. La Recherche sémantique se prête bien ici [wikipédia, (date de consultation 15/01/2014)].

3.4.3.1 Moteur d'inférence

Un moteur d'inférence (du verbe « inférer » qui signifie « déduire ») est un logiciel correspondant à un algorithme de simulation des raisonnements déductifs. Un moteur d'inférence permet aux systèmes experts de conduire des raisonnements logiques et de dériver des conclusions à partir d'une base de faits et d'une base de connaissances [wikipédia, (date de consultation 15/01/2014)].

Un moteur d'inférence pour le langage RDF, dédié aux applications web sémantique d'entreprise ou d'organisation est CORESE (COncceptual REsource Search Engine) [66]. Il permet aussi la recherche d'information basée sur des modélisations de connaissances, des modèles conceptuels ou des référentiels métiers et organisationnels.

3.4.3.2 Distance sémantique

Selon [29] deux grandes familles d'approches peuvent être identifiées pour le calcul de distances sémantiques:

- celles qui incluent des informations externes à la hiérarchie, ex: des statistiques sur l'utilisation des types de concepts [74] et [45];
- les approches reposant uniquement sur la hiérarchie [73] et [88].

Ces deux approches peuvent être combinées pour former une approche hybride [52].

²²[Breakthrough Analyse: Deux + neuf types de recherche sémantique \(2010\)](#)

²³[Etude sur la Recherche sémantique \(2007\)](#)

²⁴[Semantic Search, R. Guha, Rob McCool, Eric Miller, 2003](#)

Pour les approches reposant uniquement sur la hiérarchie, [43] propose une distance atténuée par la profondeur des types dans l'ontologie pour construire une mesure de similarité entre graphes conceptuels. Cette approche est utilisée par CORESE [16] pour calculer une distance sémantique entre un concept requête et un concept cible. Cette distance utilisée par défaut par CORESE est définie comme la plus petite somme des longueurs des chemins entre chacun des types des concepts et leur plus précis super-type commun. La longueur d'un chemin est la somme des longueurs élémentaires entre les types des concepts. La longueur d'un arc entre un fils et un père de profondeur d est $1/2^d$. Ainsi la distance décroît avec la profondeur.

$$\forall (t_1, t_2) \in H_c^2; t_1 \leq t_2 \text{ on a } l_{H_c}(t_1, t_2) = \sum_{\{t \in \langle t_1, t_2 \rangle, t \neq t_1\}} \left[\frac{1}{2^{\text{depth}(t)}} \right] \quad (1)$$

avec H_c la hiérarchie des types de concepts, le chemin le plus court entre t_1 et t_2 , et $\text{depth}(t)$ la profondeur de t dans l'ontologie *i.e.* le nombre d'arcs sur le chemin le plus court entre t et la racine T

$$\forall (t_1, t_2) \in H_c^2 \text{ on a } \text{dist}(t_1, t_2) = \min_{\{t \geq t_1, t \geq t_2\}} (l_{H_c}(t_1, t) + l_{H_c}(t_2, t)) \quad (2)$$

Équation 1 : Distance sémantique de CORESE (tirée de [29])

Pour comprendre la définition de cette distance par défaut de CORESE, utilisons-la pour calculer la distance sémantique entre les deux concepts « Acteur_international » et « Chef_quartier » de la hiérarchie de concepts ci dessous, voir la Figure 9, un extrait de l'ontologie du domaine du changement climatique.

Ces deux concepts ont un super type commun, le concept « Acteur ». On met ensuite les coefficients de proximité ($1/2^0 = 1$, $1/2^1 = 1/2_1 = 0,5$ et $1/2^2 = 1/2_2 = 0,25$) suivant les profondeurs (0, 1, 2) des autres concepts par rapport au concept « Acteur ». Enfin en calculant la somme des coefficients de proximité de ce plus court chemin entre « Acteur_international » et « Chef_quartier », on a :

$$D_H(\text{Acteur_international}, \text{Chef_quartier}) = 2.75$$

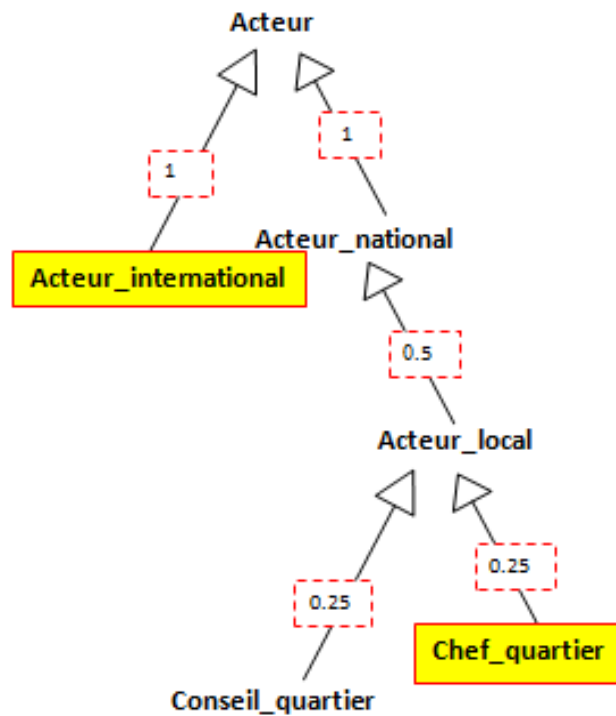


Figure 9 : La distance sémantique entre deux concepts d'une hiérarchie

Cette distance atténuée par la profondeur des types dans l'ontologie permet de mesurer la proximité entre des concepts d'une hiérarchie dans cette ontologie. Dans le chapitre 6, nous utilisons cette approche de la distance atténuée par la profondeur pour formaliser une distance sémantique entre les mots clés dans la description des ressources dans Catalog2C.

3.5 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté les enjeux de la gestion des connaissances, donné des définitions de l'ontologie, présenté le web sémantique et ses outils et langages entre autres. En effet, le système de gestion des connaissances du changement climatique que nous avons proposé est un web sémantique d'entreprise ou d'organisation dont l'architecture est proposée dans le chapitre 5.

La partie sur les types d'ontologies et méthodologies de construction d'ontologies expliquées dans ce chapitre donne les bases de l'ingénierie utilisée dans le chapitre 6 pour la construction du patron de conception d'ontologies du CC.

Dans ce chapitre nous avons aussi parlé de recherche sémantique et de distance sémantique car toutes ces notions sont utilisées dans le chapitre 7.

Chapitre 4

Les ontologies et la simulation multi-agent

La simulation est définie dans [6] comme la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues.

Il existe plusieurs approches pour la simulation des modèles dont parmi les plus connus sont les approches analogique, stochastique et multi-agent. Pour la simulation des systèmes complexes l'approche multi-agent apporte des solutions aux limites des autres approches dont l'approche stochastique, le plus connu qui a fait l'objet de beaucoup de travaux et pour qui dans [6], l'auteur donne ses limites qui sont :

- la difficulté de mettre en relation des causes et des effets définis à des niveaux (micro ou macro) différents.
- la prise en compte de la complexité de certains phénomènes amène souvent à définir des paramètres non réalistes dont le rapport à la réalité n'est pas vraiment évident.
- difficulté de prendre en compte le comportement, c'est à dire les activités individuelles qui ont pour résultat une modification du système.
- l'utilisation de paramètres quantitatifs alors que la plupart des interactions entre individus réels, que ce soit en sociologie ou en éthologie, impliquent tant de non-

linéarité (comme la connaissance) qu'elles ne sont pas analysables avec les outils mathématiques dont nous disposons.

L'approche simulation multi-agent apportant des solutions et est adaptée pour l'étude des modèles de systèmes complexes. Elle offre un cadre conceptuel applicable aux domaines des sciences de l'homme et de la nature [6].

Les connaissances, représentable par une ontologie, sont importantes voir indispensables dans l'étude des systèmes multi-agents (SMA) mais elles sont utilisées plus dans les autres applications des SMA que dans la simulation multi-agent.

Ce chapitre fait un état de l'art pour savoir comment les ontologies sont utilisées dans un système multi-agent et particulièrement dans la simulation multi-agent qui est une application des SMA. Ainsi, dans la section 4.1, nous présentons les systèmes multi-agents. Nous revenons sur la simulation multi-agent au niveau de la section 4.2. Les ontologies dans les SMA et la simulation des systèmes complexes sont présentées dans la section 4.3.

4.1 Les systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents peuvent être vus comme la rencontre de divers domaines [wikipédia, (date de consultation : 19/01/2014)] :

- l'intelligence artificielle pour les aspects prise de décision de l'agent ;
- l'intelligence artificielle distribuée pour la distribution de l'exécution ;
- les systèmes distribués pour les interactions ;
- le génie logiciel pour l'approche *agents* et l'évolution vers des composants logiciels de plus en plus autonomes ;
- Les objets communicants.

Le rôle des SMA est de donner des moyens pour traiter des problèmes pour lesquels nous ne sommes pas en mesure de déterminer à l'avance ce que serait une bonne solution ou quel serait le moyen d'y parvenir [47].

4.1.1 Les dimensions d'un SMA

Le domaine des SMA a beaucoup évolué depuis sa création. Ce qui fait que, aujourd'hui un SMA ne se résume plus à la simple mise en commun d'agents autonomes au sein d'un environnement [47]. Dans l'approche Voyelles [92], l'auteur distingue quatre dimensions orthogonales qui interviennent dans l'analyse, la conception, l'implémentation et l'exécution

d'un système multi-agent : l'Agent, l'Environnement, l'Interaction et l'Organisation (A+E+I+O), voir la Figure 10.

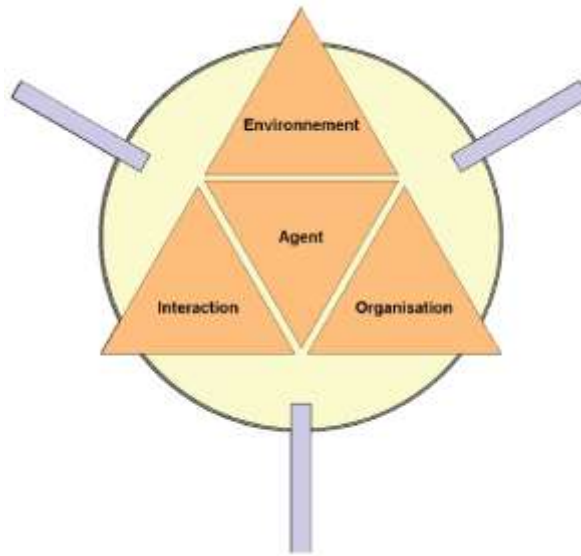


Figure 10: L'approche Voyelles (tirée de [47])

Chacune de ces dimensions de Voyelle constitue aujourd'hui, selon [47], un axe de recherche spécifique pour les SMA. Dans la suite nous présentons ces quatre dimensions d'un SMA en nous référant à [47].

Dimension Agent

C'est sur cette dimension que l'effort a été le plus important. Elle comprend les éléments qui sont nécessaires à la définition d'un agent autonome, c'est-à-dire son architecture interne, les mécanismes qu'il met en œuvre pour raisonner et produire son comportement, ses représentations de la connaissance, etc.

Dans [81], les auteurs décrivent un agent de la manière suivante: « *Un agent est tout ce qui peut être considéré comme percevant son environnement grâce à des capteurs et agissant sur l'environnement par des effecteurs* ». Cette relation générale entre un agent et son environnement est illustrée par la Figure 11.

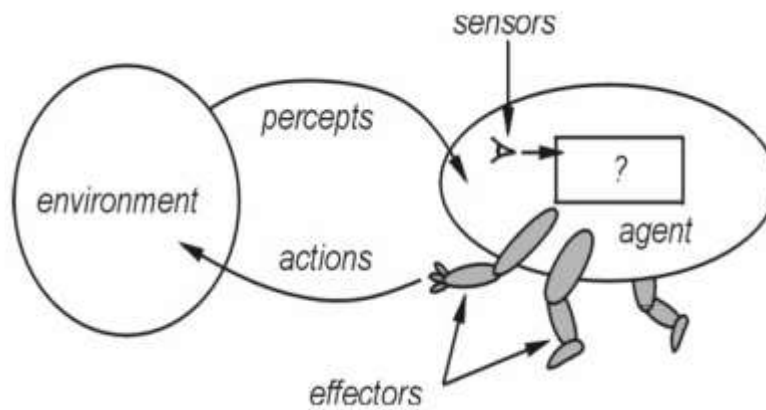


Figure 11: Interaction entre un agent et son environnement (tirée de [47])

Dimension Environnement

L'environnement est le contexte pour les activités et les interactions des agents. Il peut être le monde réel ou bien un univers virtuel modélisé de manière informatique. Sans environnement il n'y a pas d'action ou de perception possible, on ne peut donc pas parler d'agent sans parler d'environnement [19].

Dimension Interaction

Cette dimension comprend les moyens par lesquels les agents peuvent interagir. L'interaction a été étudiée principalement pour faciliter la *coordination* et la *coopération* entre les agents. Les travaux dans cette voie ont notamment donné naissance aux *langages de communication*, ainsi qu'aux *protocoles d'interaction* [47].

Dimension Organisation

Certains travaux ont mis en évidence l'intérêt de considérer la dimension sociale d'un SMA, d'une part pour structurer explicitement le système, et d'autre part pour réguler l'activité des agents tout en préservant leur autonomie. Ces travaux se sont largement inspirés de la sociologie, on parle de la « métaphore sociale ». Les principales notions qui ont été proposées dans cette direction sont les *organisations*, les *normes*, les *engagements sociaux* et les *institutions* [47].

4.1.2 Les applications des SMA

Selon [42], on peut considérer qu'il existe cinq grandes catégories d'applications des systèmes multi-agents: la résolution de problèmes au sens large, la simulation multi-agent, la construction de mondes hypothétiques, la robotique distribuée et la conception génétique de programmes (Figure 12).

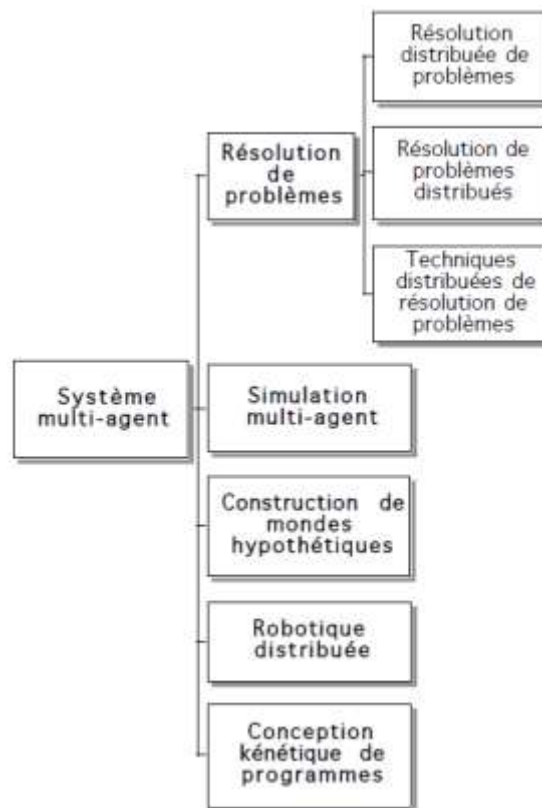


Figure 12 : Une classification des différents types d'application des systèmes multi-agents (tirée de [42])

Les explications suivantes sur la résolution de problèmes au sens large, la simulation multi-agent, la construction de mondes hypothétiques, la robotique distribuée et la conception génétique de programmes sont tirées de [42] :

- **La résolution de problèmes au sens large** concerne en fait toutes les situations dans lesquelles des agents logiciels accomplissent des tâches utiles aux êtres humains. Cette catégorie s'oppose aux applications de robotique distribuée en ce sens que les agents sont purement informatiques et n'ont pas de structure physique réelle. La terminologie anglo-saxonne en appelant ces techniques "distributed problem solving" reste assez ambiguë. Il existe en effet deux manières de traduire cette appellation: soit par "résolution distribuée de problèmes", soit par "résolution de problèmes distribués". Ces deux traductions se rapportent à deux grandes classes d'applications. Dans la première, l'expertise globale est distribuée parmi l'ensemble des agents, chacun n'ayant qu'une compétence restreinte par rapport à l'ensemble du problème à résoudre. On appelle aussi cette forme "coopération de spécialistes". Dans la seconde au contraire, c'est le problème qui est lui-même distribué, les agents pouvant avoir des compétences semblables. Enfin, il existe une autre classe de problèmes dans laquelle

on utilise des agents en interaction pour résoudre des problèmes classiques, c'est la résolution par coordination.

- **La simulation multi-agent** est fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter sous forme informatique le comportement des entités qui agissent dans le monde et qu'il est ainsi possible de représenter un phénomène comme le fruit des interactions d'un ensemble d'agents disposant de leur propre autonomie opératoire. Par exemple, dans un modèle multi-agent de population, on représentera directement les individus sous la forme d'agents et la quantité d'individus d'une espèce donnée sera le résultat des confrontations (coopération, lutte, reproduction) des comportements de tous les individus représentés dans le système.
- **La construction de mondes hypothétiques** ne s'agit pas d'applications à proprement parler, puisqu'elle ne permet pas de résoudre un problème concret, n'utilisent pas d'agents physiques et ne simulent aucun monde réel, la construction de mondes synthétiques tient une large part dans les recherches portant sur les systèmes multi-agents parce qu'elle permet d'analyser certains mécanismes d'interaction de manière plus fine que ne pourrait le faire une véritable application. Par exemple, l'analyse de protocole de coopération ou la compréhension de l'influence du comportement sur la régulation d'une société sont souvent plus parlant sur des mondes "virtuels" que sur des applications immédiatement rentables.
- **La robotique distribuée** porte sur la réalisation non pas d'un seul robot, mais d'un ensemble de robots qui coopèrent pour accomplir une mission. A la différence du domaine d'application précédent (la construction de mondes hypothétiques), la robotique distribuée utilise des agents concrets qui se déplacent dans un environnement réel.
- **La conception kénétique de programmes** a parmi ses ambitions de prôner un nouveau mode de conception de systèmes informatiques, cherchant à dépasser les techniques informatiques actuelles pour réaliser des logiciels distribués fonctionnant avec une grande souplesse et une grande adaptabilité à leur environnement. L'objectif alors de ce que j'appellerai la conception kénétique de logiciels est de donner naissance à des systèmes informatiques capables d'évoluer par interaction, adaptation et reproduction d'agents relativement autonomes et fonctionnant dans des univers physiquement distribués.

4.1.3 Plateformes de développement de systèmes multi-agents

Il existe plusieurs plateformes pour le développement des systèmes multi-agents, nous proposons ici cette liste proposée et commentée dans [wikipédia (date de consultation : 26/01/2014)] :

- **AnyLogic** - Logiciel de simulation multi-agents et multi-méthode.
- **CORMAS** (COMmon Resources Multi-Agent System) est un framework de développement de systèmes multi-agents, open-source et basé sur le langage de programmation orientée objet SmallTalk. Spatialisé, il est centré sur des problématiques de recherche en sciences du développement et de négociation entre acteurs.
- **DoMIS** est un outil permettant la conception de Systèmes Multi-agents (orientés "pilotage opérationnel de systèmes complexes") et basé sur la méthode de conception B-ADSc (voir Analyse décisionnelle des systèmes complexes). Axé sur la conception, DoMIS permet l'établissement de spécifications utilisables par toute plateforme de développement capable de simuler, au mieux, le temps réel.
- **JACK** est un langage de programmation et un environnement de développement pour agents cognitifs, développé par la société Agent Oriented Software comme une extension orientée agent du langage Java.
- **GAMA** est une plateforme de simulation open-source (LGPL) proposant un environnement de modélisation à base d'agents spatialement explicites (Utilisation de données SIG pour la description des agents et de leur environnement). Développée par l'IRD/UPMC au sein de l'unité mixte internationale UMMISCO.
- **JADE** (Java Agent DEvelopment) est un framework de développement de systèmes multi-agents, open-source et basé sur le langage Java. Il offre en particulier un support avancé de la norme FIPA-ACL, ainsi que des outils de validation syntaxique des messages entre agents basé sur les ontologies.
- **Jadex**, est une plate-forme agent développée en JAVA par l'université de Hambourg qui se veut modulaire, compatible avec de nombreux standards et capable de développer des agents suivant le modèle BDI.
- **JAgent** est un framework open source réalisé en Java dont l'objectif est de faciliter le développement et le test de systèmes multi-agents.

- **Janus** est une plateforme multi-agents modulaire écrite en Java. Elle permet de créer des systèmes multi-agents avec ou sans une approche organisationnelle basée sur le modèle (en) Capacité-Rôle-Interaction-Organisation (CRIO). Janus propose également un modèle de simulation de système holonique assimilant les agents à des holons (ou agents récursifs). Janus est extensible grâce à son utilisation de modules OSGi et propose le support réseau via la bibliothèque JXTA. Une méthodologie nommée (en) ASPECS peut être associée à Janus. Cette plateforme est développée conjointement par (en) ICAP-SeT-UTBM en France et le (es) CITAT en Argentine.
- **Jason** est un environnement *open source* de développement d'agents dans le formalisme AgentSpeak, et développé en Java par Jomi Fred Hübner et Rafael H. Bordini.
- **MadKit** est une plate-forme multi-agents modulaire écrite en Java et construite autour du modèle organisationnel Agent/Groupe/Rôle. C'est une plate-forme libre basée sur la licence GPL/LGPL développée au sein du LIRMM.
- **MAGIQUE** est une plate-forme pour agents physiquement distribués écrite en Java et fournissant un modèle de communication original d'appel à la cantonade. Dans MAGIQUE, les compétences sont dissociées des agents. L'architecture des agents et les différentes compétences sont développées séparément. Les compétences sont ensuite greffées comme plugin dans les agents au gré du concepteur. Cette plate-forme est développée au sein du LIFL.
- **OMAS**, *Open Multi-Agent Asynchronous Systems* est une plate-forme de recherche développée par l'équipe d'intelligence artificielle de l'Université de technologie de Compiègne, sous la direction de Jean-Paul Barthès.
- **SemanticAgent** est basé sur JADE et permet le développement d'agents dont le comportement est représenté en SWRL. SemanticAgent est développé au sein du LIRIS, il est open-source et sous licence GPL V3.
- **SPADE** est un environnement de développement d'organisations multi-agents basé sur le protocole XMPP et est écrit en Python.
- **MASSIVE** (logiciel) est un logiciel pour la simulation de foule, basé multi-agents, qui a permis la création d'effets spéciaux dans un grand nombre de films, ayant été développé à l'origine pour les scènes de combat dans *Le Seigneur des anneaux*.

- **Golaem Crowd** est un plug-in pour Maya (logiciel) basé multi-agent et permettant d'effectuer des simulations de foule pour les effets spéciaux directement dans Maya.

Un comparatif des plates-formes et d'outils de modélisation orientés-agent (Comparison of agent-based modeling software) est disponible dans [wikipédia (date de consultation : 26/01/2014)].

Dans cette thèse, nous utilisons le framework de développement de systèmes multi-agents JADE pour le développement de la plateforme de simulation multi-agent sémantique pour les modèles de systèmes complexes du changement climatique (chapitre 9) basé sur l'architecture d'un SMA sémantique que nous proposons dans le chapitre 8.

4.2 La simulation multi-agent

Les approches de simulation sont nombreuses. Dans cette partie nous allons revenir sur les deux approches de simulation très utilisées (analogique et stochastique) avant de présenter l'approche multi-agent dans laquelle s'intègrent des contributions de cette thèse.

L'approche analogique consiste en une reconstruction du phénomène à simuler, reconstruction qui permettra, au moment de l'expérimentation, de s'affranchir de certains problèmes qui conduisaient à des impossibilités techniques dans cette même réalité. Il s'agit donc là de simuler un phénomène réel par un autre phénomène réel. L'approche analogique nécessite de connaître parfaitement la nature et la forme des phénomènes à modéliser, afin de pouvoir les simuler par des dispositifs physiques analogues [6]. Dans le cas de la simulation de systèmes complexes dont les éléments agissent et interagissent simultanément, cette approche analogique montre des limites.

L'approche stochastique représente, selon [6], la réalité sous la forme d'un ensemble de paramètres numériques et d'un ensemble de relations mathématiques qui décrivent la manière dont certains de ces paramètres, appelés causes, agissent sur d'autres, appelés effets. A certains égards, le point de vue de la simulation stochastique sur le phénomène qu'elle doit simuler apparaît comme un point de vue macroscopique, en ce qu'elle tente de faire apparaître des tendances, des rythmes ou des cycles dans le phénomène en question ou encore de déterminer l'influence sur ce phénomène de telle variable ou ensemble de variables macroscopiques (comme le taux de mortalité ou l'effectif d'une population), sans se préoccuper des médiations microscopiques (comme les comportements individuels, les interactions entre éléments du système) responsables de ces relations [6].

Une approche multi-agent permet de représenter les systèmes complexes [6], complexes au sens de [49] cité dans [6], c'est à dire des phénomènes dont le ou les modes d'organisation résultent d'interactions entre composants de bas niveau, dans la mesure où un modèle multi-agents ne présuppose aucun niveau donné d'organisation.

Les systèmes multi-agents apportent une solution radicalement nouvelle au concept même de modèle et de simulation dans les sciences de l'environnement, en offrant la possibilité de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions [42]. La simulation multi-agent est fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter sous forme informatique le comportement des entités qui agissent dans le monde et qu'il est ainsi possible de représenter un phénomène comme le fruit des interactions d'un ensemble d'agents disposant de leur propre autonomie opératoire. Par exemple, dans un modèle multi-agent de population, on représentera directement les individus sous la forme d'agents et la quantité d'individus d'une espèce donnée sera le résultat des confrontations (coopération, lutte, reproduction) des comportements de tous les individus représentés dans le système [42].

L'intérêt de ces simulations est de pouvoir considérer aussi bien des paramètres quantitatifs (c'est-à-dire des paramètres numériques) que qualitatifs (des comportements individuels faisant éventuellement appel à des raisonnements stratégiques). Ce qui fait qu'on l'appelle parfois de modèles micro-analytiques ou de simulation individu-centrée pour bien indiquer que les représentations se situent au niveau de l'individu, ces derniers interagissant aussi bien entre eux qu'avec l'environnement simulé. Pour [42] les simulations multi-agents sont des constructions de "micro-mondes artificiels", dont il est possible de contrôler toutes les caractéristiques et de reproduire des séries d'expérimentations comme s'il s'agissait de situations de laboratoire. ajout qu'on se trouve dans la simulation multi-agent en présence d'une modélisation analogique, semblable aux maquettes de format réduit utilisées en aéronautique ou en construction navale, la différence essentielle provenant du fait que le modèle réduit est exprimé sous la forme d'une entité informatique et non d'une structure physique.

Les systèmes multi-agents permettent la modélisation de situations complexes dont les structures globales émergent des interactions entre individus, c'est-à-dire de faire surgir des structures du niveau macro à partir de modélisations du niveau micro, brisant ainsi la barrière des niveaux, si criante dans les modélisations classiques [42]. Dans ces systèmes multi-agents les connaissances sont déterminantes sur les résultats obtenus au niveau macro si les éléments au niveau micro (les individus) y accèdent. De nombreux travaux dans les SMA vont dans ce sens, dans la section suivante nous faisons un état des travaux sur l'utilisation des ontologies

(représentation des connaissances) dans ces systèmes multi-agents en général et dans la simulation multi-agent en particulier.

4.3 Les ontologies dans les systèmes multi-agents et la simulation multi-agent des systèmes complexes

La notion de connaissance, telle qu'elle s'est développée en intelligence artificielle selon [42], peut-être définie comme l'ensemble des informations (savoir, savoir-faire, expérience, souvenirs, concepts, faits...) nécessaires à un être humain (ou à une machine) organisées de manière à ce qu'il puisse accomplir une tâche considérée comme complexe.

Par exemple, diagnostiquer une maladie, résoudre un problème de mathématique, réparer une machine, traiter un cas juridique, gérer un ensemble de comptes financiers, faire une campagne de marketing ou traduire un texte sont des activités, qui, lorsqu'elles sont réalisées par des êtres humains, réclament une grande quantité de compétences et d'informations organisées dans un but précis [42].

De ce fait, au terme de "connaissance" est associé une dimension pragmatique, c'est-à-dire de savoir spécialiste qui s'applique dans un domaine particulier pour effectuer une tâche précise, explique [42] toujours pour qui, la connaissance d'un agent ne se limite pas à celle des tâches qu'il accomplit: il faut aussi inclure les informations concernant le monde qui l'entoure, c'est-à-dire son environnement et les autres agents avec lesquels il communique et interagit.

Ainsi dans les SMA les connaissances du domaine de l'environnement, représentables dans une ontologie de domaine, doivent être accessibles aux agents dans leurs communications et comportements comme ressenti par [69], déclarant : « *les agents doivent comprendre leur environnement* ». Dans ce souci, [47] ajoute que « *l'environnement doit définir une ontologie qui fournit une représentation conceptuelle du domaine. Cette ontologie doit permettre de décrire la structure de l'environnement, les propriétés observables des objets, des ressources et des agents et leurs relations.* »

La problématique de l'agent et de sa relation au monde lors de la création de systèmes multi-agents est une des cinq problématiques principales relevées dans [wikipédia, (date de consultation 15/01/2014)]. La relation de l'agent au monde qui est représentée par le modèle cognitif dont dispose l'agent. L'individu d'une société multi-agent doit être capable de mettre en œuvre les actions qui répondent au mieux à ses objectifs. Cette capacité à la décision est liée à un "état mental" qui reflète les perceptions, les représentations, les croyances et un certain nombre de paramètres "psychiques" (désirs, tendances...) de l'agent. La problématique de l'individu et de sa relation au monde couvre aussi la notion d'engagement de l'agent vis-à-

vis d'un agent tiers [wikipédia, (date de consultation 15/01/2014)]. Sauf pour des agents réactifs simples, un agent se trouve à un certain moment dans un certain "état mental" qui résulte de sa propre histoire, de sa perception du monde et de ses interactions avec le monde et avec les autres agents. Ces états mentaux sont souvent très complexes et font intervenir un grand nombre d'éléments dont la combinaison explique le comportement d'un agent "de l'intérieur" [42].

Des travaux sur le domaine des SMA intègrent les connaissances par l'intermédiaire des ontologies. Ces travaux donnent de plus en plus une place aux ontologies qui sont une représentation des connaissances. Cette place est surtout pour la résolution de problèmes au sens large. Dans ce sens nous avons rencontré des travaux sur la communication entre les agents pour l'intégration de systèmes dans le cas de mémoire d'entreprise [25], le déploiement de SMA [17], SemanticAgent [82]. Dans [82], les auteurs citent les travaux suivants : TAGA [91] utilise OWL et RDF pour la représentation des connaissances dans le domaine de la compétition de l'agent commercial, AgentOWL [60] qui étend JADE avec le soutien d'OWL pour sa base de connaissances, Knowledge agents introduites par [90], sont utilisés pour le domaine spécifique de la recherche sur le web.

Dans le domaine de la simulation multi-agent les travaux trouvés sont pour la gestion des agents - identification des agents [8] ou pour la modélisation [55]. Ces travaux que nous avons rencontrés ne sont pas pour permettre aux agents dans la simulation multi-agent d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement d'exécution dans leurs communications et leurs comportements.

4.4 Conclusion

Dans cette thèse un des objectifs est d'ajouter, en plus des quatre dimensions connues dans l'approche voyelle, une nouvelle dimension, l'environnement abstrait représenté par une (des) ontologie (s) qui va permettre aux agents dans la simulation multi-agent d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement.

Dans le chapitre 8, nous proposons une architecture d'un SMA sémantique ajoutant les connaissances du domaine de l'environnement des agents au système multi-agent en représentant cet environnement abstrait par un agent appeler *agent ciel sémantique*. Le chapitre 9 est une application de cette architecture pour la simulation des systèmes multi-agents dans le domaine du changement climatique.

Deuxième partie

Gestion des connaissances du domaine
multidisciplinaire et complexe du
changement climatique

Chapitre 5

Une architecture d'un système de gestion des connaissances du changement climatique

Le domaine du changement climatique dispose de beaucoup de ressources (données, modèles, services web, expertises, etc.) propriétaires, distribuées et aux formats hétérogènes, de plus ces ressources ne sont décrites que partiellement. Ceci explique la difficulté d'identification de ressources de partenaire dans ce domaine du changement climatique.

La gestion des connaissances du changement climatique peut apporter des réponses à l'identification des compétences et de façon plus générale à l'identification des ressources de partenaires dans le domaine du changement climatique (par le catalogage et la recherche sémantique de ces ressources), à la simulation de systèmes complexes en intégrant une dimension ontologie du domaine de l'environnement dans les systèmes multi-agents (SMA), à l'intégration et au partage de connaissances, à l'aide à la décision et à l'évolution des connaissances de ce domaine. Ainsi les défis de la gestion des connaissances du changement climatique sont grands et pressants.

L'objectif de cette thèse est d'aller vers un système de gestion des connaissances du changement climatique qui permettra, entre autres, l'identification de compétences, de sources de données et de modèles, la simulation sémantique de systèmes complexes, l'intégration et le partage des connaissances et l'aide à la décision.

Notre approche pour la gestion des connaissances du changement climatique est une approche web sémantique d'organisation (web sémantique d'entreprise) [77] (c'est-à-dire, le système de gestion des connaissances que nous proposons utilise les outils et langage du web sémantique) et elle se base sur l'utilisation des ontologies de ce domaine. Ce qui favorise le partage et l'intégration des ressources de partenaires du changement climatique à travers le web.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'architecture générale et fonctionnelle du système de gestion des connaissances que nous proposons pour le domaine du changement climatique. Ensuite nous faisons une discussion pour montrer les intérêts d'un tel système web sémantique pour le domaine du changement climatique avant de terminer par une conclusion.

5.1 Architecture générale et fonctionnelle

Pour présenter cette architecture, nous proposons de voir dans cette section ses différents éléments qui sont les ressources disponibles, les modules et les communicants entre les modules, les théories, formalismes, méthodes, architectures, etc. nécessaires à la réalisation des modules, les services et les utilisateurs (décideurs et experts) accédant au système par les services.

5.1.1 Les ressources du système de gestion des connaissances

Les ressources d'un système sont les éléments qui fournissent ce dont on a besoin pour la réalisation de ce système. Les ressources du système de gestion des connaissances se présentent de différentes façons :

- **les sources de données, des modèles et des expertises** sont hétérogènes, propriétaires et distribués et peuvent être partagés et intégrés pour découvrir les connaissances qu'ils contiennent.
- **les Experts** sont des acteurs centraux dans le système. Ils participent à la construction des ontologies du domaine du CC et à aux évolutions de ces ontologies dans des contextes d'utilisation différent par les modules.
- **les Ingénieurs de connaissances** sont dans toutes les phases de la réalisation du système de gestion des connaissances : la construction, l'utilisation par les modules (catalogage des sources de données et des modèles, recherche sémantique, simulation sémantique, intégration des données et des modèles et aide à la décision, etc.) et maintenance des ontologies ;

- **Internet / Intranet** est l'espace favorisant la communication et l'échange entre les ressources (experts, ingénieurs de connaissances, sources de données, modèles, ...), les modules, les services, les utilisateurs finaux et les administrateurs de ce système.

Ces ressources permettent la gestion des connaissances en passant par plusieurs modules du SGC du changement climatique. Dans la suite de cette section, nous regardons les différents modules du système de gestion des connaissances.

5.1.2 Les modules du SGC du CC

Le terme module en programmation identifie une structure de programmation. Un module est comme un bloc de fonction. Nous avons sept (7) modules dans le système de gestion des connaissances du changement climatique :

- **le module de représentation des connaissances générique du CC** permet aux ingénieurs de connaissances et aux experts de construire l'ontologie noyau du domaine du changement climatique qui contient pour cela les concepts et les relations génériques permettant seulement de comprendre le changement climatique. Cette ontologie noyau est un patron de conception d'ontologies et est fait pour être réutilisable dans la construction des ontologies du domaine du CC pour les modules du système et pour d'autres cas d'utilisations aussi.
- **le module de catalogage des ressources de partenaires** permet à des partenaires du CC de déclarer leurs ressources (sources de données, modèles et expertises). Pour la déclaration de chaque ressource, il faut donner des mots clés qui informent sur le contenu de la ressource décrite. C'est ce catalogue des ressources qui est partagé par tous les partenaires et non les données, les modèles et les expertises. Ce choix de partager les descriptions est motivé par le fait que les ressources des partenaires sont le plus souvent des ressources propriétaires ;
- **le module de recherche sémantique** part de l'hypothèse que les mots clés données lors de la déclaration des ressources appartiennent au vocabulaire du domaine et donc sont des labels de concepts de l'ontologie de ce domaine construit avec le module : Représentation des connaissances générique du CC. Ainsi, ce module permet aux experts partenaires de faire de la recherche sémantique sur les ressources pour identifier des compétences, des sources de données, des modèles, des services web, à partir du catalogue et aussi à partir de l'intégration des ressources;
- **le module de maintenance des connaissances** permet d'avoir des rapports d'évaluation des connaissances qui sont des notifications basées sur les statistiques

faites sur l'utilisation des connaissances par les différents modules de ce système. Ces notifications sont proposées par le système aux experts et ingénieurs de connaissances pour faire évoluer les ontologies utilisées par ces différents modules par l'ajout et la suppression, la modification de concepts et de relations de ces ontologies.

- **le module de simulation sémantique** se base sur une théorie qui ajoute une dimension ontologie du domaine de l'environnement aux SMA permettant aux agents d'un SMA d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement d'exécution. Ainsi, elle permet aux experts de simuler leurs modèles en prenant en compte les connaissances du domaine du changement climatique construites à partir du patron de conception d'ontologies du CC.
- **le module d'intégration des ressources de partenaires** permet de faire l'intégration des ressources (des données, des modèles, expertises, services web, etc.) hétérogènes, distribués et propriétaires de partenaires du CC. L'intégration des données constitue un des axes de recherche de notre équipe. Deux thèses, Contribution à la modélisation de dataweb basées sur XML [67] et Vers plus d'automatisation dans la construction de systèmes médiateurs pour le web sémantique : une application des logiques de description [15], qui ont été soutenues, proposent des architectures et systèmes d'intégration de données hétérogènes, distribués et propriétaires.
- **le module d'aide à la décision** se base sur les ressources du changement climatique disponibles et partagées mais aussi sur les autres modules de ce SGC qui sont l'intégration des ressources, la simulation sémantique de modèles de systèmes complexes, la recherche sémantique, la représentation des connaissances du changement climatique entre autres pour aider la prise de décisions des acteurs politiques de la gouvernance des risques et des catastrophes climatiques.

Les modules dans l'architecture du SGC entretiennent des communications. Dans ce qui suit, nous revenons sur ces communications entre les modules.

5.1.3 Les interactions entre les modules du système de gestion des connaissances du changement climatique.

Les interactions entre les modules du SGC du CC sont au nombre de douze (12), notées {(1), (2)...(12)}, voir dans la Figure 15. Elles nous montrent l'utilisation des modules entre eux.

Les interactions (1), (2) et (3) montrent que le module de recherche sémantique du SGC du CC utilise respectivement les autres modules de représentation des connaissances, de catalogage des données et des modèles puis le module d'intégration des données et des modèles. Cela signifie que la recherche sémantique dans le SGC utilise l'ontologie

OntoCLUVA représentant les connaissances du CC pour faire la recherche sémantique sur le catalog2C et les systèmes d'intégration des données et modèles.

Les interactions (4), (5) et (6) sont pour la maintenance des connaissances du CC utilisé dans le catalogue et dans le simulateur sémantique. C'est-à-dire que la maintenance des deux ontologies du domaine du CC construites à partir d'OntoCLUVA est faite de façon semi-automatique (intervention experts) par les applications Catalog2C et SimSem2C qui les utilisent.

Les interactions (7) et (8) montrent que le simulateur sémantique utilise les connaissances représentées par l'ontologie OntoCLUVA et les systèmes d'intégration des données et des modèles.

L'interaction (9) fait voir que l'intégration des données et des modèles utilise les connaissances de ce domaine du CC qui sont partagées par les systèmes à intégrer.

Les interactions (10), (11) et (12) montrent le module d'aide à la décision comme étant au-dessus des autres modules : le but du SGC du CC. Pour cela il utilise la recherche sémantique, l'intégration des données et l'intégration des modèles et la simulation sémantique qui utilisent les connaissances représentées, le catalogue des ressources et la maintenance des connaissances.

5.1.4 Les propositions techniques nécessaires pour la réalisation des modules

Pour passer des modules qui sont une spécification du besoin aux services des utilisateurs du système, nous avons à proposer des techniques (des méthodes, des architectures, des formalismes, etc.).

Nous avons dans le cas du SGC du CC besoin de méthodologies pour la représentation des connaissances et leur maintenance. Nous avons aussi besoin d'une architecture pour le catalogage des données, des modèles et des expertises, d'une architecture pour un système multi-agent sémantique et d'une architecture pour l'intégration des données et des modèles. Nous avons besoin aussi de formalisations de distances sémantiques (par exemple pour déterminer le voisinage d'un mot clé) pour les recherches sémantiques dans le catalogue et le système d'intégration des données et des modèles. Mais aussi un travail de synthèses des connaissances gérées par les modules pour aider à la prise de décisions doit aussi être mené.

5.1.5 Les services et les utilisateurs du SGC

- **Services** : les modules de ce système de gestion des connaissances sont accessibles par des services à travers internet ou intranet.
- **Utilisateurs** accèdent aux modules via les services. Ils sont divisés en deux groupes : les administrateurs et les utilisateurs finaux.

- **Utilisateurs primaires** de la plateforme sont des décideurs, des praticiens, mais aussi des experts du changement climatique pour accompagner la prise de décision.
- **Administrateurs** de ce système sont les Experts et les Ingénieurs de connaissances qui se chargent de la maintenance du système et des connaissances du changement climatique.

Avec ce SGC, nous proposons d'offrir des méthodes et outils pour le partage, l'échange et l'exploitation des sources de données et des modèles développés dans le domaine du CC.

Les éléments de l'architecture du SGC peuvent être vues comme dans différents niveaux d'une pyramide : (1) les besoins et ressources disponibles, (2) les modules, (3) les théories, les méthodes et les architectures (4) les services et (5) le sommet de la pyramide montre l'utilisation des services, voir la Figure 13.

Cette pyramide est une synthèse des contributions pour la réalisation de ce SGC du CC qui sont à plusieurs niveaux. Cela permettra dans la suite, pour d'autres besoins du SGC non encore traités, de pouvoir proposer des méthodes ou architectures, des modules et des services nécessaires et de les intégrer dans ce SGC. Cette pyramide permet de voir notre SGC comme un arbre dont les racines sont les besoins, le tronc est représenté par les méthodes et architectures, les modules sont les branches de l'arbre et les services sont les fruits. Cet arbre grandit au fur et à mesure et donne de plus en plus de fruits.

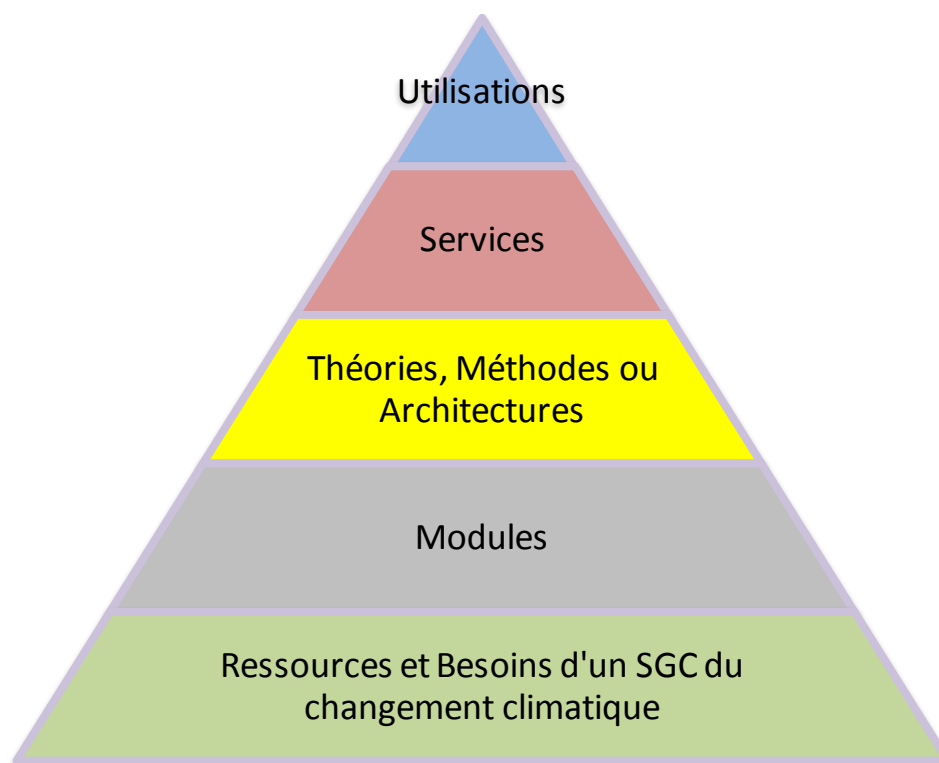


Figure 13: Pyramide des contributions vers un système de gestion des connaissances du changement climatique

5.1.6 Les différentes couches du SGC CC

Pour la réalisation de façon progressive du SGC CC, nous classons les éléments en cinq niveaux d'abstraction, voir la Figure 14 (sens de comptage du bas vers le haut) :

- la première couche correspond aux besoins ressentis et aux ressources disponibles dans le domaine du changement climatique pour gérer les connaissances,
- la seconde couche est celle des modules qui communiquent pour satisfaire les besoins en exploitant les ressources disponibles dans le domaine du CC,
- la troisième couche contient les différentes méthodes et architectures (méthode de représentation des connaissances, architecture de SMA sémantique, formalisation distance sémantique, etc.) pour la réalisation des modules,
- la quatrième couche représente les services accessibles par le web pour satisfaire les besoins initiaux,
- La cinquième couche correspond à l'utilisation des services proposés par les utilisateurs qui sont des administrateurs et des utilisateurs primaires.

La Figure 14 qui suit est une illustration des différentes couches de ce SGC.

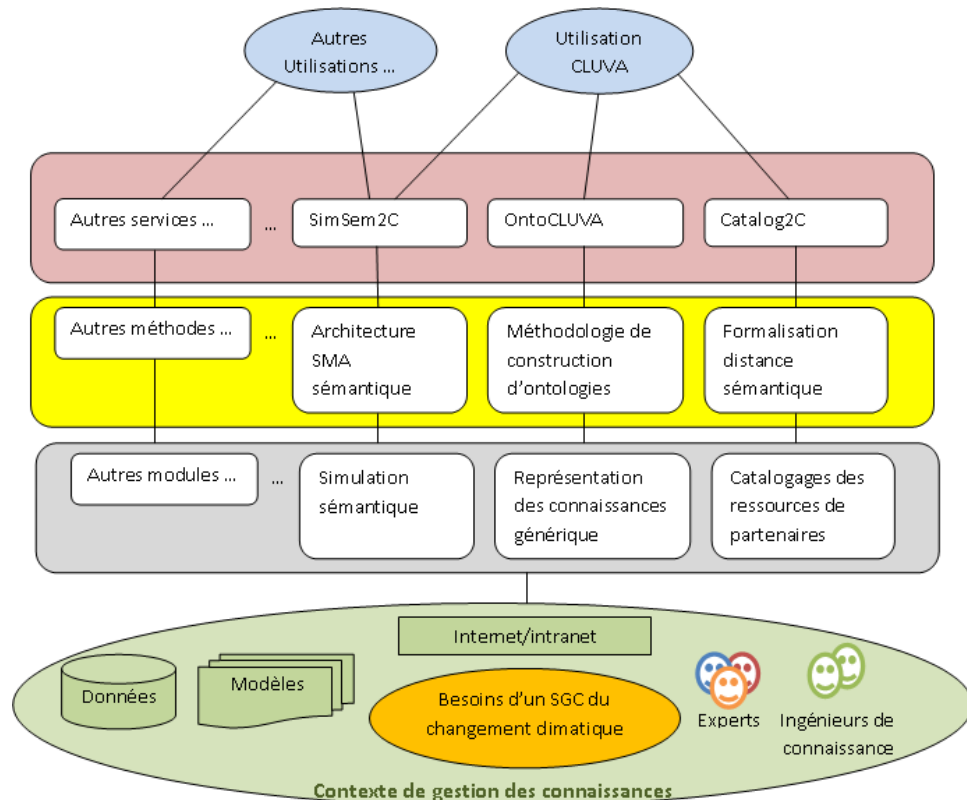


Figure 14 : les couches du système de gestion des connaissances du changement climatique

L'architecture que nous proposons pour le système de gestion des connaissances du changement climatique, illustrée par la Figure 15 suivante est composée de plusieurs éléments.

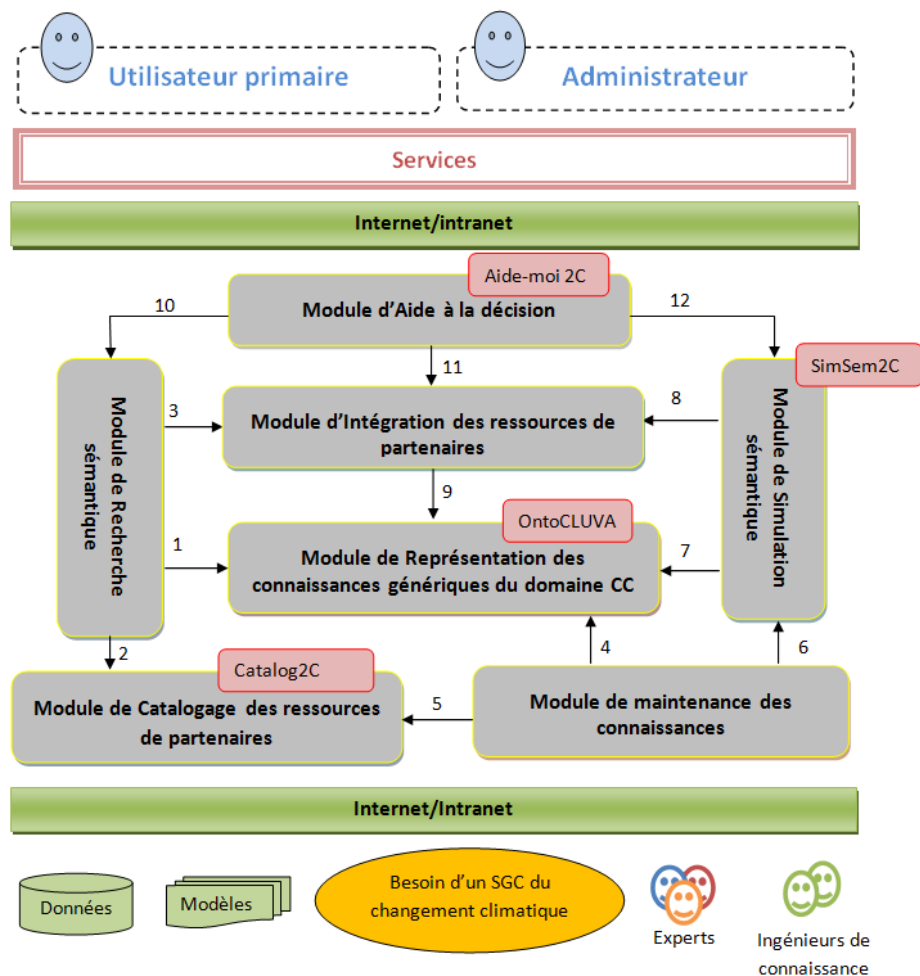


Figure 15 : Architecture générale et fonctionnelle d'un SGC du CC.

5.2 Conclusion

Dans le domaine du changement climatique la connaissance occupe une place stratégique de lutte contre les risques et les catastrophes. La gestion des connaissances est un défi pour ce domaine du changement climatique.

Ce chapitre a présenté la contribution générale de cette thèse qui est de proposer un système de gestion des connaissances du changement climatique. Pour cela il a présenté une architecture de ce SGC du CC. Par une étude détaillée de cette architecture, nous pouvons voir la spécification des besoins fonctionnels (les modules) et la conception de ce SGC du CC en tenant compte des ressources (experts, données, modèles, ingénieurs de connaissances, espace de communication internet/intranet, etc.) disponibles pour ce besoin.

Pour la réalisation de ce système de gestion des connaissances, nous présentons nos contributions dans les chapitres 6, 7, 8, 9 et 10 suivants.

Chapitre 6

Un patron de conception d'ontologies du changement climatique

Dans le projet CLUVA qui constitue le cadre applicatif de nos travaux, un des besoins est de disposer d'un SGC (Système de gestion des connaissances) composé de plusieurs modules, qui effectuent des tâches différentes nécessitant des connaissances du domaine du changement climatique. Dans ce contexte, on ne peut pas construire une seule ontologie de domaine du changement climatique pour les tâches différentes des modules de ce SGC. Mais en s'appuyant sur l'hypothèse de [9] qui dit : « *une ontologie peut être générique pour un ensemble de tâches données si elle possède un niveau de finesse de description permettant aux points de vue de chaque tâche de se représenter* », nous proposons de construire une ontologie noyau du changement climatique qui soit réutilisable dans la conception d'ontologies pour un SGC de ce domaine. Ceci est une problématique des travaux sur les patrons de conception d'ontologies, voir chapitre 3 dans la sous-section 3.3.3.2.2.

Dans ce chapitre, nous présentons la construction d'un patron de conception d'ontologies du domaine du changement climatique. Ce patron est dans notre cas une ontologie noyau, pour la construction des ontologies du changement climatique pour les modules (tâches différentes) de ce système de gestion des connaissances du changement climatique.

Dans la section suivante, nous revenons sur les méthodologies de construction d'ontologies pour argumenter le choix d'une méthodologie manuelle pour la construction de ce patron.

6.1 La construction du patron

Les méthodologies pour la construction d'ontologies peuvent être classées dans trois catégories : réutilisation d'ontologies existantes [4] et [58], processus d'extraction de connaissances à partir de corpus de textes ou de bases de données [64] et [79] et conception manuelle [53], [54] et [56] s'appuyant sur les mêmes principes que ceux appliqués en génie logiciel.

D'abord, le domaine du CC est multidisciplinaire et complexe ce qui fait qu'il dispose de plusieurs corpus de textes interdépendants : donc plusieurs concepts et relations candidats pour figurer dans l'ontologie. Ensuite, comme le besoin est de construire une ontologie noyau donc peu de concepts et de relations (seulement les plus génériques) parmi le nombre important de candidats doivent figurer dans cette ontologie.

Ce qui pose le problème de faire une bonne abstraction, c.-à-d. choisir les concepts et les relations de sorte que tous les modules du SGC puissent débiter avec cette ontologie noyau (patron de conception d'ontologies).

Les méthodologies manuelles, favorisant une compréhension beaucoup plus avancée, permettent une abstraction meilleure que les méthodologies par apprentissage semi automatique. En plus, le coût en temps et les efforts, en choisissant une méthodologie manuelle, nécessaires au développement de l'ontologie sont réduits par le fait de construire une ontologie noyau (nombre limité des concepts et de relations).

Ainsi, la méthodologie que nous proposons est manuelle. Elle a un cycle de vie basé sur la proposition de [26] qui est une fusion des propositions de cycles de vie de [53] et de [76]. Dans cette proposition de [26], le cycle peut être vu en trois grandes étapes : la construction, l'utilisation et la maintenance.

Les trois sections suivantes présentent seulement la construction de ce patron de conception d'ontologies du changement climatique qui se fait en différentes phases : la phase spécification, la phase acquisition des connaissances, la phase conceptualisation des sous domaines, la phase intégration des conceptualisations et les phases formalisation et

implémentation. Après ces trois sections vient la section qui présente une méthodologie de construction d'ontologies du changement climatique à partir de ce patron de conception.

6.2 La phase de spécification

La phase spécification commence par la création d'un groupe chargé de piloter la construction de l'ontologie, nommé groupe Organisateur. C'est dans cette phase que se fait la description du besoin motivant la construction de l'ontologie, le questionnaire de compétences, le découpage en sous domaines, l'identification des canaux de communications entre les sous domaines et l'affectation des experts dans les sous domaines et canaux de communications par le groupe Organisateur.

6.2.1 Groupe organisateur

Le groupe Organisateur se charge d'organiser et de piloter la construction de l'ontologie. Ainsi, c'est ce groupe qui fait le découpage en sous domaine, qui réalise le questionnaire de compétences et qui à partir des informations tirées du questionnaire propose une affectation des experts aux sous domaines.

C'est aussi ce groupe Organisateur, dans cette phase de spécification, qui se charge de l'acquisition des connaissances à partir des ressources terminologiques avec des techniques de recueils des connaissances sur les ressources disponibles. Comme résultat de ce travail d'acquisition, il produit un découpage en sous domaines et un modèle informel pour chaque sous domaine. Ces modèles informels servent de bases de travail et d'exemples pour les experts lors de la conceptualisation des sous domaines.

Ce groupe participe à la conceptualisation de chaque sous domaine pour veiller au respect des règles du consensus de conceptualisation et d'intégration défini plus bas dans cette phase spécification.

Les membres de ce groupe sont constitués d'un nombre très limité d'ingénieurs de connaissances et d'experts qui ont une grande expérience leur permettant d'avoir une vision générale du domaine.

Le groupe Organisateur pour OntoCLUVA est composé de deux ingénieurs de connaissances et d'un expert du domaine du changement climatique.

6.2.2 Description des besoins motivant la création de ce patron

C'est dans la description des besoins que les objectifs ou ambitions de l'ontologie sont expliqués.

L'objectif est de construire une ontologie noyau du domaine du changement climatique, nommée OntoCLUVA, réutilisable pour aller vers des ontologies spécifiques qui satisfont le besoin de connaissances pour les modules du système de gestion des connaissances de ce domaine, voir la Figure 15 dans le chapitre 5 de ce mémoire.

Pour cela, nous utiliserons ce patron de conception d'ontologies OntoCLUVA pour la construction d'ontologies du domaine du changement climatique pour disposer :

- d'un espace métrique dans la recherche sémantique de ressources du catalogage des ressources de partenaires du changement climatique.
- d'un méta modèle d'un simulateur sémantique de modèles du domaine du changement climatique. Ce simulateur sémantique est une application de l'architecture sémantique de SMA, que nous avons proposé.
- d'un vocabulaire partagé du système d'intégration de SMA sémantiques pour le domaine du CC basé sur une architecture d'intégration de SMA sémantiques que nous avons aussi proposé,
- d'un vocabulaire global dans l'architecture du module d'intégration de données et des modèles du changement climatique.

6.2.3 Découpage en sous domaines et identification des canaux de communications entre les sous domaines

Pour l'étape de découpage en sous domaines et d'identification des canaux de communications, le groupe Organisateur fait un traitement manuel du corpus général et des entretiens avec les experts. La validation de ce découpage se fait lors d'un brainstorming dans lequel participent les experts.

Pour le cas de la construction d'OntoCLUVA, ce groupe a proposé un découpage du domaine du changement climatique (CC) en quatre (4) sous domaines :

- *changement climatique*, qui contient les concepts et relations relatifs aux gaz à effet de serre, au climat, aux aléas, aux effets de l'homme sur le climat, etc. ;
- *vulnérabilité urbaine*, qui contient les concepts et relations du système urbain, de ses vulnérabilités, etc. ;
- *risques et catastrophe*, qui contient les concepts et relations relatifs aux risques, aux catastrophes, aux dommages, etc. ;

- et *gouvernance*, qui contient les concepts et relations liés aux acteurs de la gouvernance, aux rôles ou missions des acteurs et aux instruments des acteurs, etc.

Après décomposition en sous domaines, en tenant compte de la complexité du domaine, c'est-à-dire composé de sous domaines communicants, le groupe Organisateur propose les canaux de communications traduisant les relations entre les sous domaines notés : (1), (2), (3), (4), et (5) dans le réseau (graphe) de sous domaines de la Figure 16 qui suit.

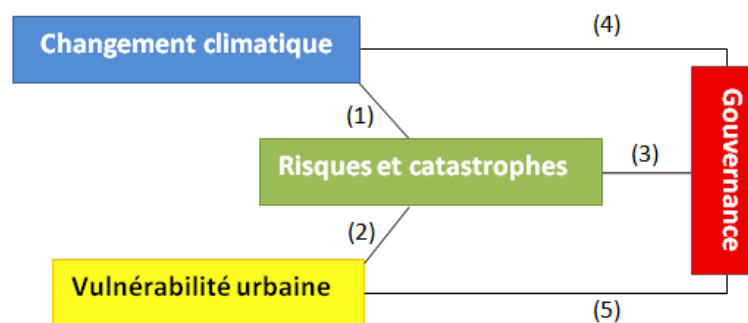


Figure 16 : Réseau de sous domaines du domaine du changement climatique

Dans ce réseau de sous domaines, ce sont seulement les deux sous domaines, *changement climatique* et *vulnérabilité urbaine*, qui n'entretiennent pas une communication directe. Mais, ils communiquent de façon indirecte par l'intermédiaire des sous domaines *risques et catastrophes* et *gouvernance*. Parce que d'après le travail de documentation (analyse informelle des documents du corpus général), les entretiens avec les experts et le brainstorming pour la validation de ce découpage en sous domaine, il apparaît que : le changement climatique et la vulnérabilité urbaine sont deux systèmes séparés mais leur couplage donne les risques et les catastrophes qui ont poussé au besoin de gouvernance. Cette gouvernance est pour gérer les risques et les catastrophes. Mais aussi, elle permet de prévenir les risques et les catastrophes en se donnant l'objectif de comprendre les causes du changement climatique pour prendre des décisions de réduire le phénomène et de comprendre la vulnérabilité urbaine pour aussi prendre des décisions qui la diminue.

Ce graphe réseau de sous domaines est une belle synthèse du domaine du changement climatique et est utilisé pour la mise en place du questionnaire de compétences pour la gestion de la multidisciplinarité du domaine dans la construction de cette ontologie noyau.

6.2.4 Questionnaire de compétences

Le groupe organisateur propose un questionnaire de compétences, voir Annexe 1, que tous les experts associés à la construction de l'ontologie OntoCLUVA remplissent. Ce questionnaire

est réalisé à partir des besoins motivant la création de l'ontologie et du réseau de sous domaines (Figure 16). Il permet de mieux connaître les profils de nos experts et de savoir là où nous n'avons pas assez de compétences pour ainsi dégager les limites de l'ontologie construite.

Le questionnaire contient des informations pour identifier l'expert (prénom, nom, laboratoire, équipe,...) qui remplit le questionnaire. Il contient aussi des concepts clés que l'expert choisit pour montrer ses compétences dans le domaine du CC. Dans ce questionnaire, l'expert peut indiquer d'autres informations à savoir son niveau ou son grade, son sujet de thèse, les mots clés associés à son sujet et un résumé sur ses expériences dans la conceptualisation de ce domaine.

Après remplissage d'un questionnaire par un expert, le groupe organisateur ajoute au questionnaire un identifiant d'expert ($E_1, E_2, \dots, E_n$). Ce sont ces identifiants qui sont manipulés dans la suite.

Ce questionnaire est très utile pour la suite, car il permet de faire l'affectation des experts.

6.2.5 Détermination des experts de chaque sous domaine et des experts canaux

Avec les informations tirées de ce questionnaire de compétences, nous déterminons les experts qui participent à la conceptualisation de chaque sous domaine, parmi lesquels les experts canaux.

Un expert canal de deux sous domaines interdépendants est un expert qui a des compétences dans les deux sous domaines et donc qui a coché, dans son questionnaire de compétences, des concepts dans les deux sous domaines en question. Il participe dans les conceptualisations de ses deux sous domaines interdépendants jouant des rôles importants dans ces dernières. Car il sert de relai et informe les experts de l'un des sous domaines de ce qui se passe dans la conceptualisation de l'autre sous domaine.

Ainsi, aidés par les ingénieurs de connaissances, les experts canaux sont notre solution pour gérer les conflits, les inconsistances et les vérifications.

La Figure 17, qui suit, illustre les espaces de conceptualisations partagés qui ont été créés pour la conceptualisation des sous domaines obtenus à partir du découpage du domaine en sous domaines. Cette Figure 17 montre aussi les affectations des experts dans les sous

domaines et les canaux de communications qui sont des espaces partagés. Cette affectation est faite à partir des informations tirées des questionnaires remplis.

Dans cette Figure 17, E4 est l'identifiant de l'expert canal du canal trois (3) entre les sous domaines "gouvernance" et "risques et catastrophes". Après avoir déterminé les espaces partagés pour la conceptualisation et affecter les experts dans ces espaces la section qui suit présente le consensus de conceptualisation et d'intégration.

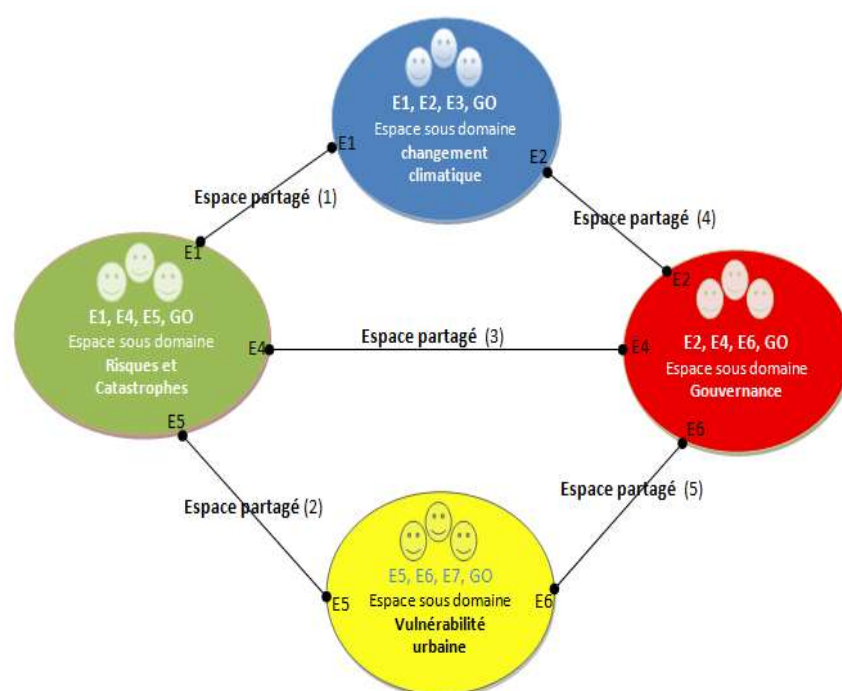


Figure 17 : Affectations des experts aux sous domaines et canaux de communications

6.2.6 Consensus de conceptualisation et d'intégration

Le consensus permet aux experts de conceptualiser et d'intégrer les modèles conceptuels des sous domaines. Il faut noter que le consensus dans notre cas n'est pas un processus entier pour construire l'ontologie, comme défini dans [48], mais est un ensemble de règles utilisées dans les phases de conceptualisation et d'intégration pour tracer les frontières des experts selon leurs compétences dans le domaine.

Le consensus, dans le cas d'OntoCLUVA, est proposé à partir du réseau de sous domaines par le groupe Organisateur et soumis aux consentements des experts. Il se décline ainsi en cinq (5) règles, voir tableau suivant, dont les trois (3) premières règles sont pour la conceptualisation et les deux (2) dernières règles sont pour l'intégration des

conceptualisations des sous domaines. La conceptualisation d'un sous domaine et l'intégration sont collaboratives, car le domaine est multidisciplinaire et complexe.

Règle 1 :	Les concepts de chaque sous domaine sont proposés par les experts de ce sous domaine.
Règle 2	C'est l'expert canal qui décide en cas de conflit qu'un concept appartient à l'un ou l'autre sous domaine de son canal.
Règle 3 :	Les relations sémantiques entre les concepts du même sous domaine sont proposées par les experts de ce sous domaine.
Règle 4 :	Pour avoir des relations entre les concepts de deux sous domaines différents, il faut que ces deux sous domaines partagent un canal de communication. Dans le découpage en sous domaine de la Figure 16, ces canaux sont notés (1), (2), (3), (4), et (5).
Règle 5 :	Les relations entre les concepts de deux sous domaines différents, partageant un canal, proposées par les experts de l'un des sous domaine sont validées par les experts de l'autre.

La phase spécification se termine par une rencontre d'information et de validation, organisée par le groupe Organisateur, regroupant les experts des sous domaines. Dans cette rencontre, le groupe Organisateur présente d'abord l'acquisition des connaissances pour la phase de spécification basée sur le corpus général constitué, les techniques d'acquisition utilisées dans cette phase. Ensuite, il présente le besoin motivant la construction de l'ontologie OntoCLUVA, le découpage en sous domaines du changement climatique, l'affectation des experts dans ces sous domaines, les modèles informels des sous domaines et le consensus de conceptualisation et d'intégration proposés lors des différentes étapes de la phase de spécification.

Après avoir donné aux experts les informations nécessaires, il fait place à un brainstorming le regroupant aux experts pour la validation du découpage en sous domaines, des affectations des experts dans les sous domaines et le consensus de conceptualisation et d'intégration.

Ainsi, cette rencontre permet à ce groupe organisateur d'enrichir ses propositions avec les contributions des experts des sous domaines. Elle permet aussi d'imprégner les experts avant même de commencer la conceptualisation et de les faire ressentir dès le départ une collaboration dans la dynamique de la construction de l'ontologie OntoCLUVA de leur domaine.

6.3 Phase d'acquisition des connaissances

L'acquisition des connaissances pour la construction de l'ontologie OntoCLUVA est un processus permanent au quel nous avons fait appel dans toutes les phases de la construction. Elle est basée sur les ressources terminologiques, les expertises des experts du domaine du changement climatique et les techniques manuelles de recueil, qui sont : l'analyse informelle de documents, l'entretien libre et le brainstorming.

Les ressources terminologiques utilisées dans OntoCLUVA sont organisées en plusieurs corpus :

- le corpus général est constitué par le groupe Organisateur pour comprendre les généralités du domaine du changement climatique. Ce corpus est utilisé pour faire le découpage en sous domaines et proposer les modèles informels des sous domaines.
- Les corpus de sous domaines sont principalement utilisés dans les conceptualisations des sous domaines. Ils sont constitués par les experts des sous domaines.

6.3.1 Acquisition des connaissances dans la phase de spécification

Pour l'acquisition des connaissances dans la phase de spécification, voir la zone A de la Figure 18, le groupe Organisateur dispose du corpus général et des techniques manuelles de recueil.

L'analyse informelle de documents et l'entretien libre sont les techniques manuelles de recueil utilisés dans cette phase qui ont permis au groupe organisateur de faire le découpage en sous domaine et de préparer les rencontres des experts en proposant les modèles informels des sous domaines (voir les annexes 2, 3, 4 et 5).

6.3.2 Acquisition des connaissances dans la phase de conceptualisation

Dans la phase de conceptualisation, pour chaque sous domaine, ses experts sont les acteurs centraux. Dans leurs tâches de conceptualisation de leur sous domaine, ils sont en contact avec le groupe Organisateur qui met à leur disposition, lors d'une rencontre (un brainstorming), le corpus général, le réseau de sous domaine et les modèles informels des sous domaines.

Les experts de chaque sous domaine mettent en place le corpus spécifique à leur sous domaine et aussi utilise les techniques manuelles de recueil de connaissances qui sont :

l'analyse informelle des documents (du corpus général et du corpus spécifique), l'entretien libre entre experts et brainstorming (rencontre entre les experts d'un sous domaine), voir zone B de la Figure 18.

6.3.3 Acquisition des connaissances dans la phase d'intégration

Pour l'intégration des conceptualisations des sous domaines, les acteurs sont le groupe Organisateur, les experts canaux. Ils disposent des modèles conceptuels des sous domaines, du corpus général (par l'intermédiaire du groupe Organisation), des corpus spécifiques à chaque sous domaine et des modèles conceptuels des sous domaines (par l'intermédiaire des experts canaux qui sont aussi des experts des sous domaines), du consensus d'intégration et des techniques manuelles d'acquisition pour proposer le modèle conceptuel final, voir zone C de la Figure 18.

6.3.4 Acquisition des connaissances dans les phases de formalisation et d'implémentation

Les ressources de ces phases de formalisation et d'implémentation sont le groupe organisateur, les besoins motivant la construction de l'ontologie et le modèle conceptuel final obtenu après intégration des conceptualisations des sous domaines.

Pour passer de ce modèle final à l'ontologie, le groupe Organisateur choisit pour ce modèle final un formalisme et un outil d'implémentation pour satisfaire les attentes du système de gestion des connaissances.

La Figure 18 montre le processus d'acquisition des connaissances dans les phases spécification, conceptualisation et intégration.

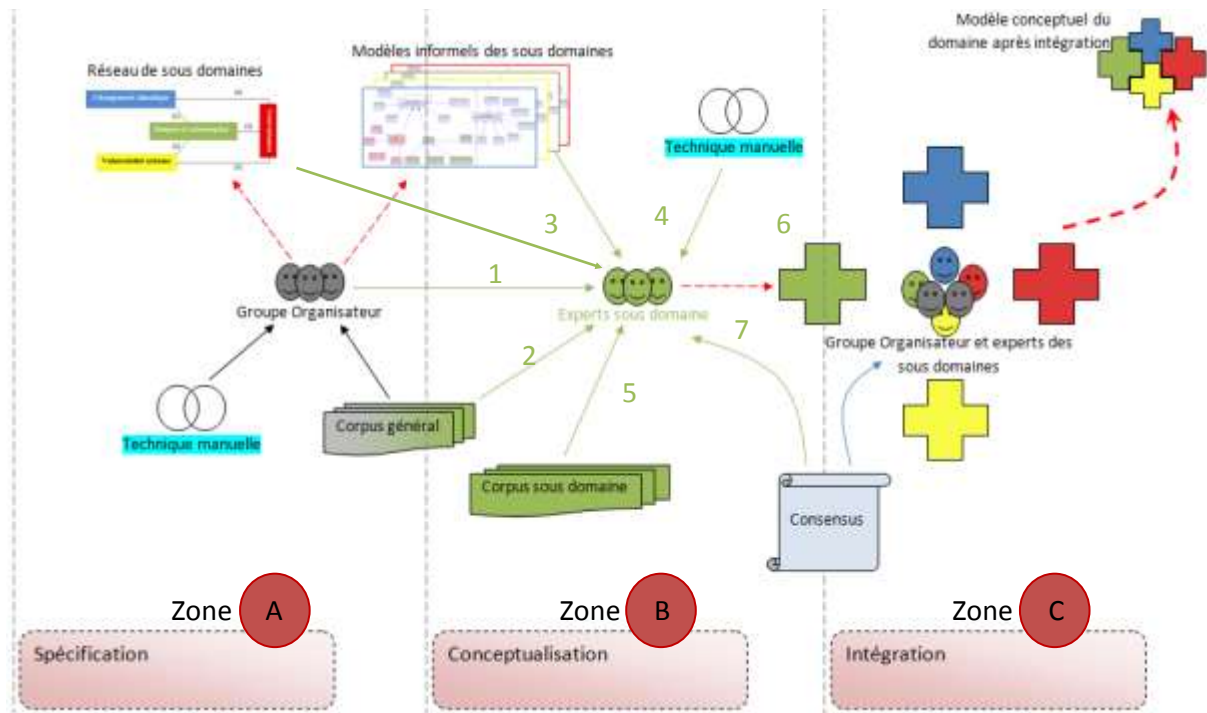


Figure 18 : processus d'acquisition des connaissances dans les trois phases spécification, conceptualisation et intégration

Nous avons les experts de chaque sous domaine disposant de leurs corpus de ressources, un consensus de conceptualisation et d'intégration, un modèle informel pour chaque sous domaine obtenus dans la phase spécification. Ainsi dans la phase qui suit, nous passons à la conceptualisation des sous domaines.

6.4 Les autres phases

6.4.1 Phase de conceptualisation des sous domaines

La conceptualisation d'un sous domaine commence par une séance d'informations où le groupe organisateur présente d'abord le corpus général utilisé, les techniques acquisitions utilisées, le réseau de sous domaine proposé et le modèle informel pour ce sous domaine obtenu par ce groupe.

Puis, il fait place à une discussion entre les experts, un brainstorming, basé sur leur modèle informel proposé lors de la phase d'acquisition des connaissances.

Ensuite en cas d'accord ou de désaccord avec le modèle, les experts font les modifications nécessaires et pour cela ils font appel en plus du corpus général le corpus du sous domaine et à leurs expertises.

Dans leurs propositions, les experts d'un sous domaine doivent respecter le consensus de conceptualisation et d'intégration et les remarques des experts canaux et du groupe organisateur. Ces remarques peuvent être par exemple qu'un concept est déjà présent dans la conceptualisation d'un autre sous domaine. Ce qui peut impliquer de mettre ce concept en une couleur (bleu et jaune dans la Figure 19), choisie par l'expert canal concerner, pour montrer qu'il est aussi présent dans un sous domaine.

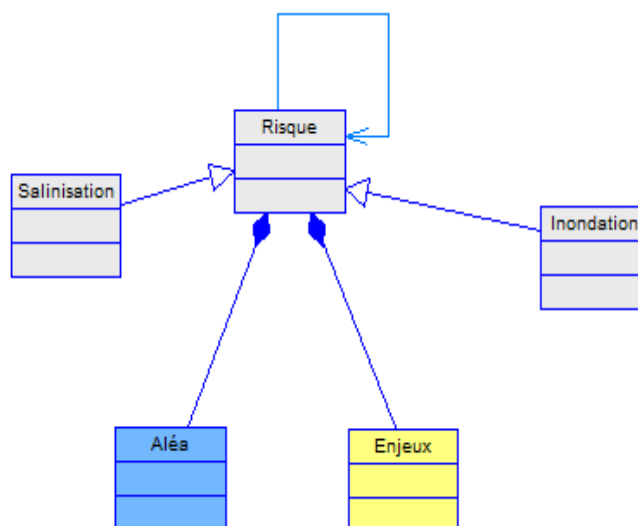


Figure 19 illustration de la conceptualisation d'un sous domaine par ses experts à partir de leur modèle informel

La finalité d'une rencontre de conceptualisation d'un sous domaine est de proposer un modèle conceptuel accepté par les experts de ce sous domaine qui respecte le consensus d'intégration.

6.4.2 Phase d'Intégration des conceptualisations des sous domaines

Les sous domaines sont conceptualisés en tenant compte du fait qu'ils vont être intégrés par la suite. Ceci par la présence d'experts canaux et du groupe organisateur dans les conceptualisations des sous domaines interdépendants et la mise en place d'un consensus de conceptualisation et d'intégration.

Les experts canaux vérifient que le consensus est respecté et valident les relations inter sous domaines. Ces derniers avec le groupe Organisateur font l'alignement des modèles conceptuels, voir la Figure 20, pour obtenir le modèle conceptuel de l'ontologie noyau du domaine qui sera validée dans la suite par les experts de tous les sous domaines avant d'être formalisée et implémentée.

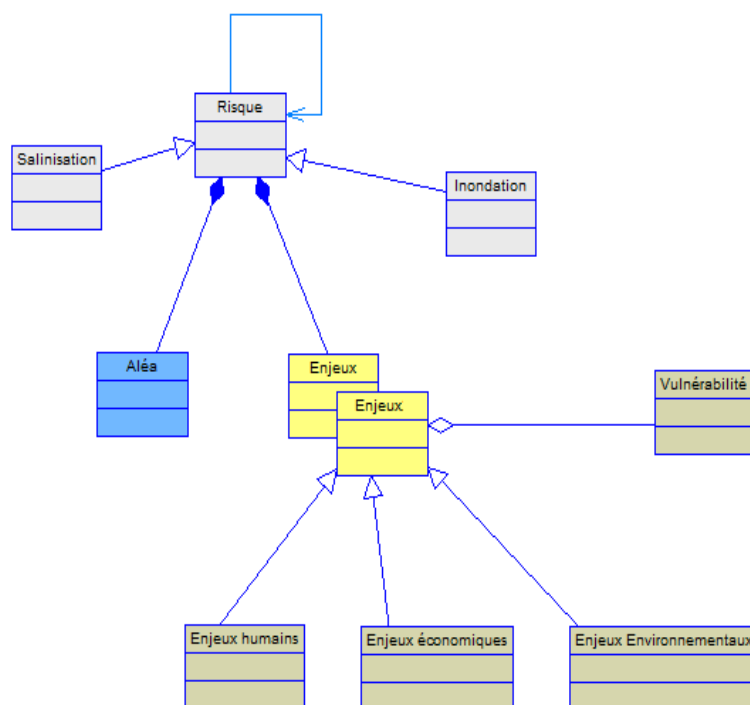


Figure 20 : Alignement des deux concepts *Enjeux* des sous domaines *Risque et Catastrophe* et *Vulnérabilité* ; l'expert canal (2) nommé E5 fusionne les deux concepts « Enjeux » qu'il avait mis en couleur jaune pour montrer qu'ils (ces deux concepts) étaient correspondants.

6.4.3 Les phases de formalisation et d'implémentation

OWL²⁵, un langage qui offre un moyen d'écrire des ontologies web, est devenu une Recommandation du W3C depuis le 10 Février 2004. OWL profite de l'universalité syntaxique de XML²⁶. Par rapport à RDF²⁷ et RDFS²⁸, qui apportent à l'utilisateur la capacité de décrire des classes et des propriétés, OWL intègre, en plus, des outils de comparaison des propriétés et des classes : identité, équivalence, contraire, cardinalité, symétrie, transitivité, disjonction, etc. OWL offre aux machines une plus grande capacité d'interprétation que RDF et RDFS, grâce à un vocabulaire plus large et à une vraie sémantique formelle : d'où notre choix du langage OWL pour la formalisation d'OntoCLUVA.

Pour l'implémentation d'OntoCLUVA, nous utilisons Protégé [63], qui est un éditeur d'ontologies distribué en open source. Protégé est un éditeur hautement extensible, capable de manipuler des formats très divers. Il supporte OWL, comme de nombreux autres formats.

²⁵<http://www.w3.org/TR/owl-ref/>

²⁶<http://www.w3.org/XML/>

²⁷www.w3.org/RDF/

²⁸<http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

6.4.4 La phase de documentation

Après la construction, la formalisation et l'implémentation d'OntoCLUVA, le groupe organisateur a documenté ce patron de conception en associant aux concepts et aux relations entre ces concepts des labels et des commentaires en français et en anglais, voir la Figure 21.

Pour cela ce groupe organisateur exploite les glossaires, les dictionnaires, les wikis, etc. dans les deux langues française et anglaise.

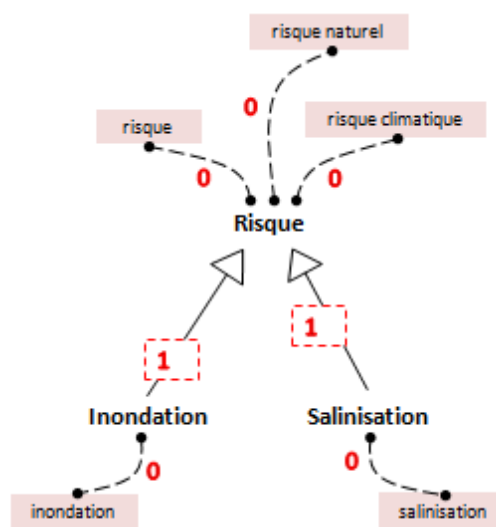


Figure 21 - Extrait d'OntoCLUVA montrant les labels en français associés aux concepts Risque, Inondation et Salinisation obtenue dans la phase de documentation de ce patron

Cette documentation est importante car elle permet à OntoCLUVA d'être exploitable. Pour une application comme Catalog2C, le besoin est une ontologie du changement climatique qui est documentée car le module de recherche sémantique de ce catalogue associe les mots clés des descriptions des ressources aux labels dans l'ontologie du changement climatique pour permettre de déterminer le voisinage d'un mot clé paramètre de recherche.

Cette section a présenté la construction du patron OntoCLUVA en suivant différentes étapes composées de différentes phases. Dans la section suivante, nous proposons une méthodologie de construction d'ontologie du changement climatique qui montre comment ce patron peut être réutilisé pour la construction d'autres ontologies du changement climatique.

6.5 Méthodologie de construction d'ontologies du changement climatique

La construction d'une ontologie d'un domaine multidisciplinaire et complexe comme le domaine du CC reste encore un problème à résoudre si on veut prendre en compte le contexte d'utilisation ou les tâches de cette ontologie.

Le patron de conception d'ontologies du domaine du changement climatique OntoCLUVA peut réduire le temps et l'effort nécessaire à la construction d'ontologies du domaine du changement climatique. Ainsi la Figure 22 est une illustration d'une méthodologie basée sur la méthodologie d'ingénierie ontologique NeOn [58] et OntoCLUVA pour qu'à partir d'un besoin d'ontologie du changement climatique de construire une ontologie spécifique à ce besoin.

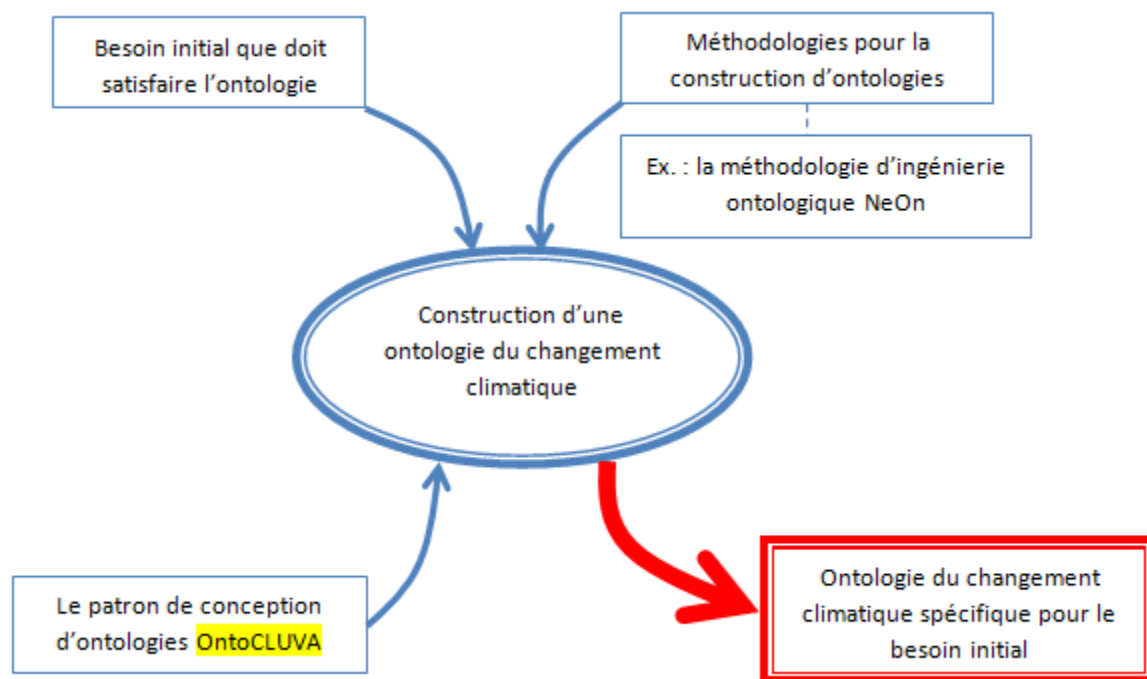


Figure 22: Méthodologie de construction d'ontologie du CC à partir OntoCLUVA ; Illustration de l'utilisation d'OntoCLUVA pour la construction d'ontologies du domaine du changement climatique avec par exemple la méthodologie d'ingénierie ontologique NeOn [58]

C'est cette vision qui a guidé la construction des ontologies du domaine multidisciplinaire et complexe du changement climatique pour les modules d'un SGC de ce domaine. Ainsi, nous avons commencé par faire une bonne abstraction avec une méthodologie manuelle pour obtenir un patron de conception d'ontologies ou une ontologie noyau. Ensuite on a utilisé ce patron pour la construction des autres ontologies avec les méthodologies semi-automatique d'apprentissage basées sur la découverte et l'adaptation de composants d'ontologies.

Cette construction manuelle d'une ontologie noyau du domaine du changement climatique, nommée OntoCLUVA et la maintenance des instances de cette ontologie dans leur cadre d'utilisation en se basant sur des techniques semi-automatiques constitue la première étape vers une méthodologie collaborative pour la construction d'ontologies de domaines multidisciplinaires et complexes, voir la Figure 23 suivante.

Pour cela, nous avons pour le moment utilisé une instance de l'ontologie noyau OntoCLUVA comme espace métrique dans la recherche sémantique de ressources dans le catalogage des ressources de partenaires du changement climatique, nommé Catalog2C.

Nous avons aussi utilisé une autre instance de l'ontologie noyau OntoCLUVA comme méta modèle du simulateur sémantique de systèmes complexes du domaine du changement climatique qui est une application d'une architecture sémantique, que nous avons proposé.

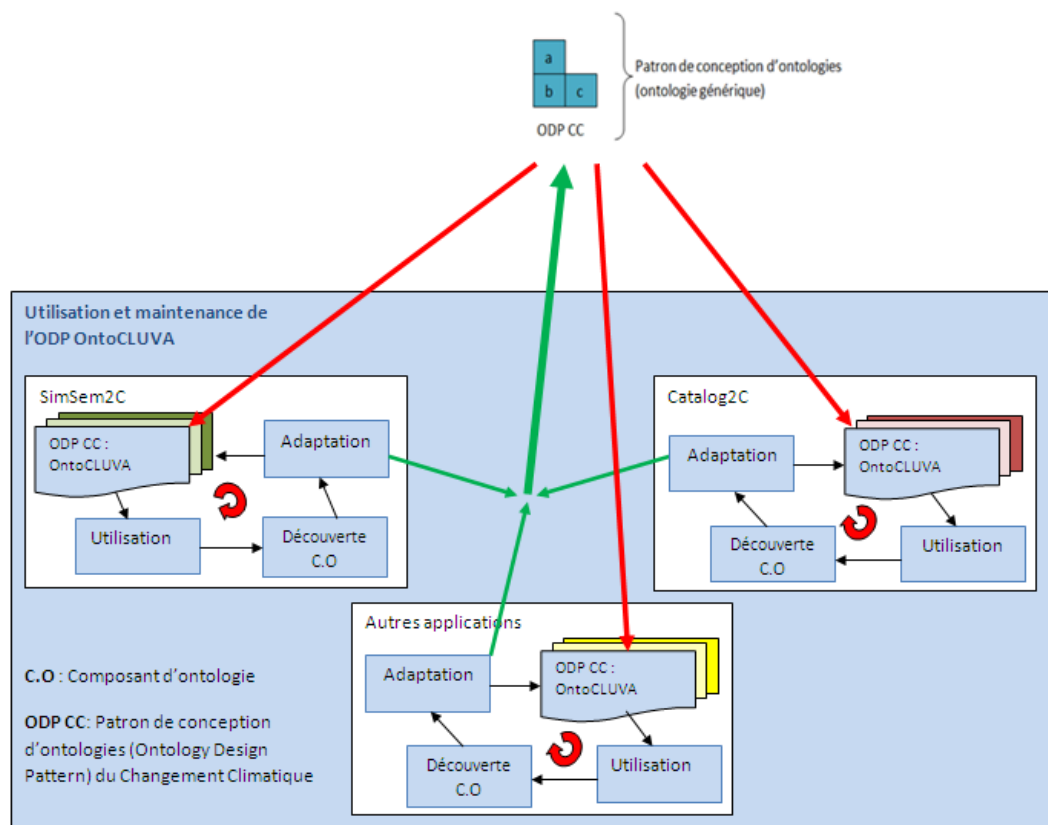


Figure 23 Cycle de vie de l'ontologie noyau du domaine du changement climatique, nommée OntoCLUVA dans le SGC de ce domaine

Il est possible aussi de maintenir l'ontologie noyau elle-même en mettant l'hypothèse si un composant d'ontologie est découvert par toutes les applications (modules du SGC) ou que les experts voient l'intérêt d'un composant découvert même par une seule application alors ce composant est un ODP. Nous partageons cette idée avec [10] qui dit : « *Il est possible de*

combiner et d’associer ces deux visions des composants et patrons : un composant — opération ou structure — devient un patron de conception s’il montre une certaine fréquence et un certain intérêt, traduisant par là qu’il se retrouve souvent employé et jugé utile ».

6.6 Conclusion

Nous avons produit un patron de conception d’ontologies, nommé OntoCLUVA, du domaine multidisciplinaire et complexe du changement climatique. Nous avons aussi proposé une méthodologie de construction d’une ontologie du domaine du changement climatique basée sur ce patron, la méthodologie NeOn et le besoin motivant la construction de cette ontologie.

Ceci nous permet de régler le problème de la construction d’ontologies du domaine du changement climatique nécessaires pour satisfaire les besoins des modules du système de gestion des connaissances (SGC) que nous voulons réaliser.

Dans les deux chapitres qui vont suivre, nous allons montrer l’utilisation de ce patron de conception d’ontologie et sa maintenance dans Catalog2C et SimSem2C pour aller vers des ontologies spécifiques aux besoins de ces applications.

Pour compléter le besoin décrit pour ce système de gestion des connaissances et de simulation sémantique d’autres utilisations de cette ontologie sont en cours dans l’architecture du module d’intégration de données du changement climatique et l’architecture du module d’aide à la décision pour les acteurs de la gouvernance des risques climatiques.

Ce patron est utilisable pas seulement pour la construction d’ontologies du CC pour le SGC que nous proposons mais il peut être utilisé dans la construction d’autres ontologies du changement climatique.

Chapitre 7

Un catalogue de ressources de partenaires dans le domaine du changement climatique

Dans le dictionnaire Larousse 2009, un catalogue est défini comme une liste énumérative, commentée ou non commentée des descriptions des ressources. Pour exemple, un catalogue d'une bibliothèque permet de repérer les documents possédés par une bibliothèque. Dans sa version informatisée, la plus courante, le catalogue d'une bibliothèque est une base de données signalant tout ou partie des documents disponibles dans une ou plusieurs bibliothèques. Le catalogue est destiné à identifier les documents (décrits dans des notices) et à faciliter leur recherche ou leur localisation [Wikipédia, (date de consultation : 15/01/2014)].

Le domaine du changement climatique fait intervenir plusieurs acteurs humains et institutionnels de spécialités différentes qui doivent entre autres communiquer et partager leurs connaissances pour mieux jouer leurs rôles dans ce domaine.

Une première étape, avant le partage et l'intégration des ressources, serait de disposer d'un catalogue de ressources de partenaires dans ce domaine du changement climatique pour identifier des ressources (expertises, sources de données, modèles, services web, cartographies,...) et favoriser le partage et la collaboration entre ces partenaires.

Ainsi, le catalogage des ressources de partenaires du changement climatique, nommé Catalog2C que nous avons implémenté entre bien dans ce cadre pour le partage et l'intégration des ressources. Il permet à des partenaires de connaître les potentiels collaborateurs pour la résolution de problèmes du domaine du changement climatique en identifiant pour leurs problèmes les ressources disponibles chez les autres collaborateurs. La recherche de ressources dans ce catalogue des ressources de partenaires du CC est importante pour l'identification de ressources. Car elle permet à un partenaire de connaître les ressources des autres partenaires associées à un mot clé (paramètre de sa recherche) et aux mots clés voisins de ce mot clé paramètre. Cette recherche de ressources dans Catalog2C est une recherche sémantique, car elle utilise une métrique pour évaluer la proximité entre les mots clés en s'appuyant sur les connaissances du domaine du changement climatique représentées par l'ontologie de ce domaine, qu'elle considère comme espace de mesure.

Pour rendre la recherche sémantique plus performante, on devait aussi donner aux experts la possibilité de faire la maintenance de l'ontologie du CC dans ce catalogue qui part aussi d'une hypothèse pour considérer que les mots clés fréquents, qui n'ont pas de correspondance dans l'ontologie du CC, peuvent être utilisés pour découvrir des composants d'ontologie à adapter dans cette ontologie.

Ce chapitre expose notre travail sur la gestion des ressources de partenaires du CC par Catalog2C. Il est divisé en plusieurs sections. Dans la section suivante, nous présentons l'architecture de Catalog2C. Dans la section 2, nous présentons notre hypothèse de recherche sémantique faisant un lien entre les mots clés utilisés dans la description des ressources par l'ontologie du changement climatique. La section 3 présente la distance sémantique entre deux mots clés et la recherche sémantique par mot clé. Nous terminons ce chapitre par une conclusion dans laquelle nous dégageons les perspectives de ce travail d'identification des ressources du changement climatique.

7.1 L'architecture de Catalog2C

L'architecture de ce catalogue des ressources de partenaires que nous proposons pour le domaine du changement climatique est illustrée par la Figure 24 et est constituée de cinq couches :

- **La couche Utilisateurs/Partenaires** se charge de l'accès au catalogue qui est réservé à des partenaires qui veulent partager les descriptions de leurs ressources. Parmi les

partenaires, il y a des experts qui ont, en plus des autres utilisateurs, accès à la fonctionnalité de maintenance de l'ontologie CC.

- **La couche Internet/Intranet** est l'espace de communication et de partage des descriptions entre les partenaires. Parce que les partenaires sont dans des institutions différentes et distantes géographiquement.
- **La couche Fonctionnalités** montre les fonctionnalités qu'offre le catalogue, à savoir :
 - **la description de ressources** de partenaires par un ensemble de paramètres dont celui contenant les mots clés associés à cette ressource qui est fondamentale pour la recherche sémantique de cette ressource;
 - **la recherche sémantique de ressources** à partir d'un mot clé et de son voisinage dans le vocabulaire (ontologie) du domaine du CC sur la base de connaissances des descriptions de ressources;
 - **la maintenance de l'ontologie du CC** par la découverte et l'adaptation de composants d'ontologie accessible seulement aux partenaires qui ont le profil d'expert. Les composants d'ontologie dans Catalog2C sont des labels de concepts, des concepts et des relations entre les concepts.
- **La couche d'inférence** contenant le moteur d'inférence et de recherche sémantique CORESE²⁹ (COnceptual REsource Search Engine) [16]. Ce moteur joue un rôle très important, car il permet à la couche fonctionnalité d'accéder aux connaissances du domaine changement climatique et aux descriptions des ressources de partenaires.
- **La couche de connaissances** est composée de :
 - **VCatalog.rdfs**, qui est une ontologie d'application définissant les concepts et les relations relatifs à la description de partenaires, d'expertises, de sources de données, de modèles, de services web, etc. ;
 - **Catalog2C.rdf**, basé sur l'ontologie d'application (vocabulaire) VCatalog.rdfs, contient les descriptions en RDF des partenaires et de leurs ressources (expertises, sources de données, modèles, services web etc.).
 - **Ontologie du CC** est construite progressivement par Catalog2C à partir du patron de conception d'ontologies **OntoCLUVA**, par découverte et adaptation de composants d'ontologie.

²⁹ (COnceptual REsource Search Engine)

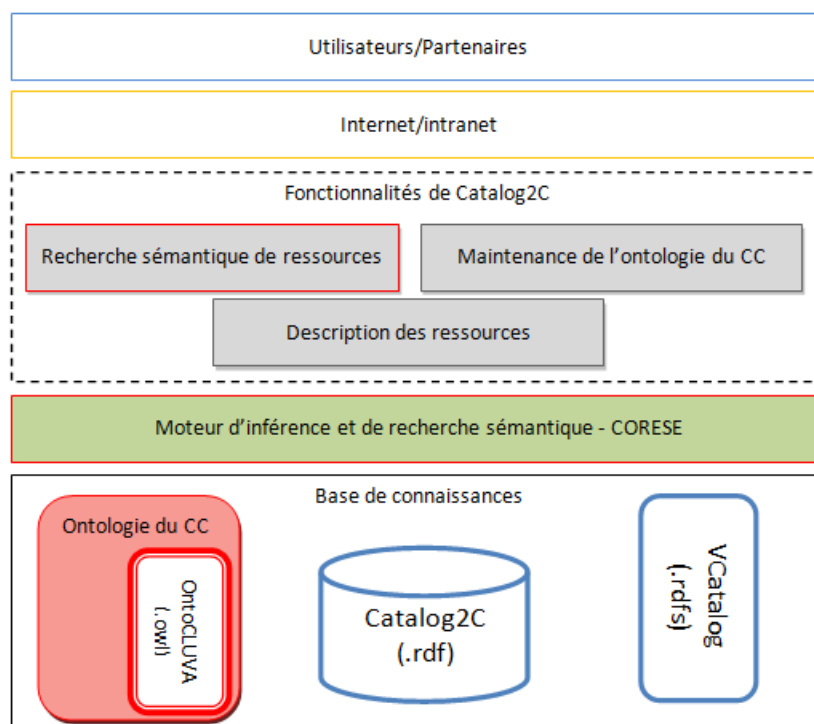
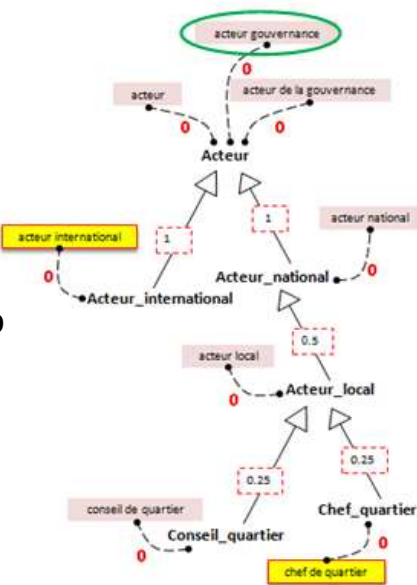


Figure 24– Architecture du Catalog2C

La présence de l'ontologie du CC dans l'architecture de Catalog2C se justifie par son utilisation dans les fonctionnalités de recherche sémantique de ressources et de maintenance de cette même ontologie. La fonctionnalité de maintenance consiste à découvrir des composants d'ontologies et à les adapter dans cette ontologie du CC et ainsi aller vers une riche ontologie du changement climatique pour le contexte spécifique à son utilisation par Catalog2C.

7.2 Hypothèse de recherche sémantique et de maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C

La Figure 25 suivante montre la description d'une ressource, le modèle dont le nom est "modele_Adaptation", mais aussi deux hiérarchies des concepts extraits de l'ontologie du domaine du CC initialement l'ontologie OntoCLUVA documentée (contenant des labels et des commentaires des concepts et des relations). Dans le champ "Mots clés" du formulaire de description de ressource contenant les mots clés de la ressource à décrire (ex. : le modèle dont le nom est "modele_Adaptation"), nous pouvons alors voir que ces mots clés sont comparables aux labels des concepts de l'ontologie du domaine du CC.



Decrire Modele

Les champs avec le signe (*) sont obligatoires.

Identifiant (*):	M0012
Nom (*):	modele_Adaptation adaptation, risque, inondation, population, <u>acteur gouvernance</u>
Mots clés (*):	
format (*):	owl
Lien web:	
Partenaire (*):	LANI
Description:	modélisation de l'adaptation des populations face aux risques d'inondation et du rôle des acteurs de la gouvernance face à l'adaptation
Ajouter >>	

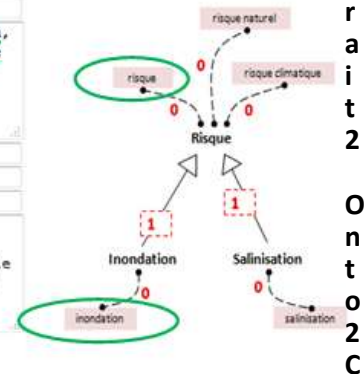


Figure 25 – illustration que les mots clés, dans la description de la ressource "modele_Adaptation" du domaine du CC, sont les labels de concepts de l'ontologie de ce domaine

De ce constat, nous formulons l'hypothèse suivante :

HYPOTHESE 1 (POUR LA RECHERCHE SEMANTIQUE) : Dans la description d'une ressource dans le domaine du changement climatique, les mots clés utilisés par un partenaire appartiennent au vocabulaire de ce domaine. Ces mots clés sont potentiellement des labels de concepts de l'ontologie du domaine du changement climatique.

Cette hypothèse permet de relier l'ensemble des mots clés par leur sens dans le domaine du CC. C'est-à-dire relier les mots clés en utilisant les relations entre les labels des concepts qui n'est rien d'autres que les relations hiérarchiques entre leur concept dans l'ontologie de ce domaine. Ainsi avec cette hypothèse, nous avons formalisé une distance sémantique entre des mots clés comme étant la distance entre les labels correspondants aux mots clés calculée à partir de la distance sémantique de CORESE entre les concepts d'une hiérarchie. Ce qui permet par la suite d'organiser les mots clés (ou les labels) autour d'un mot clé paramètre de recherche et ainsi de parler de voisinage d'un mot clé. La Figure 26 suivante est le voisinage du mot clé "risque" en se référant à l'ontologie du changement climatique et à une distance sémantique dont nous verrons la formalisation dans la section 7.3 suivante.

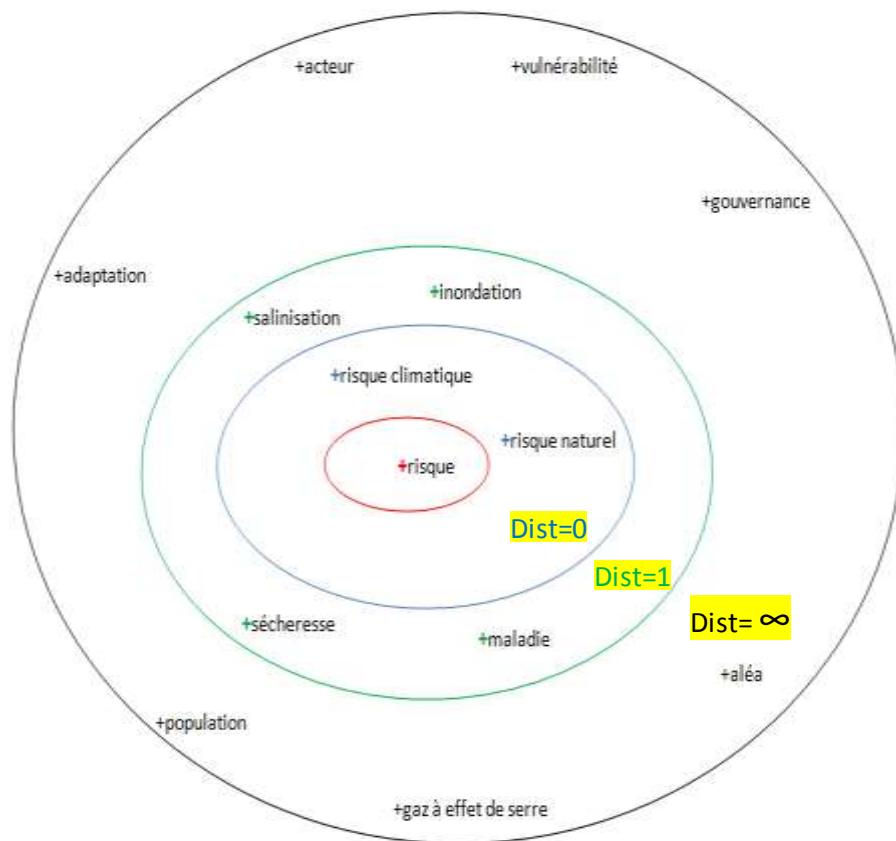


Figure 26 - Voisinage du mot clé risque en passant par l'ontologie du CC rendu possible par l'hypothèse

En se basant sur l'hypothèse de recherche sémantique nous pouvons en déduire l'hypothèse de maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C.

HYPOTHESE 2 (POUR LA MAINTENANCE DE L'ONTOLOGIE DU CC): Les mots très fréquemment utilisés dans la description des ressources de partenaires sans correspondance dans l'ontologie du changement climatique dans Catalog2C permettent aux experts d'enrichir cette dernière.

Cette hypothèse permet, avec les statistiques sur l'utilisation de l'ontologie du CC et des mots clés dans la description des ressources, de maintenir cette ontologie du CC par la découverte et l'adaptation de composants d'ontologie de façon semi-automatique, voir la section 7.4.

7.3 Distance et Recherche sémantique dans Catalog2C

L'hypothèse 1 de recherche sémantique permet de relier les mots clés aux labels des concepts de l'ontologie du domaine. Ainsi, elle organise les mots clés en hiérarchie car les labels qui leur sont reliés en hiérarchie par la hiérarchie de leur concept. Dans cette section, nous allons définir une distance sémantique entre les mots clés dans la description de ressources. Pour

cela, nous passons d'abord par la définition d'une distance entre les labels de concepts de l'ontologie du CC. Cette distance (entre les labels de concepts) est une extension de l'approche de la distance de CORESE, qui est une distance atténuée par la profondeur des types dans l'ontologie et qui permet de mesurer la proximité entre des concepts d'une hiérarchie dans cette ontologie, voir chapitre 3 - section 3.4.3.2.

7.3.1 Distance entre les labels d'une hiérarchie de concepts

On peut à partir de la distance entre les concepts définir une distance entre leurs labels. Pour cela on suppose qu'un label est à distance nulle de son concept. De cette façon, la distance entre deux labels de deux concepts différents est la distance entre ces deux concepts et la distance entre deux labels d'un même concept est égale à zéro, voir définition 2.

Définition 2

Soit $(L_1, L_2) \in (L_H \times L_H)$ un couple de labels du couple de concepts $(t_1, t_2) \in (H \times H)$

Soit $D_{LH}(L_1, L_2)$ la distance sémantique entre des labels de concepts

Si $t_1 = t_2$

$$\text{Alors } D_{LH}(L_1, L_2) = 0 \quad (3)$$

Si $t_1 \neq t_2$

$$\text{Alors } D_{LH}(L_1, L_2) = \text{dist}(t_1, t_2) = \min_t \left(\sum_{x \in <t_1, t>, x \neq t_1} 1/2^{d_{H(x)}} + \sum_{x \in <t_2, t>, x \neq t_2} 1/2^{d_{H(x)}} \right) \quad (4)$$

Où $\text{dist}(t_1, t_2)$ est la distance entre les deux types de concepts t_1 et t_2 et t est un super type commun de t_1 et t_2 de profondeur maximale.

Pour comprendre la définition de cette distance, utilisons la dans deux cas. Dans le premier cas, calculons la distance sémantique entre les deux labels "acteur international" et "chef quartier" des concepts "Acteur_international" et "Chef_quartier" de l'espace métrique correspondante à la hiérarchie de concepts, extrait de l'ontologie du changement climatique, étendu par les labels des concepts, voir la Figure 27 ci-après.

$$D_H(\text{Acteur_international}, \text{Chef_quartier}) = 2.75$$

$$\text{Donc } D_{LH}(\text{acteur international}, \text{chef quartier}) = 2.75.$$

Dans le deuxième cas, calculons la distance sémantique entre les deux labels "acteur" et "acteur de la gouvernance". Ces deux labels sont associés au même concept "Acteur".

$$\text{Alors } D_{LH}(\text{acteur}, \text{acteur de la gouvernance}) = 0.$$

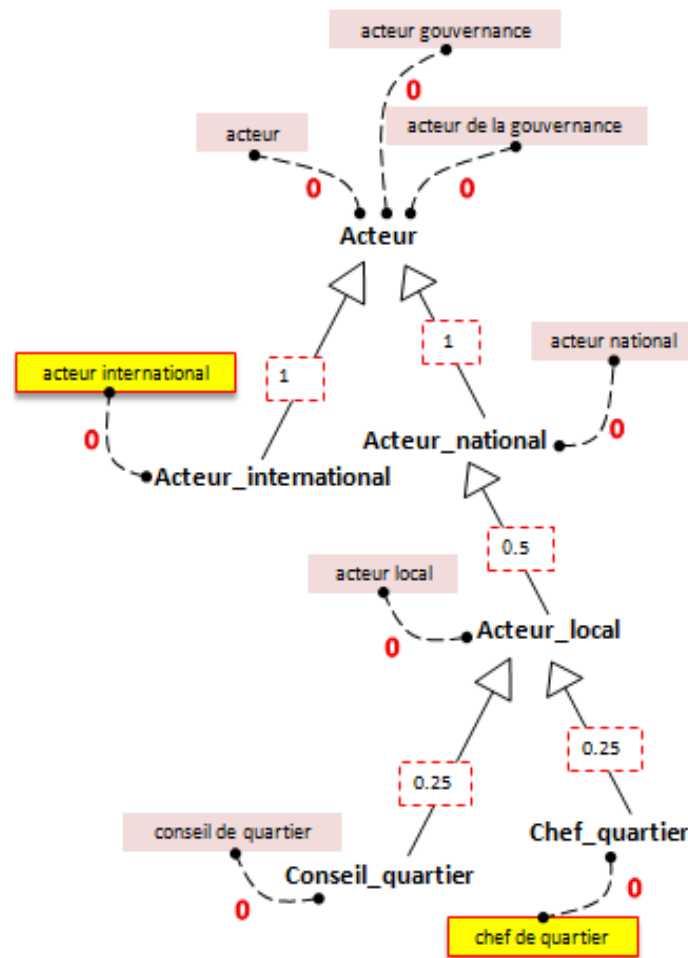


Figure 27 – Espace OntoCLUVA et métrique pour évaluer la distance sémantique entre des labels d’une hiérarchie de concepts d’une ontologie

$D_{LH}(L_1, L_2)$ est la distance sémantique que nous avons proposée pour évaluer la proximité des labels d’une hiérarchie de concepts.

Pour mettre ces équations en programme informatique, nous proposons les algorithmes de deux fonctions :

- `trouverConcept`, permettant de retrouver le concepts d’un label et de le retourner, voir Algorithme 1.
- `distanceEntreDeuxLabels`, permettant de retourner la distance sémantique entre deux mots clés donnés en paramètre. Cette fonction utilise la première fonction dans son algorithme, voir Algorithme 2.

Algorithme 1: Pour trouver l’URI d’un concept correspondant à un label

Fonction **trouverConcept**(label : chaîne): chaîne

- Début
 - Retourner la chaîne correspondant à l’URI du concept ayant un label correspondant à la chaîne entrée en paramètre.
- Fin

Algorithme 2 : Pour calculer la distance entre deux labels de concepts d'une ontologie

```

Fonction distanceEntreDeuxLabels(l1:chaîne, l2:chaîne): réel
Début
    Si (trouverConcept(l1) = trouverConcept (l2))
        retour 0
    Sinon
        retour distanceCORESE(trouverConcept (l1), trouverConcept (l2))
fin

```

Dans la suite, nous étendons encore cette distance entre des labels à une distance pour calculer la proximité entre des mots clés utilisés dans la description des ressources d'un domaine, pour ainsi aborder la distance sémantique entre des mots clés de ressources d'un domaine associés aux labels des concepts d'une ontologie de ce domaine.

7.3.2 Distance entre les mots clés des ressources d'un domaine

L'hypothèse 1 (voir section 7.1) permet de relier les mots clés dans les descriptions des ressources de partenaires du CC aux labels des concepts de l'ontologie du domaine du CC et ainsi, nous donne la possibilité de définir $D_{MH}(M_1, M_2)$, une distance sémantique entre deux mots clés du catalogue, voir définition 3, par rapport à la distance sémantique entre les labels définie précédemment.

Définition 3

Soit $(M_1, M_2) \in (M_C \times M_C)$ un couple de mots clés

Si $M_1 = M_2$

Alors $D_{MH}(M_1, M_2) = 0$ (5)

Si $\forall (L_1, L_2) \in (L_H \times L_H)$ un couple de labels du couple de concepts $(C_{L1}, C_{L2}) \in (C_H \times C_H)$

Tel que $L_1 \neq M_1$ OU $L_2 \neq M_2$

Alors $D_{MH}(M_1, M_2) = \infty$ (infini) (6)

Si $\exists (L_1, L_2) \in (L_H \times L_H)$ un couple de labels du couple de concepts $(C_{L1}, C_{L2}) \in (C_H \times C_H)$

Tel que $L_1 = M_1$ ET $L_2 = M_2$

Alors $D_{MH}(M_1, M_2) = D_{LH}(L_1, L_2)$ (7)

Où $D_{LH}(L_1, L_2)$ est distance entre les deux labels L_1 et L_2

Pour mettre ces équations en programmes informatiques, nous proposons les algorithmes de deux fonctions :

- **rechercherLabel**, permettant de chercher si un mot clé est un label et alors de retourner vrai ou faux, voir algorithme 3.

- `distanceEntreDeuxMotsClés`, permettant de retourner la distance sémantique entre deux mots clés donnés en paramètre. Cette fonction utilise les deux fonctions dans algorithmes 2 et 3 dans son algorithme, voir algorithme 4.

Algorithme 3 : Pour rechercher si un mot clé est (égal à) un label

```

Fonction rechercherLabel(mot clé : chaîne): booléen
• Début
  – chercher s’il y a un label égal au mot clé passé en argument et retourner vrai ou faux.
• Fin

```

Algorithme 4 : Pour calculer la distance entre deux mots clés

```

Fonction distanceEntreDeuxMotsClés(m1:chaîne, m2:chaîne): réel
Début
  Si (m1=m2)
    retour 0;
  Sinon Si (rechercherLabel(m1)=faux OU rechercherLabel(m2)=faux)
    retour 1000
  Sinon
    retour distanceEntreDeuxLabels(m1:chaîne, m2:chaîne)
fin

```

L’utilisation de cette distance sémantique entre deux mots clés nous permet de connaître pour un mot clé donné les mots clés les plus proches. Cela va donner à la recherche sémantique la possibilité de proposer aussi des résultats approchés.

Nous avons dans cette partie formalisé et donné des algorithmes pour être en mesure d’évaluer la distance sémantique entre deux mots clés à partir de la distance sémantique entre deux labels qui dépend de celle de leur concept. Dans la suite de cette section, nous utilisons cette distance sémantique pour améliorer la recherche par mot clé dans Catalog2C.

7.3.3 Recherche sémantique dans Catalog2C

La recherche sémantique dans Catalog2C commence quand un partenaire entre un mot clé pour paramètre de recherche dans le formulaire de recherche sémantique. Ensuite la fonctionnalité de recherche sémantique de Catalog2C charge, dans le moteur de recherche CORESE, l’ontologie du CC. Le mot clé est mesuré par rapport à tous les autres (les labels des concepts de l’ontologie du CC) avec la distance sémantique entre deux mots clés (CORESE charge l’espace ontologie du CC et applique la métrique). Ce qui permet d’avoir l’ensemble des voisins de ce mot clé (le voisinage du mot clé), voir la Figure 28 suivante.

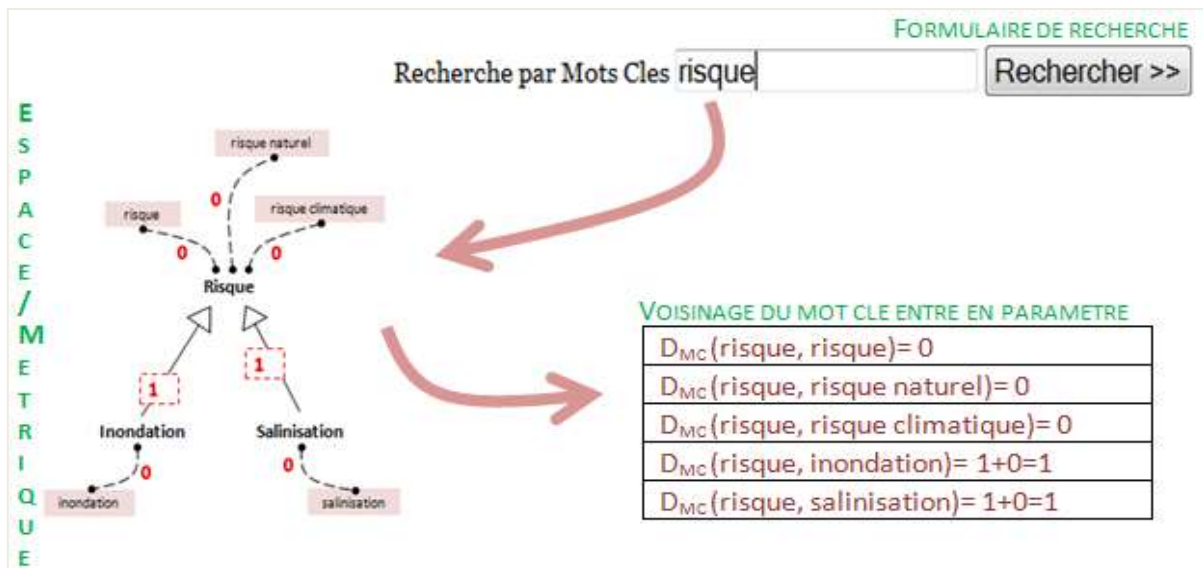


Figure 28 : Le voisinage du mot clé paramètre de la recherche déterminé à partir de l'espace-métrique qui est l'ontologie du CC et la distance sémantique entre deux mots clés.

Les résultats de la recherche sémantique, par mot clé, sont les descriptions des ressources dont les mots clés contiennent le mot clé (paramètre de la recherche) ou ses voisins, voir la Figure 29.

modèles et des services web des partenaires du projet CLUVA (CLimate change and Urbane Vulnerability in Africa).

Recherche par Mots Cles

- risque
- Expertise: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Exp00012>
Decrit par: http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#CLUVA_UGB
Mots Cles: Acteur secondaire, vulnérabilité, risque, catastrophe
- Expertise: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#IC004>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles: ontologie, changement climatique, risque, gouvernance
- Donnée: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#D0005>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles: Risque, changement climatique, mission, Acteur secondaire, Actor
- Modèle: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#M0012>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>
Mots Cles: adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance
- Modèle: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#M001212>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles: risque, changement climatique, etc.
- Service web: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#service0012>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part003>
Mots Cles: changement climatique, alea, Risque
- Sous classes
 - Modèle: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#M0012>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>
Mots Cles: adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance
 - Données: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#D0003>
Decrit par: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles: gouvernance, acteur gouvernance, mission, salinisation

Figure 29- La recherche de ressources qui ont un mot clé risque ou un voisin de risque. Pour cela nous avons ici les ressources dont les mots clés contiennent risque mais aussi les ressources dont les mots clés contiennent inondation et salinisation

Pour permettre à la recherche sémantique dans Catalog2C d'être plus performante, l'ontologie du CC doit être maintenue pour lui permettre d'évoluer dans le cadre de son utilisation. Dans la section suivante, nous présentons la maintenance de cette ontologie dans Catalog2C.

7.4 Maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C

Dans Catalog2C, notre approche de maintenance de l'ontologie du CC (initialement le patron de conception OntoCLUVA) se base sur l'hypothèse 2 (section 7.2), les statistiques d'utilisations des labels des concepts (de cette ontologie du CC) et des mots clés des ressources de partenaires (dans ce même catalogue) pour la découverte et l'adaptation de composants d'ontologie de façon semi-automatique.

Le premier tableau contient les fréquences de correspondance des labels des concepts d'OntoCLUVA aux mots clés dans les descriptions des ressources dans CatalogCLUVA, voir la Figure 61. Ce tableau est obtenu à partir d'une requête que nous avons lancé pour demander tous les labels des concepts de l'ontologie du CC et puis pour chaque label chercher le nombre de ressources qui l'ont parmi leurs mots clés.

Et le second tableau, quant à lui contient les fréquences d'utilisation des mots clés dans CatalogCLUVA. Dans ce tableau est aussi indiqué pour chaque mot clé la présence ou l'absence de correspondance dans l'ontologie. La Figure 62 provient des mots clés dans la description des ressources (avec leur nombre d'occurrence) et pour chaque mot clé, nous regardons dans l'ontologie du CC s'il y a un label de concept qui lui est associé (0 : si non et 1 : si oui).

Pour cela dans Catalog2C, nous avons proposé les tableaux illustrés par la Figure 61 et la Figure 62 suivantes dont la première présente les statistiques de correspondance des labels des concepts de l'ontologie du CC aux mots clés dans la description des ressources dans Catalog2C et la seconde montre les statistiques d'utilisation des mots clés dans Catalog2C et leur correspondance ou non à un label de concepts de cette ontologie du CC.

Ces deux tableaux nous permettent de faire un rapport d'évaluation pour les experts. Les rapports d'évaluation produits dans CatalogCLUVA obtenu dans la phase d'évaluation permettent aux experts de faire évoluer l'ontologie OntoCLUVA par la découverte et l'adaptation de composants d'ontologie.

Ainsi la maintenance dans Catalog2C se fait par les experts en quatre scénarios :

- la découverte et l'ajout d'un label à un concept par le bouton ajouter un label ( ),
- la découverte et l'ajout d'un concept par le bouton ajouter un concept ( ),
- la découverte d'une modification et la modification d'un concept par le bouton ()
- et l'ajout d'une relation entre deux concepts par le bouton ajouter une relation ( ).

Les boutons (  ,   ,  et  ) pour la maintenance de l'ontologie du CC sont présents sur les tableaux de statistiques dans les Figure 61 et Figure 62.

Dans la maintenance d'ontologie du CC, nous avons seulement des changements élémentaires que nous avons implémenté tous à l'exception de l'effacement ou la suppression d'un concept ou d'un label de concept. Parce que dans la construction du noyau (le patron de conception OntoCLUVA) de cette ontologie du CC, nous avons considéré la multidisciplinarité et la complexité du domaine. C'est ce qui fait que nous jugeons qu'un expert ou un groupe d'experts ne peuvent pas supprimer un concept ou un label de concept obtenue dans un contexte tel que le contexte de la construction d'OntoCLUVA du domaine multidisciplinaire et la complexe du changement climatique. Dans ce contexte un concept peut ne pas être pertinent pour un sous domaine donné et l'être pour un autre sous domaine.

Sémantique des changements

Nous n'avons pas proposé un mécanisme pour vérifier la sémantique des changements, qui sont nécessaires même si les changements sont validés par les experts comme cela doit l'être dans notre cas. Ce mécanisme permet de refuser les modifications qui ne respectent pas la sémantique de l'ontologie, avant même la validation pour permettre ainsi aux experts d'avoir moins de changements possibles à valider.

La propagation des changements

Le but de la propagation des changements est de modifier automatiquement les instances et les ontologies dépendantes afin de préserver leur consistance avec l'ontologie évoluée. Pour le cas de l'ontologie du CC utilisée dans Catalog2C, on n'a pas d'instances et d'ontologies

dépendantes, (voir la Figure 24 – Architecture du Catalog2C) ce qui simplifie le travail de maintenance de cette ontologie dans Catalog2C.

Validation des changements & versionning

Dans la maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C, ce sont les experts qui se chargent de valider les changements proposés. Mais à l'état actuel, la maintenance de l'ontologie se fait sans validation des changements par les experts. Après avoir validés un certain nombre de changements, les experts peuvent proposer une nouvelle version de l'ontologie du CC. Notre travail doit aussi dans l'avenir permettre la gestion des versions de cette ontologie. Ces travaux donneront aux utilisateurs (partenaires) le choix d'ouvrir le Catalog2C avec une version donnée de l'ontologie du CC, avec la version des changements validés ou la version de tous les changements même ceux non encore validés.

Dans cette partie, nous avons discuté sur les spécificités dans la maintenance de l'ontologie du CC dans Catalog2C mais aussi nous avons décrit ce qui manque à ce travail pour la maintenance de cette ontologie. Ces manquements constituent les perspectives de nos recherches sur ce cadre de la maintenance des connaissances du domaine du CC dans Catalog2C.

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche sémantique de ressource dans Catalog2C basée sur une distance sémantique entre mots clés dans la description des ressources de partenaires dans le domaine du CC.

La distance sémantique entre mots clés est basée sur la distance sémantique entre un concept requête et un autre concept par la distance de CORESE étendue aux labels des concepts et les mots clés des experts appariés aux labels de l'ontologie CC.

La recherche par mot clé dans ce catalogue n'est pas l'originalité de ce travail, mais c'est le fait d'associer aux mots clés leur sens dans le domaine et de déterminer un voisinage pour un mot clé donné.

Dans la gestion des compétences dans le domaine du CC avec Catalog2C, nous ne traitons pas de compétences individuelles (personnelles) mais de compétences de partenaires (qui sont des organisations ou des équipes de recherche, etc.). Et en plus de gérer les compétences de partenaires, nous gérons aussi les données et les modèles de ces partenaires pour permettre le

partage des connaissances de ce domaine du changement climatique entre des acteurs partenaires.

La gestion des compétences est indispensable pour le domaine du changement climatique. Parce que ce domaine est multidisciplinaire et complexe et fait intervenir différentes disciplines avec différents acteurs qui doivent collaborer.

Ainsi Catalog2C, en donnant la possibilité aux partenaires d'identifier des ressources disponibles chez les autres partenaires, constitue une première étape d'intégration des ressources de ces partenaires.

En plus d'être une première étape d'intégration, ce catalogue permet d'enrichir les connaissances que nous avons sur les ressources des partenaires par :

- des statistiques sur les formats des ressources, leur disponibilité, leur localisation, etc.
- la maintenance de l'ontologie du changement climatique, par la découverte et l'adaptation de composants d'ontologies, dans l'utilisation de ce catalogue de ressources par des partenaires.

L'ontologie du CC contenant les connaissances nécessaires sur les ressources à intégrer (déjà décrites dans Catalog2C) et des statistiques sur les ressources nous permettra de proposer une meilleure approche d'intégration de ces ressources. Ainsi la suite de ce travail sur la gestion des ressources du CC est de voir comment utiliser l'ontologie du changement climatique, créée à partir d'OntoCLUVA et maintenue par Catalog2C, et les statistiques sur les descriptions des ressources des partenaires de CLUVA pour résoudre le problème d'intégration des ressources des partenaires de ce projet CLUVA.

Chapitre 8 :

La simulation multi-agent sémantique des systèmes complexes : Ajout d'une dimension ontologique pour la représentation sémantique de l'environnement

Nombreux sont les travaux dans le domaine des systèmes multi-agents (SMA) s'intéressant aux ontologies. Mais dans ces travaux peu sont pour la simulation multi-agent et ne répondent aux besoins de faire accéder les agents aux connaissances du domaine de leur environnement comme la souligné [69] qui déclare que : « les agents doivent comprendre leur environnement » et par [47] qui ajoute que « l'environnement doit définir une ontologie qui fournit une représentation conceptuelle du domaine. Cette ontologie doit permettre de décrire la structure de l'environnement, les propriétés observables des objets, des ressources et des agents et leurs relations ». Ce qui nous donne une nouvelle théorie de modélisation :

Théorie de modélisation de systèmes complexes

La modélisation des systèmes complexes avec les SMA doit prendre en compte les connaissances du domaine de l'environnement des agents et permettre aux agents d'accéder à ces connaissances pour leurs communications et leurs comportements.

Cette théorie ajoute en plus des quatre dimensions (agent, environnement, interaction et organisation) d'un système multi-agent une cinquième dimension : ontologie du domaine de l'environnement des agents. Pour cette théorie de modélisation, nous proposons dans ce chapitre une première architecture de SMA sémantique fondée sur celle des SMA classiques donnant une place importante aux ontologies de domaine.

Cette architecture que nous proposons est originale dans la mesure où:

- elle fait une distinction entre les informations et les connaissances sur l'environnement d'un SMA. De ce fait, nous ne parlons plus de SMA seulement mais de SMA sémantique ;
- elle ajoute à l'environnement une couche de connaissances du domaine, composée d'ontologies contenant des concepts et des relations, de règles et de faits, permettant (1) d'associer à chaque agent un concept de l'ontologie du domaine et (2) de permettre aux agents d'accéder à ces connaissances ;
- elle stocke les faits (informations), correspondant aux conditions initiales et aux résultats de la simulation pour permettre de faire plus de traitements sur ces faits ou de les faire partager entre les experts ;
- elle permet une visualisation sémantique et sélective du résultat de la simulation à partir de ces connaissances incluant les faits et d'une requête de visualisation.

Dans la première section, nous présentons l'architecture d'un SMA sémantique. Ensuite dans la seconde section, nous montrons les comportements des agents d'un SMA sémantique, puis les communications des agents d'un SMA sémantique et, enfin, nous discutons des apports de cette architecture répondant aux exigences de la nouvelle théorie de modélisation dans l'étude des systèmes complexes.

8.1 Une architecture de système multi-agent sémantique

Dans notre architecture de système multi-agent sémantique, nous avons un agent particulier appelé **agent ciel sémantique**, qui est la couche sémantique de l'environnement et

un ensemble d'agents appelés **agents sémantiques**, car accédant aux connaissances du domaine de leur environnement pour leurs communications et leurs comportements. La Figure 30 qui suit est une illustration de notre architecture.

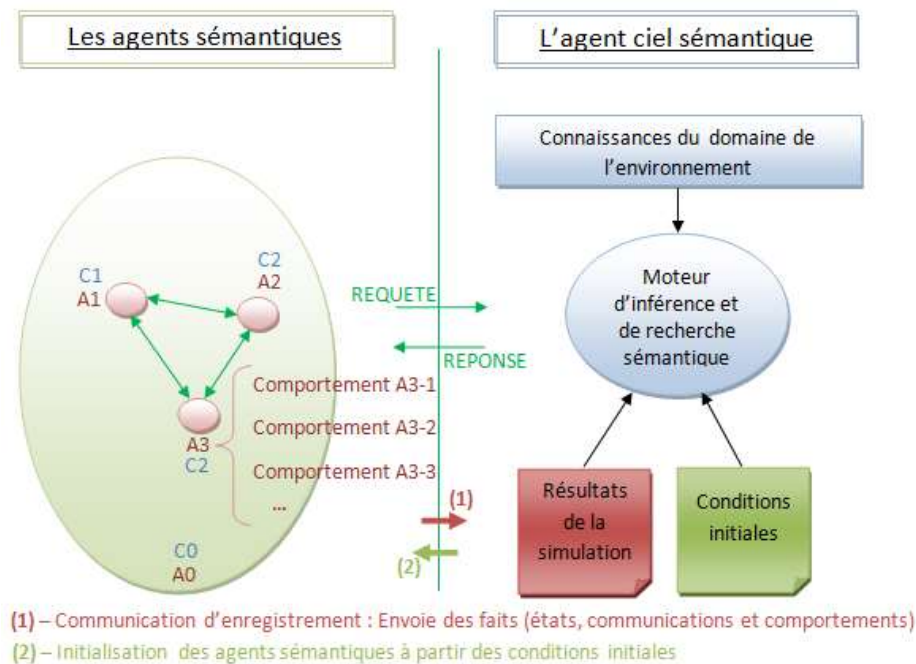


Figure 30: Architecture d'un système multi-agent sémantique

Pour expliquer notre proposition dans cette Figure 30, nous parlons dans cette section d'abord de l'agent ciel sémantique. Ensuite nous revenons sur les agents sémantiques qui, dans l'architecture classique de SMA, sont appelés simplement agents. Puis nous montrons les comportements de ces agents (agent ciel sémantique et agents sémantiques) et pour finir nous parlons des communications entre les agents.

8.1.1 Agent ciel sémantique : une couche sémantique de l'environnement

L'agent ciel sémantique est fondamental dans l'architecture. Il est considéré comme la couche qui vient pour compléter l'environnement (d'exécution des agents) des connaissances de son domaine.

Il est composé de quatre (4) éléments, à savoir :

- **Connaissances du domaine de l'environnement** : Il contient les connaissances du domaine représentées par des ontologies (contenant des concepts, des attributs et des relations), des règles et des faits.

- **Conditions initiales :** Elles sont représentées par des faits contenant les informations initiales sur les agents sémantiques à créer dont l'environnement qui est aussi un agent sémantique.
- **Résultats de la simulation :** Ils sont représentés comme les conditions initiales par des faits, mais contenant les informations sur l'état, les communications et les comportements de chaque agent sémantique. Ces informations sont obtenues de la part des agents sémantiques initialement créés qui envoient pour chaque instant de la simulation leur situation à l'agent ciel sémantique qui les écrit dans le fichier résultats de la simulation.
- **Moteur d'inférence et de recherche sémantique:** Il permet de conduire des raisonnements logiques et de dériver des conclusions à partir des connaissances du domaine de l'environnement, des conditions initiales et des résultats de la simulation. Ce moteur permet aussi la recherche sémantique sur les connaissances.

L'agent ciel sémantique est le premier agent créé et qui se charge d'initialiser les agents sémantiques à partir des conditions initiales et des connaissances. Plus loin dans cette partie, nous verrons les comportements de l'agent ciel sémantique et ses communications avec les agents sémantiques pour permettre à ces derniers d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement pour leurs communications et leurs comportements.

8.1.2 Les agents sémantiques

Un agent sémantique est un agent comme défini dans [47], mais ayant en plus la possibilité dans sa phase de délibération d'accéder (envoyer une demande et avoir une réponse) aux connaissances du domaine de son environnement par l'intermédiaire de l'agent ciel sémantique. Ainsi les agents sémantiques ont des comportements sémantiques définis comme des comportements qui peuvent accéder aux connaissances du domaine et les utiliser.

La Figure 31 illustre notre vision de l'agent sémantique. Dans l'architecture de SMA sémantique proposée, nous avons ajouté à l'architecture classique d'agent dans [47] (1) une couche de connaissances du domaine de l'environnement, (2) la possibilité que l'agent sémantique puisse accéder à ses connaissances dans sa phase de délibération et (3) le fait que l'agent sémantique est associé à un concept de l'ontologie du domaine de l'environnement.

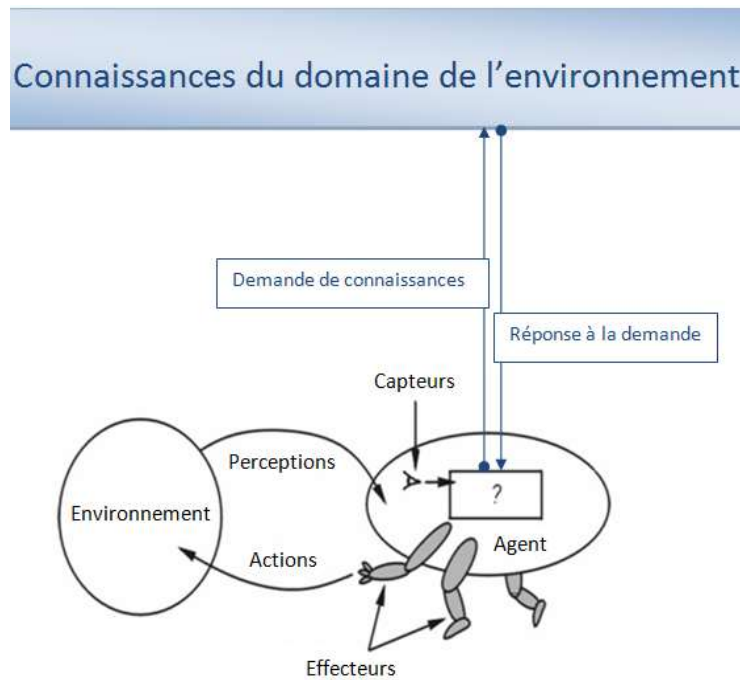


Figure 31: Architecture de l'agent sémantique

Dans cette section, nous avons décrit l'architecture d'un système multi-agent sémantique. Dans les deux sections qui suivent nous donnons les comportements des agents (agent sémantique et agent ciel sémantique) et les communications entre ces agents du système multi-agent sémantique.

8.2 Les comportements des agents d'un SMA sémantique

Nous allons voir dans ce qui suit les tâches des agents dans notre architecture. Il faut dire que pour qu'un agent exécute des tâches, nous avons tout d'abord besoin de définir ses tâches. Les tâches sont appelées des **comportements** ou des **behaviours**.

Certains comportements des agents sont génériques, c'est-à-dire ne dépendent pas des phénomènes à étudier ni du domaine en question et d'autres sont spécifiques aux phénomènes à étudier.

8.2.1 Les comportements de l'agent ciel sémantique

L'agent ciel sémantique dispose des comportements suivants (1), (2), (3) et (4) représentés par les quatre diagrammes d'activités de la Figure 32 qui sont tous des comportements génériques :

- (1) **initialiser les agents sémantiques** ; ce comportement permet à l'agent ciel sémantique de créer les agents sémantiques à partir des conditions initiales, voir le diagramme d'activités (1) de la Figure 32 suivante.
- (2) **envoyer les connaissances aux agents demandeurs** ; il permet à l'agent ciel sémantique de satisfaire les demandes de connaissances des agents sémantiques. C'est un comportement cyclique. Il commence par instancier le moteur d'inférence et de recherche sémantique. Puis charge dans le moteur les connaissances et tourne sur les activités « *Consultation boîte de réception* », « *Traitement demande de connaissances* » et « *Envoi réponse* » ou sur les activités « *Consultation boîte de réception* » et « *Attente* ». Ce comportement se termine à la fin de la simulation, voir le diagramme d'activités (2) de la Figure 32 suivante.
- (3) **écrire les résultats de la simulation** ; avec ce comportement l'agent ciel sémantique reçoit les informations ou faits (sur les états, les communications et les comportements exécutés) provenant des agents sémantiques pour les écrire dans un fichier, appelé résultats de la simulation. Ce comportement est cyclique, voir le diagramme d'activités (3) de la Figure 32 suivante.
- (4) **visualiser une demande sur les résultats de la simulation** ; ce comportement permet à l'agent ciel sémantique de visualiser le résultat de la simulation. A l'exécution de ce comportement, l'agent ciel sémantique instancie d'abord un moteur d'inférence dans lequel il charge le méta modèle, le modèle, les conditions initiales et les résultats de la simulation qui sont les connaissances (incluant les faits) à visualiser. Il faut noter que les conditions initiales et les résultats de la simulation à visualiser sont les instances des concepts et des relations entre ces concepts du domaine de l'environnement. Ainsi, l'agent ciel sémantique peut répondre à des demandes de visualisation (des requêtes) sur les résultats de simulation et les conditions initiales chargés en faisant des inférences sur les connaissances, voir le diagramme d'activités (4) de la Figure 32 suivante.

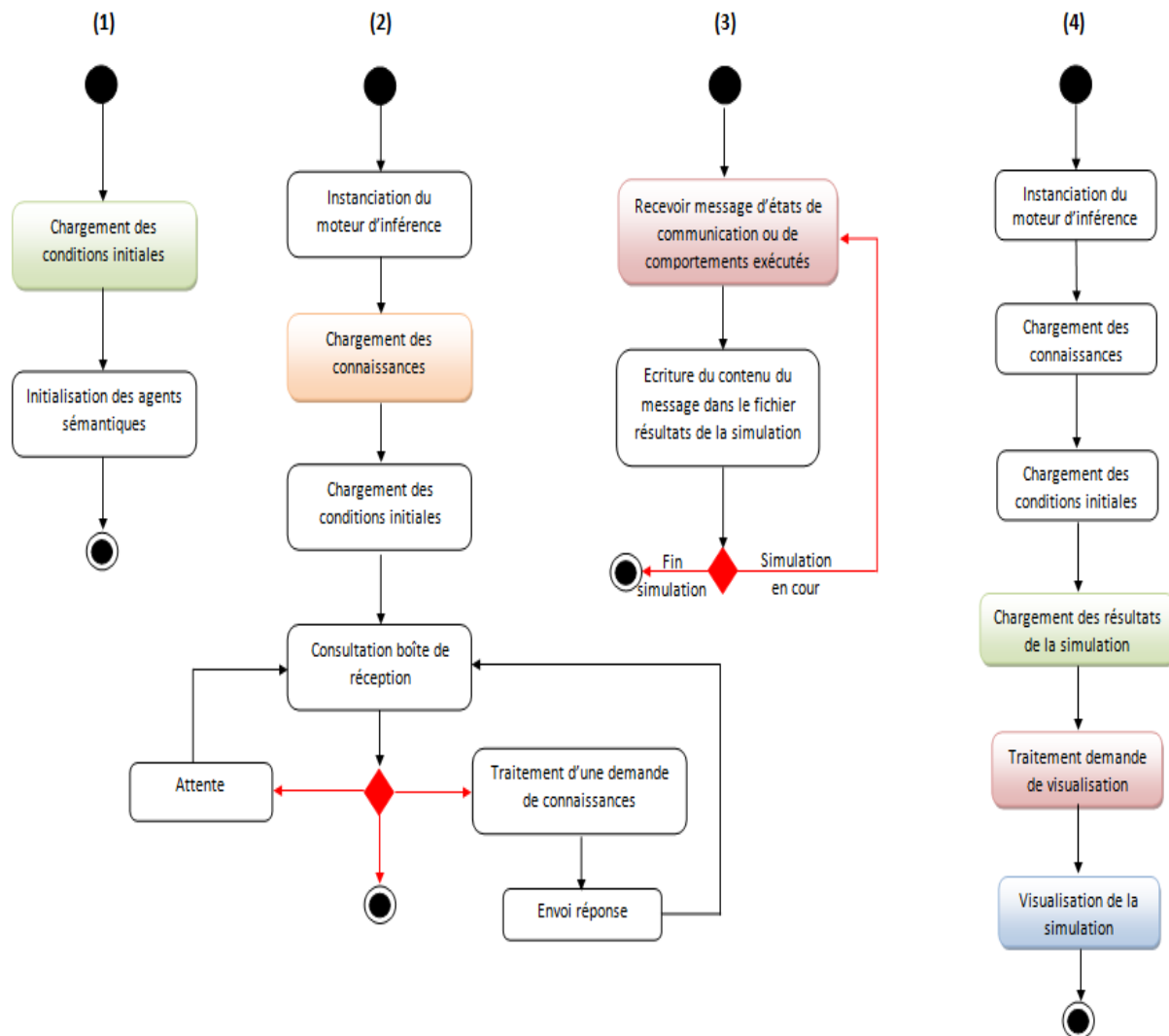


Figure 32: Diagrammes d'activités de l'agent ciel sémantique

8.2.2 Les comportements des agents sémantiques

Dans cette architecture les agents sémantiques ont des comportements génériques relatifs à l'abstraction dans notre architecture et à la gestion des connaissances et des comportements spécifiques aux modèles, problèmes ou phénomènes à étudier.

8.2.2.1 Les comportements génériques des agents sémantiques

Les agents sémantiques disposent des comportements génériques suivants (5) et (6) de demander des connaissances et d'informer l'agent ciel sémantique de leurs activités:

- (5) **demande des connaissances** ; ce comportement permet à un agent sémantique de demander des connaissances à l'agent ciel sémantique et de recevoir en retour des connaissances ou d'abandonner si le délai d'attente du retour est atteint.

(6) **informer l'agent ciel sémantique (ACS)** ; il permet à un agent sémantique à chaque instant d'informer l'agent ciel sémantique sur son état, ses communications et ses comportements exécutés. Ce qui permet à ce dernier en exécutant son comportement « *écrire les résultats de la simulation* » de constituer les résultats dans un fichier.

Ces deux comportements génériques d'un agent sémantique sont représentés par les deux diagrammes d'activités de la Figure 33 suivante.

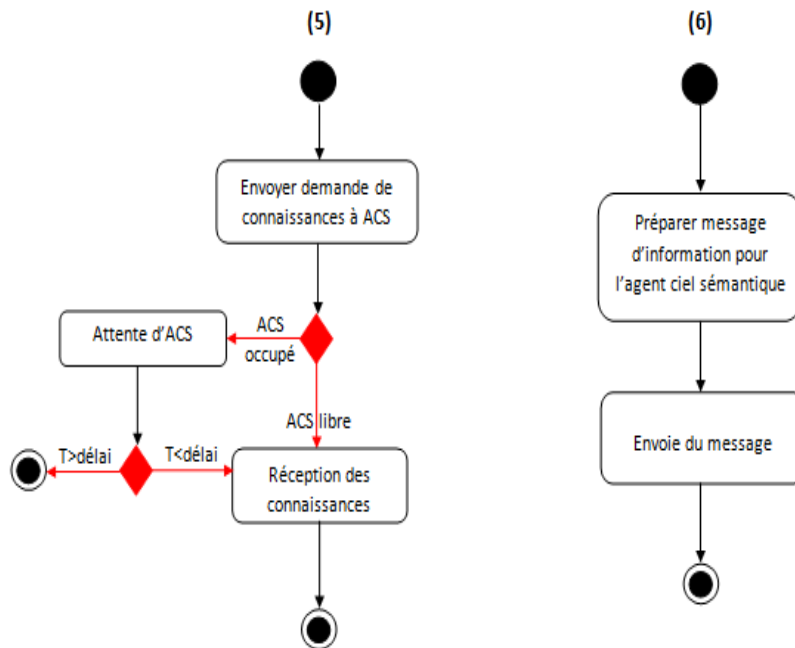


Figure 33: Les diagrammes d'activités d'un agent sémantique

8.2.2.2 Les comportements spécifiques des agents sémantiques

Les agents sémantiques, suivant le modèle à simuler, ont des comportements spécifiques. Ils sont laissés à l'appréciation de l'expert qui veut simuler son modèle. Par exemple, pour un agent « Société » d'un système multi-agent modélisant le principe du pollueur payeur, nous avons les comportements spécifiques :

- Consommer crédit d'émission ;
- Vendre crédit d'émission ;
- Acheter crédit d'émission ;
- Appliquer une nouvelle politique d'émission ;
- Etc.

8.3 Les communications entre les agents

Pour que plusieurs agents arrivent à collaborer, ils doivent s'échanger des messages. Chaque agent possède une sorte de boîte aux lettres qui contient les messages qui lui sont envoyés par les autres agents. Ces boîtes aux lettres sont sous la forme d'une liste qui contient les messages selon l'ordre chronologique de leur arrivée.

Il y a cinq types de communications (échanges de messages) dans un SMA sémantique :

- (1) La **communication de demande d'humanisation** d'un agent sémantique vers l'agent ciel sémantique voir (1) Figure 34, cette communication permet à un agent sémantique de demander des connaissances à l'agent ciel sémantique.
- (2) La **communication d'humanisation** de l'agent ciel sémantique vers un agent sémantique, voir (2) Figure 34. Cet agent ciel sémantique est comme l'environnement, un agent qui peut interagir avec les autres agents mais ici pour satisfaire leurs demandes de connaissances.

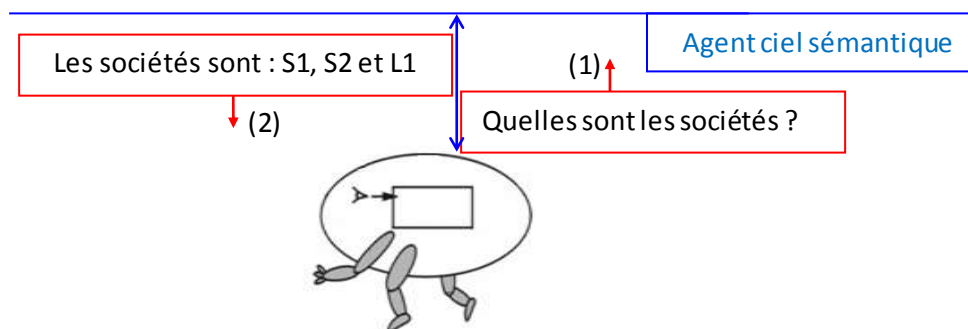


Figure 34 : illustration de la communication d'humanisation entre un agent sémantique et l'agent ciel sémantique.

- (3) La **communication naturelle** est entre les agents sémantiques, voir (3) et (4) Figure 35. Comme dans les autres architectures de SMA classiques, dans celle d'un SMA sémantique, les agents (agents sémantiques) communiquent par envoi de messages.

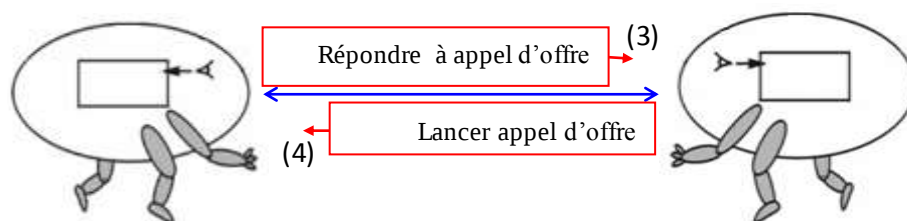


Figure 35 : illustration de la communication naturelle entre deux agents sémantiques.

- (4) La **communication demande d'enregistrement** d'un agent sémantique vers l'agent ciel sémantique voir (5) Figure 36 permet à un agent sémantique, après sa création et

pour chaque pas de temps ou chaque événement, d'envoyer les informations (les faits) le concernant à l'agent ciel sémantique.

- (5) La **communication d'enregistrement** est entre l'agent ciel sémantique et un agent sémantique. Après avoir écrit les informations envoyées par un agent sémantique dans une base de faits qui constitue le résultat de la simulation, l'agent ciel sémantique envoie un message pour informer l'agent sémantique, voir (6) Figure 36. cette communication est optionnelle pour éviter d'avoir trop de communication dans le SMA sémantique.

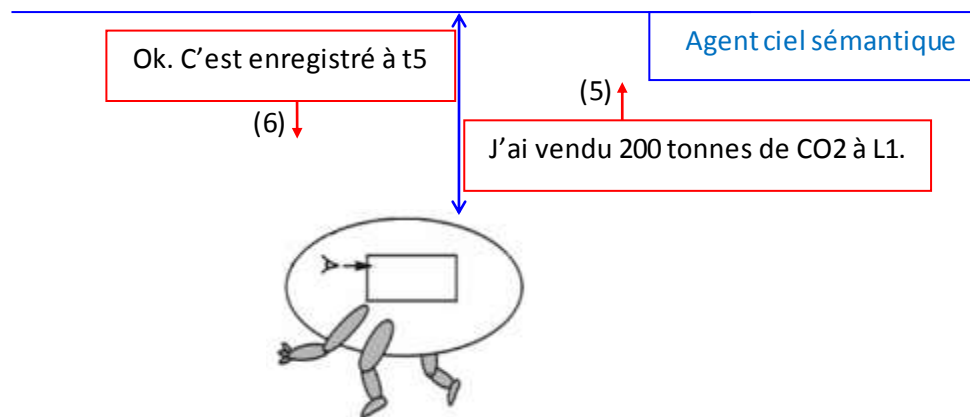


Figure 36 : illustration de la communication d'enregistrement entre un agent sémantique et l'agent ciel sémantique.

Nous avons ajouté en plus de la communication classique entre agents (envoi de message et réponse) deux autres types de communications entre agent sémantique et agent ciel sémantique (1) pour demander et recevoir des connaissances et (3) pour informer de ses affaires (son état, ses comportements et ses communications).

Les communications des agents sémantiques avec l'agent ciel sémantique doivent être normalisées.

Pour permettre d'échanger non pas un message texte mais un message au format de connaissance, par exemple:

- OWL, RDFS et RDF pour les réponses
- Et SPARQL pour les demandes de connaissances.

8.4 Discussion

Nous avons dans ce chapitre proposé une architecture de SMA qui met en pratique une théorie de modélisation de systèmes complexes dans laquelle les agents accèdent aux

connaissances du domaine de leur environnement pour leurs communications et leurs comportements.

Apport de l'architecture : des informations aux connaissances

L'information consiste à *savoir ce qui se passe*. En d'autres termes l'information est un fait, une perception. Voici quelques exemples d'informations dans le cadre du principe du pollueur payeur:

- Une société A émet du CO₂.
- Le débit d'émission de la société A est de 20 tonnes.
- La société A vend son crédit à une société B.
- Une société C est amendée.
- Etc.

Pendant des siècles, on a cru que l'information était la base de la communication. Alors que l'information n'est qu'une toute petite partie de la communication. La communication se base sur la connaissance, qui est l'information et l'abstraction de l'information, et sur l'inférence.

Pour comparer et voir l'apport de notre théorie de modélisation de SMA sémantique par rapport à la théorie de modélisation de SMA classique, il faut comprendre la différence entre l'information et la connaissance. Ainsi de la même façon que la connaissance est une information et l'abstraction de cette information, un SMA sémantique est un SMA classique et l'abstraction de ce SMA (connaissance du domaine de l'environnement accessible aux agents).

Apport de l'architecture pour l'intégration de SMA : abstraction SMA par un agent ciel sémantique

Dans l'architecture de systèmes multi-agents sémantique que nous avons proposé, le système peut être vu comme un agent : l'agent ciel sémantique contenant les connaissances du domaine, les conditions initiales de la simulation et les résultats de la simulation, voir la Figure 37.

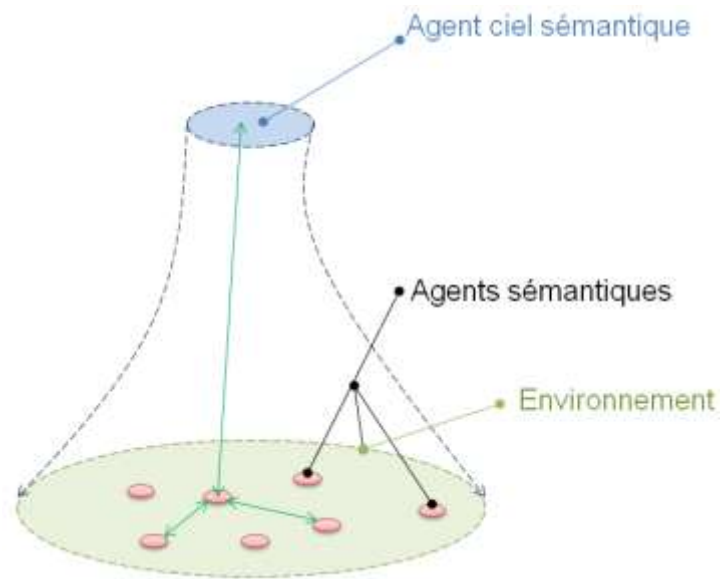


Figure 37 : Abstraction du système multi-agent sémantique en son agent ciel sémantique

Visualisation sémantique des résultats

Donc en tant que agent, le système peut communiquer avec les agents ciels sémantiques d'autres systèmes multi-agents sémantiques ; d'où la communication entre systèmes multi-agents sémantiques.

Apport de l'architecture pour l'intégration de SMA : communication entre SMA par leur agent ciel sémantique

C'est la possibilité d'abstraction qui fait l'originalité de l'architecture d'un système multi-agent sémantique que nous avons proposée. Cette abstraction nous permet d'aborder la communication entre des systèmes puis l'intégration dans la suite dans ce chapitre.

Dans la réalité, les systèmes ont des fonctionnements en interne qui découlent de leurs connaissances, de l'ensemble de leurs organes communicantes (les agents). De plus ces systèmes collaborent et communiquent pour atteindre un objectif.

Mais aussi les agents sémantiques d'un système multi-agent sémantique 1 (d'un agent ciel sémantique 1) peuvent communiquer avec les agents sémantiques d'un autre système multi-agent sémantique 2 (d'un agent ciel sémantique 2) en passant par les agents ciel sémantiques 1 et 2. Par exemple, la communication (a1 et a2) implique les communications : (a1, agent ciel sémantique 1), (agent ciel sémantique 1, agent ciel sémantique 2) et (agent ciel sémantique 2, a2), voir la Figure 38.

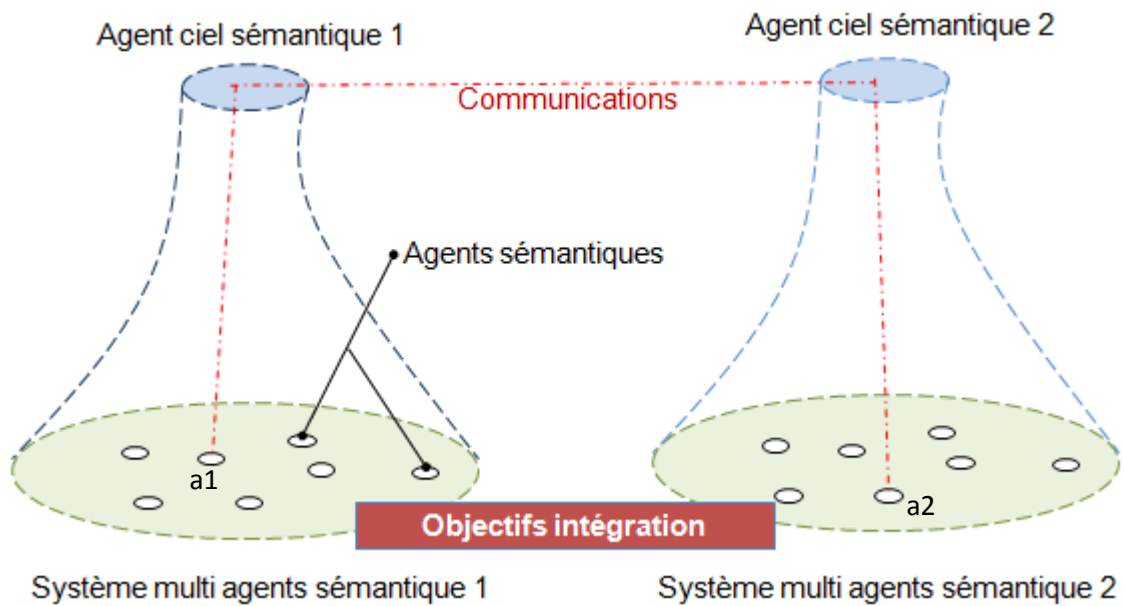


Figure 38 : communication entre deux agents de deux systèmes multi-agents par l'intermédiaire de leur agent ciel sémantique

Pour l'intégration des systèmes complexes, avec l'architecture proposée dans ce chapitre, nous commençons par le constat de l'abstraction possible d'un SMA sémantique en son agent ciel sémantique. Ce qui permet de voir le système d'intégration comme un méta-SMA où les agents partagent leurs connaissances.

Autres architectures de SMA sémantiques

Nous avons une première architecture de SMA sémantiques avec un seul agent ciel sémantique. Mais nous allons voir d'autres architectures de SMA sémantiques :

- Plusieurs agents ciel sémantique qui forment la couche sémantique (partitionnement et organisation des connaissances). Cette architecture peut être utilisée dans le cas de l'étude des comportements de populations avec des cultures différentes (connaissances différentes) exposées à un même risque, voir les deux premières architectures de la Figure 39.
- Les agents sémantiques stockent eux même les connaissances du domaine de leur environnement, voir les deux dernières architectures Figure 39.
 - Cas 1 : chaque agent sémantique dispose de toutes les connaissances du domaine de son environnement ;
 - Cas 2 : les agents sémantiques acquièrent progressivement les connaissances du domaine de leur environnement (apprentissage) ainsi

après une demande de connaissances ils ajoutent ces connaissances dans leur ontologie ;

- Etc.

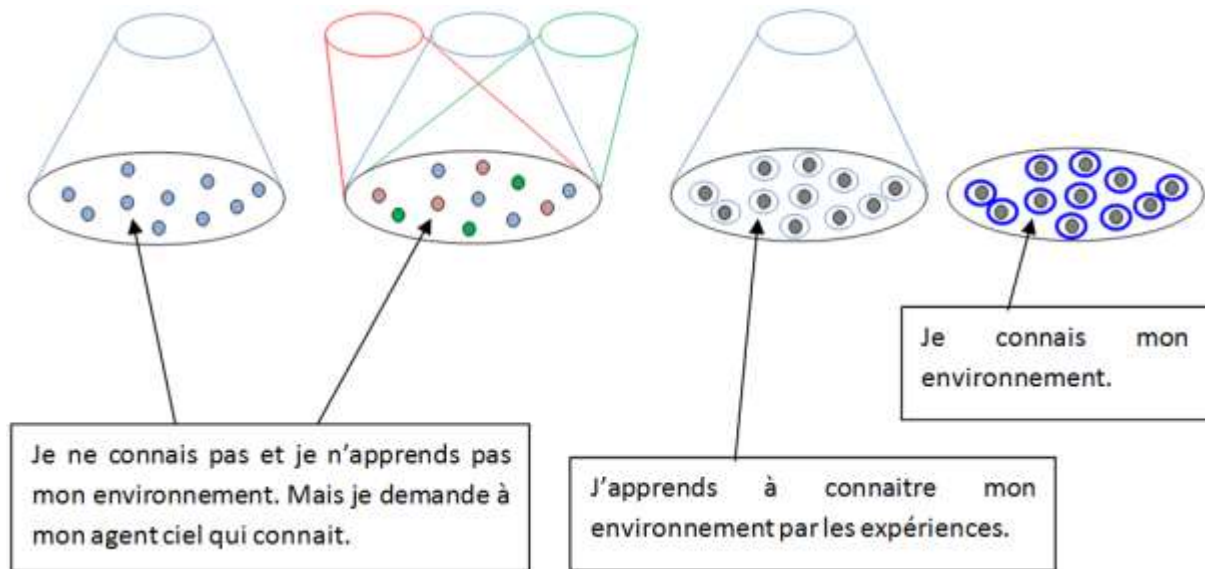


Figure 39 : différentes architectures possibles pour la conception d'un système multi-agent sémantique

8.5 Conclusion

Dans la théorie actuelle de modélisation des systèmes multi-agents, on parle de quatre dimensions qui sont : agent, environnement, interaction et organisation. Dans ces dimensions la connaissance du domaine de l'environnement des agents n'est pas prise en compte.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une théorie de modélisation de systèmes complexes ajoutant à la théorie actuelle de modélisation des systèmes multi-agents une nouvelle dimension : ontologie du domaine de l'environnement des agents. Ainsi nous avons cinq dimensions pour un système multi-agent : *ontologique, agent, environnement, interaction et l'organisation*. Cette théorie permet aux agents d'un SMA d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement et utiliser ces connaissances dans leurs comportements et leurs communications. Ce qui, autrement, permet d'ajouter à la modélisation des systèmes complexes, en plus de sa dimension quantitative (environnement), sa dimension qualitative (ontologie). Pour cette théorie, nous avons proposé une première architecture de système multi-agent sémantique. Cette architecture permet une visualisation sémantique et sélective sur le résultat de la simulation.

Dans le chapitre 9 suivant, nous présentons l'application de cette architecture à la réalisation d'un simulateur sémantique des modèles de systèmes complexes du domaine du

CC en particulier le modèle du principe du pollueur payeur. Mais aussi dans le chapitre 10, nous présentons l'implémentation et un prototype du simulateur sémantique des modèles de systèmes complexes de ce domaine du CC pour le cas du principe du pollueur payeur.

A court terme, nous allons voir comment normaliser les communications d'humanisation et d'enregistrement qui consistent à échanger des messages contenant des connaissances, par exemple dans l'architecture proposée dans cet article entre un agent sémantique et l'agent ciel sémantique. Ce travail va permettre aux agents de recevoir et d'envoyer des messages aux formats du web sémantique par exemple :

- OWL, RDFS et RDF pour les réponses ;
- Et SPARQL pour les demandes de connaissances.

A moyen terme, nous verrons l'intégration de SMA sémantiques. Nous verrons aussi, à long terme, d'autres architectures de SMA sémantique pour permettre le choix d'architecture de SMA sémantiques suivant la nature des systèmes complexes à étudier.

Chapitre 9

Un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique

De nos jours les modèles qu'on veut étudier sont devenus de plus en plus complexes car ils font interagir des entités autonomes qui dans leurs processus de décisions accèdent aux connaissances du domaine de leur environnement. C'est aussi le cas des modèles du domaine du CC qui ne se limitent plus seulement à comprendre le climat et prédire son évolution. Mais ils font intervenir dans leur conception les personnes ou les populations et les institutions qui sont des entités autonomes qui interagissent entre elles et accèdent aux connaissances dans leurs comportements et dans leurs communications. Pour exemple de modèles de ce domaine du CC, nous pouvons citer le principe du pollueur payeur, l'adaptabilité des populations face aux risques, l'impact de la connaissance dans le renforcement de la résilience des populations, etc.

Le chapitre précédent a présenté l'architecture que nous avons proposée pour répondre à cette théorie. Dans celui-ci, nous appliquons cette architecture pour la réalisation d'un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique. Ce simulateur sémantique est nommé SimSem2C et est un instrument qui permettra aux acteurs de la gouvernance de modéliser et de simuler ces modèles d'une nouvelle génération pour ainsi comprendre et prendre des décisions concernant entre autre les problèmes liés à la résilience, à l'adaptation ou encore à la vulnérabilité.

Ainsi dans la première section de ce chapitre, nous présentons les niveaux des éléments de l'architecture du SMA sémantique qui sont le niveau contenant les éléments génériques pour un domaine et le niveau contenant les éléments spécifiques à un modèle dans ce domaine. Puis dans la deuxième section, nous présentons les éléments génériques de SimSem2C comme les connaissances génériques du CC, le formalisme de représentation des connaissances et le moteur d'inférence et de recherche sémantique, etc. Enfin dans la section 3, nous présentons les éléments spécifiques à un modèle à simuler dans SimSem2C et, dans ce cas, nous prenons pour exemple le modèle du principe du pollueur payeur.

9.1 Les niveaux des éléments de l'architecture du SMA sémantique

Les éléments de l'architecture du SMA sémantique, dans la Figure 30 du chapitre précédent, peuvent être vus sous deux niveaux : le niveau générique et le niveau spécifique, voir Figure 40.

Dans la Figure 40, l'agent ciel sémantique dans le niveau générique pour un domaine donné contient un moteur d'inférence et de recherche sémantique, les connaissances génériques du domaine de l'environnement, les conditions initiales et les résultats de la simulation. Cet agent ciel sémantique à ce niveau générique doit implémenter les comportements "*initialiser les agents sémantiques*", "*écrire les résultats de la simulation*" et "*envoyer les connaissances aux agents demandeurs*" mais aussi les communications "*humanisation*" et "*enregistrement*". Pour le cas des agents sémantiques à ce niveau générique, on propose un agent sémantique qui est une classe abstraite implémentant les communications et les comportements génériques des agents sémantiques, c'est-à-dire la communication "*demander humanisation*"

et "demander enregistrement" et les comportements "demander des connaissances" et "informer l'agent ciel sémantique".

Pour le niveau spécifique dans la Figure 40, l'agent ciel sémantique contient les connaissances spécifiques au modèle à simuler. Ces connaissances spécifiques ont des relations avec les connaissances génériques, car ils viennent pour les compléter de façon à couvrir le besoin de connaissances pour la simulation de ce modèle. Mais aussi pour ce niveau, les agents à implémenter sont des spécialisations de la classe abstraite agent sémantique du niveau générique et sont associés dans ce niveau spécifique aux concepts du domaine de l'environnement. Ces agents sémantiques ont des comportements spécifiques et des communications naturelles à proposer lors de la modélisation par le modélisateur ou l'expert.

La section suivante présente les éléments génériques du simulateur sémantique du changement climatique SimSem2C.

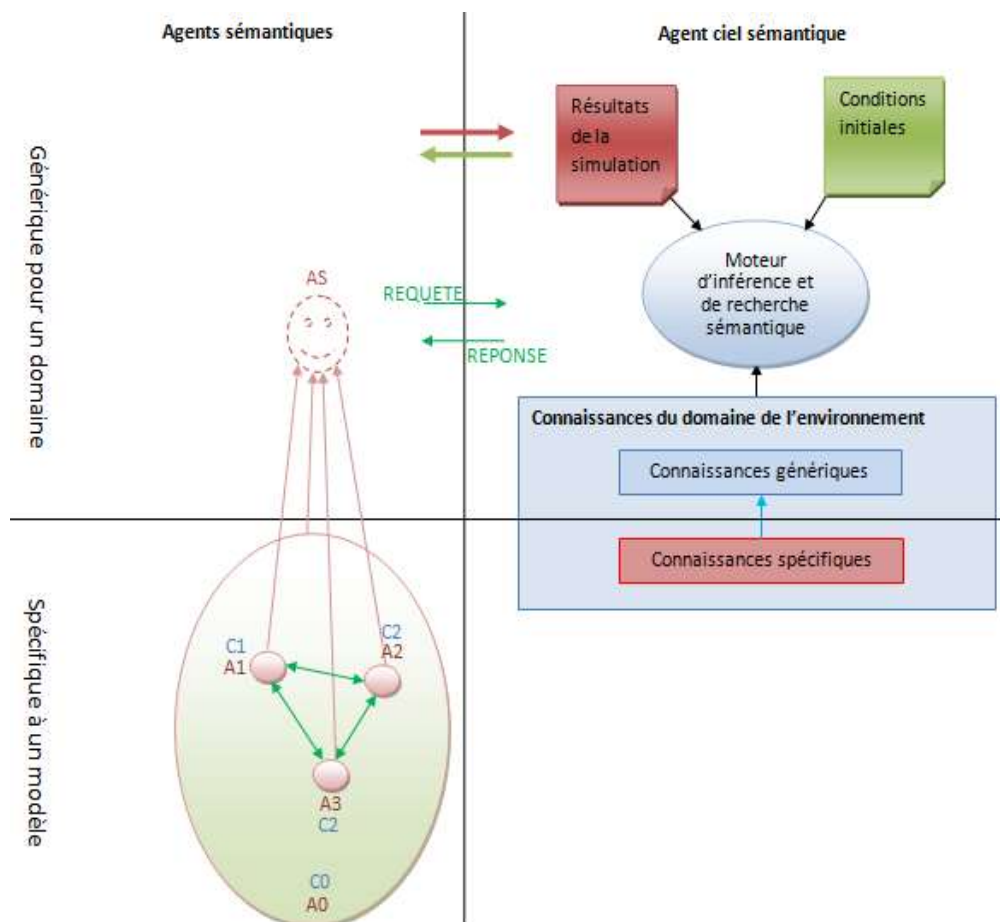


Figure 40 : la décomposition des éléments de l'architecture du système multi-agent sémantique dans deux niveaux : générique pour un domaine donné et spécifique à un modèle de ce domaine.

9.2 Les éléments génériques du simulateur sémantique SimSem2C

Dans cette section, nous allons voir les connaissances génériques du CC, les formalismes de représentation des connaissances, le moteur d'inférence et de recherche sémantique utilisés. Notre attention sera portée sur les communications et les comportements génériques de l'agent ciel sémantique et de l'agent sémantique abstrait.

9.2.1 Les connaissances génériques du domaine de l'environnement des agents

Les connaissances génériques du CC sont représentées dans une pyramide, nommée la pyramide des connaissances génériques du CC, dont la base est initialement le patron de conception d'ontologies du changement climatique qui est l'ontologie noyau OntoCLUVA, construite dans le chapitre 6.

Le deuxième niveau de la pyramide contient les faits génériques, c'est-à-dire les instances des concepts et des relations de la base de la pyramide. Pour avoir une idée de la base de faits, nous prenons pour exemple les connaissances dans le Tableau 1 extrait du 4^e rapport d'évaluation du GIEC en 2007 décrivant pour chaque gaz à effet de serre sa formule, son PRG relatif³⁰, son équivalent carbone par kg émis³¹. Ces connaissances sont des faits génériques du domaine changement climatique. Elles peuvent être représentées dans la base de faits génériques.

Tableau 1: Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Gaz à effet de serre	Formule	PRG relatif / CO2 (à 100 ans)	équivalent carbone par kg émis
Gaz carbonique	CO2	1	0,273
Méthane	CH4	25	6,82
Protoxyde d'azote	N2O	298	81,3
Hexafluorure de soufre	SF6	22800	6.220

Le sommet de la pyramide est composé des règles génériques sur les concepts et les relations de l'ontologie noyau OntoCLUVA car l'ontologie contenant que les concepts et

³⁰Chacun des gaz à effet de serre admet un "pouvoir de réchauffement global" (en abrégé PRG, et en abrégé en anglais GWP, pour Global Warming Potential), qui permet de savoir de combien on augmente l'effet de serre lorsque l'on émet un kg du gaz considéré. Ce PRG ne se mesure pas dans l'absolu, mais relativement au CO2. Le PRG d'un gaz est donc "combien de fois plus" (ou combien de fois moins) un gaz "fait d'effet de serre sur 100 ans" comparé à ce que ferait une même quantité de CO2 émise au même moment. On parle donc de "PRG relatif".

³¹ Par définition, un kg de CO2 vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est à dire le poids du carbone seul dans le composé "gaz carbonique". Pour les autres gaz, l'équivalent carbone vaut : équivalent carbone = PRG relatif x 0,2727.

relations du domaine et une base de faits ne suffisent pas pour décrire toutes les connaissances du domaine. Il y a des connaissances qui ne peuvent être décrites que par des règles. Par exemple, la connaissance suivante : "le risque est composé d'aléas et d'enjeux qui ont des vulnérabilités" est représentée par des concepts et des relations dans l'ontologie OntoCLUVA, voir la Figure 41 suivante.

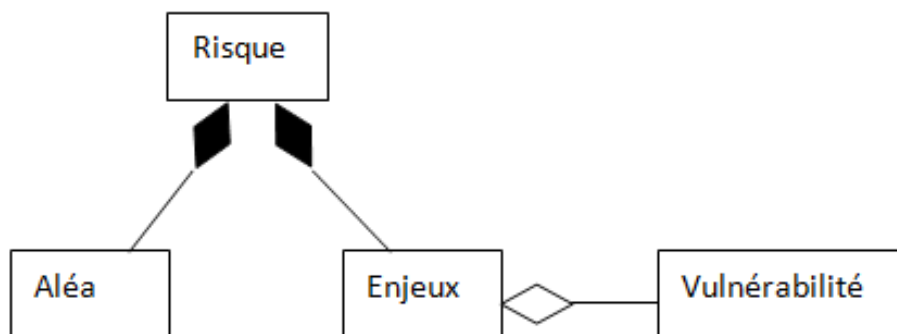


Figure 41 : Extrait de l'ontologie conceptuelle OntoCLUVA

Mais la connaissance : "si deux instances x et y de types respectifs « Aléa » et « Enjeux » sont en relation de composition avec une même instance z, alors cette instance z est de type «Risque » " ne peut être décrite que par une règle sur les concepts: « Aléa », « Enjeux » et «Risque » et relations : « rdf : type » et « ontocluva : composition », voir Tableau 2.

Tableau 2: Une règle, représentée en RIF-BLD, extrait de la base de règles complétant les connaissances génériques du CC décrites dans l'ontologie OntoCLUVA.

```

Prefix ontocluva:<http://www.cluva.eu/ontocluva#>
ForAll ?z ?x ?y
?z[ rdf:type -> ontocluva:Risque] :- And(
    ?x[rdf:type -> ontocluva:Aléa]
    ?y[rdf:type -> ontocluva:Enjeux]
    ?z[ ontocluva : composition->?x]
    ?z[ ontocluva : composition->?y])

```

Pour voir l'intérêt de cette base de règles, lors de la phase de conceptualisation de l'ontologie OntoCLUVA, nous avons rencontré un problème lié aux définitions multiples du concept de Risque. Les experts ne sont pas tombés d'accord sur une seule définition mais ils sont divisés sur deux définitions :

- (1) le Risque est composé d'Aléas et d'Enjeux qui (les enjeux) ont des Vulnérabilités.
- (2) le Risque est composé d'Aléas et de Vulnérabilités.

Après une longue discussion avec les experts sur ces deux définitions du Risque, nous avons proposé pour satisfaire ces deux visions de considérer dans l'ontologie conceptuelle la définition (1) qui est la plus générale car contenant les concepts dans les deux définitions (voir les Figure 41). Ensuite par une règle, nous avons ajouté une composition entre Risque et Vulnérabilité, voir la Figure 42 et le Tableau 3 suivants.

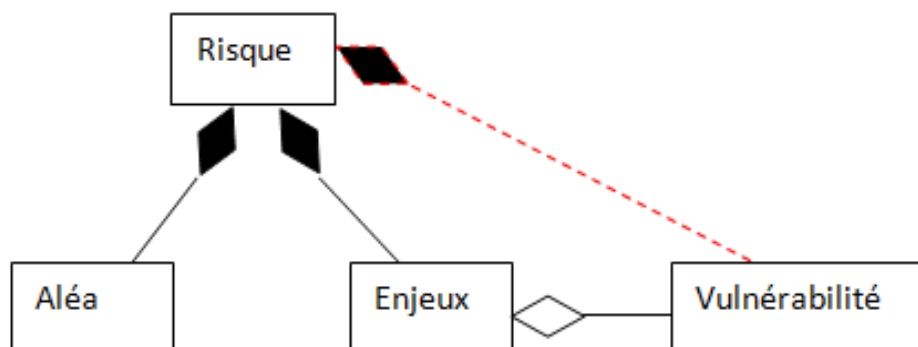


Figure 42 : illustration de l'ajout de la relation de composition entre Risque et vulnérabilité par la règle du Tableau 3.

Tableau 3 : Une règle, représentée en RIF-BLD, ajoutant la relation de composition entre Risque et vulnérabilité pour satisfaire la vision de la deuxième définition de la notion de Risque.

```
Prefix ontocluva:<http://www.cluva.eu/ontocluya#>
ForAll ?x ?t ?y ?z
?x[ ontocluva:composition->?t] :- And(
    ?x[rdftype -> ontocluva:Risque]
    ?y[rdftype -> ontocluva:Aléa]
    ?z[rdftype -> ontocluva:Enjeux]
    ?t[rdftype -> ontocluva:Vulnérabilité]
    ?x[ ontocluva : composition->?y]
    ?x[ ontocluva : composition->?z]
    ?z[ ontocluva : agrégation->?t])
```

Cette base de connaissances constituées de l'ontologie OntoCLUVA, de la base de faits génériques et de la base de règles génériques est représentée par une pyramide des connaissances génériques du domaine changement climatique, voir la Figure 43.

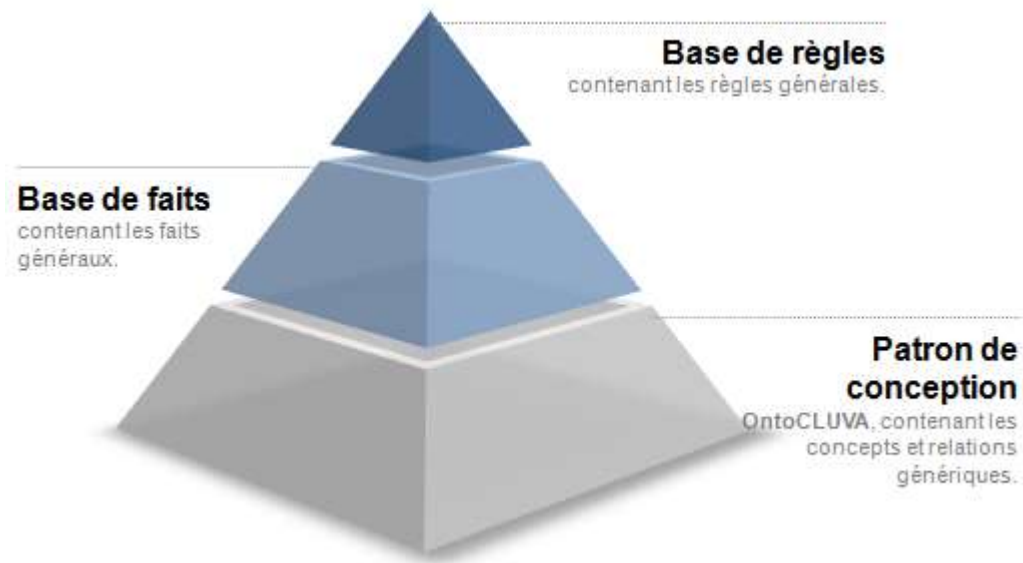


Figure 43 : Pyramide des connaissances génériques du domaine changement climatique.

Les connaissances représentées dans cette pyramide sont les connaissances génériques du domaine de l'environnement des agents des systèmes complexes à étudier dans le domaine du changement climatique. Elles sont faites pour être réutilisées et complétées par les modèles à étudier, par exemple dans la section suivante nous présentons la simulation du modèle du principe du pollueur payeur et là on verra comment les connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur complètent les connaissances génériques du changement climatique dans cette pyramide.

Pour l'exploitation des connaissances dans ce simulateur sémantique SimSem2C, il faut des formalismes de représentation des connaissances et un moteur d'inférence et de recherche sémantique, c'est l'objet de la suite de cette section.

9.2.2 Formalismes de représentation des connaissances et Moteur d'inférence et de recherche sémantique

Les formalismes de représentation des connaissances ne sont pas fixés par notre architecture d'un SMA sémantique. Pour appliquer cette architecture, il faut les choisir. Dans le cas du simulateur sémantique de modèles du CC, nous avons choisi les formalismes du web sémantique, que sont :

- OWL ou RDFS pour les ontologies,
- RDF pour les faits,
- RDF ou RIF pour les règles,

- et SPARQL pour les requêtes sur les connaissances.

Ce choix des formalismes du web sémantique est motivé par le besoin de partager les résultats des simulations sur le web et de permettre ainsi à d'autres experts de visualiser ces résultats sur le web.

Dans ce simulateur sémantique SimSem2C, le moteur d'inférence et de recherche sémantique que nous avons choisi d'utiliser dans l'agent ciel sémantique est CORESE qui est adapté aux formalismes de représentation de connaissances du web sémantique choisies.

9.2.3 Les communications et les comportements génériques de l'agent ciel sémantique et de l'agent sémantique abstrait

Les communications et les comportements génériques de l'agent ciel sémantique et de l'agent sémantique abstrait (voir chapitre précédent, sections 8.2 et 8.3) sont implémentés à un niveau générique dans SimSem2C de sorte que chaque modèle spécifique du changement climatique peut les utiliser pour son implémentation.

Ces éléments génériques pour le domaine du CC constitués d'agents, de comportements, de communications, des connaissances génériques du changement climatique sous les formalismes du web sémantique et du moteur d'inférence sont à prendre en compte dans l'implémentation de SimSem2C. Dans la section suivante, nous présentons les éléments spécifiques à un modèle et comme exemple nous utilisons le modèle du principe du pollueur payeur.

9.3 Les éléments spécifiques à un modèle dans SimSem2C ; cas du modèle du principe du pollueur payeur

Dans la suite de cette partie, nous présentons l'utilisation du simulateur sémantique du changement climatique (SimSem2C) pour simuler le modèle du principe du pollueur payeur dans le but de mieux comprendre les relations entre les connaissances génériques au changement climatique et les connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur, les agents sémantiques, leurs comportements et leurs communications spécifiques. Nous commençons cette section par la description du modèle utilisé pour exemple.

9.3.1 Description du modèle du principe du pollueur payeur

Pour montrer la place de la connaissance dans le modèle du principe du pollueur payeur (présenté dans la section 2.4), nous proposons dans cette partie de prendre comme exemple le système multi-agent sémantique représenté par les Figure 44 et Figure 45 qui suivent, illustrant deux scénarios sur l'évolution de ce système d'un système multi-agent sémantique du pollueur payeur. Ce système multi-agent sémantique contient six (6) Agents (P1 : Pollueur, P2 : Pollueur, S1 : Société, S2 : Société, S3 : Société et L1 : Laitier) associés aux concepts Pollueur, Société, Laitier du domaine de l'environnement Pollueur Payeur, voir la Figure 46.

Les agents de ce système accèdent aux connaissances du domaine de l'environnement pollueur payeur, pour leurs communications et leurs comportements, à travers l'agent ciel sémantique (ACS) représentant la couche sémantique de l'environnement.

Pour comprendre la place de la connaissance dans ce système multi-agent sémantique du pollueur payeur, voici deux scénarios montrant respectivement la connaissance dans la communication et le comportement de l'agent S1.

Scénario 1 : S1 demande des connaissances pour ses communications

Dans la Figure 44, l'agent S1 associé au concept Société envoie à l'agent ACS la demande : quelles sont les sociétés ? Ce dernier lui répond par : S1, S2, S3, L1.

Dans la réponse - Quelles sont les sociétés ? - apparaît L1 : Laitier. Parce que dans les connaissances du domaine de l'environnement, voir la Figure 46, nous avons Laitier décrit comme une sous classe de Société. Et donc par déduction tous les agents associés au concept Laitier sont aussi associés au concept Société.

En se basant sur ces connaissances renvoyées par l'agent ACS, S1 envoie des appels d'offre qui sont des communications aux sociétés : S2, S3 et L1, voir la Figure 44.

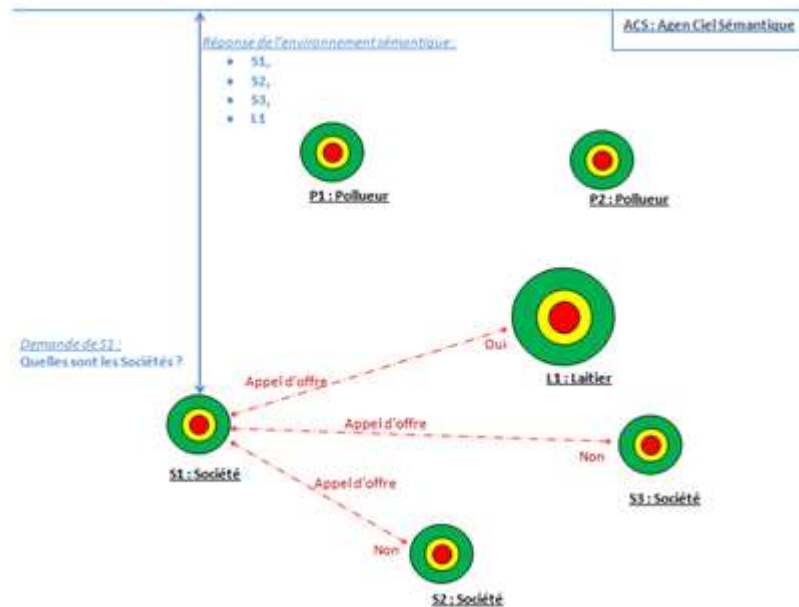


Figure 44 : Système Multi-agent (SMA) sémantique pollueur payeur composé d'un environnement sémantique (ACS : Agent Ciel Sémantique) et de six (6) agents : P1, P2: Pollueur ; S1, S2, S3:Société; L1: Laitier ; Scénario demande de connaissances et communication en se basant sur les connaissances reçues.

Voici d'autres questions que pourrait demander l'agent S1 ou l'un des autres agents (S2, S3, L1, P1 et P2) à l'agent ciel sémantique, avant d'entamer une communication :

- Quels sont les agents pollueurs ?
- Quels sont les agents pollueurs qui émettent du CO2 ?
- Quels sont les agents laitiers qui émettent un Gaz à effet de serre différent du CO2 ?
- Quels sont les agents sociétés qui ont acheté du crédit d'émission ?
- Quels sont les agents sociétés qui ont une amende ?
- Etc.

Scénario 2 : S1 demande des connaissances pour ses comportements

Après les communications de l'agent S1, les sociétés S2 et S3 répondent négativement à l'appel d'offre, voir Figure 44. Tandis que L1 répond positivement à l'appel de S1 en lui donnant son prix de vente d'une tonne de CO2, voir Figure 45. Puis S1 avant de confirmer demande encore à l'agent ACS le PRG-R du méthane (NH4), puisque son besoin est de 200 tonnes de méthane. La réponse de l'agent ACS est : le PRG-R du méthane (NH4) = 25. Cette réponse permet à S1 d'évaluer le prix qui est égal à $25 \times 560 \times 200 = 2.800.000$ F. Ainsi, les connaissances ont permis à S1 d'évaluer le prix et de savoir si c'est abordable ou pas, pour ainsi décider d'acheter ou pas.

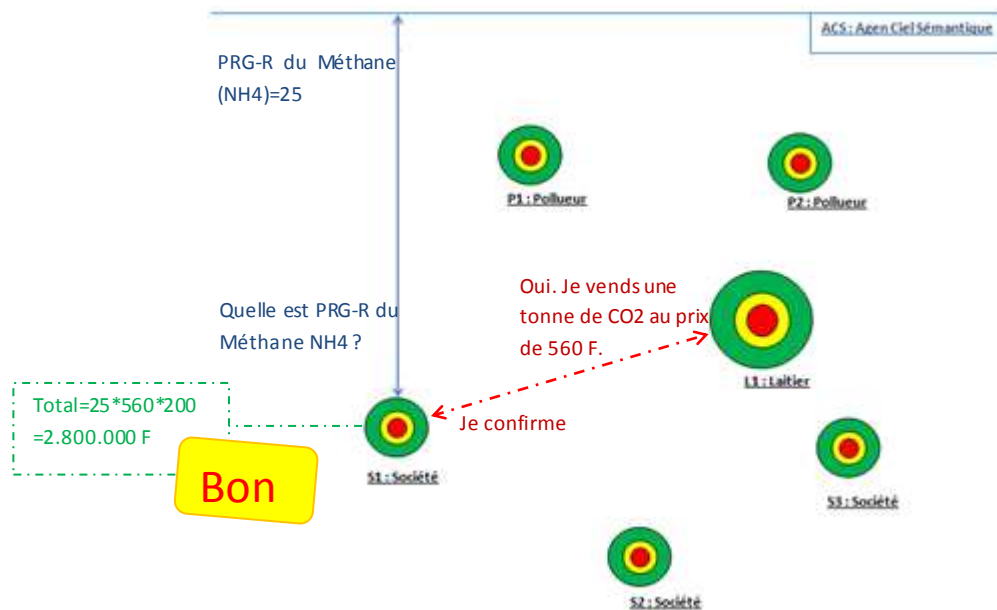


Figure 45: Système Multi-agent (SMA) sémantique pollueur payeur composé d'un environnement sémantique (ACS : Agent Ciel Sémantique) et de six (6) agents : P1, P2: Pollueur; S1, S2, S3:Société; L1: Laitier ; Scénario demande de connaissances et comportement en se basant sur les connaissances reçues.

En plus d'offrir aux agents les connaissances de leur environnement, l'architecture sémantique que nous proposons, permet aussi la visualisation sémantique du résultat de la simulation à partir de ces connaissances et d'une requête de visualisation. Cette visualisation du résultat se fait par l'intermédiaire du comportement **visualiser une demande sur les résultats de la simulation** de l'agent ciel sémantique (ACS). Voici quelques exemples de demandes de visualisation :

- Visualiser les agents pollueurs;
- Visualiser les agents pollueurs qui émettent du CO2 ;
- Visualiser les laitiers qui émettent un Gaz à effet de serre ;
- Visualiser les sociétés qui achètent du crédit d'émission ;
- Visualiser les sociétés qui ont une amende.

Pour simuler ce modèle du principe du pollueur payeur avec SimSem2C, dans la suite de cette section, nous allons présenter les connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur, les agents sémantiques dans ce principe, en parlant aussi de leurs communications et de leurs comportements spécifiques.

9.3.2 Les connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur

Dans le tableau suivant, nous montrons un extrait des connaissances spécifiques au principe du pollueur payeur.

<pre> <Class rdfID="Société"> <rdfs:subClassOf rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur"/> <label xml:lang="en">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="fr">...</comment> </Class> </pre>
<pre> <Class rdfID="Laitier"> <rdfs:subClassOf rdfresource="#Société"/> <label xml:lang="en">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="fr">...</comment> </Class> </pre>
<pre> <rdf:Property rdfID="debitEmission"> <domain rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur" /> <label xml:lang="en">...</label> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <comment xml:lang="fr">...</comment> </rdf:Property> </pre>
<pre> <rdf:Property rdfID="amande"> <domain rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur" /> <label xml:lang="en">...</label> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <comment xml:lang="fr">...</comment> </rdf:Property> </pre>
<pre> <rdf:Property rdfID="PRG-R"> <domain rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur" /> <label xml:lang="en">...</label> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <comment xml:lang="fr">...</comment> </rdf:Property> </pre>
<pre> <rdf:Property rdfID="vendreCredit"> <domain rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur" /> <range rdfresource="http://www.cluva.eu/ontoclupa#Pollueur" /> <label xml:lang="en">...</label> <comment xml:lang="en">...</comment> <label xml:lang="fr">...</label> <comment xml:lang="fr">...</comment> </rdf:Property> </pre>
<pre> <rdf:Property rdfID="acheterCredit"> </pre>

```

<owl:inverseOf rdf:resource="#vendreCredit"/>
<label xml:lang="en">.</label>
<comment xml:lang="en">...</comment>
<label xml:lang="fr"></label>
<comment xml:lang="fr">...</comment>
</rdf:Property>

```

Dans la Figure 46, nous illustrons que ces connaissances spécifiques entretiennent des relations avec les connaissances génériques du domaine du changement climatique. Car ces connaissances spécifiques au phénomène à étudier (pollueur payeur) viennent renforcer les connaissances génériques en ajoutant des concepts, des relations sémantiques, des relations de généralisations et des attributs aux concepts génériques.

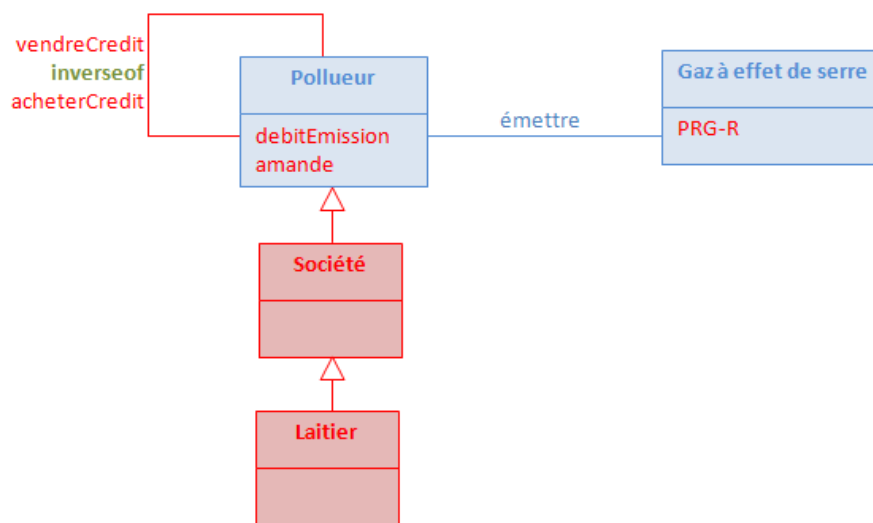


Figure 46 : Un Extrait de connaissances génériques et spécifiques pour voir les relations entre les concepts des deux ontologies : OntoCLUVA.owl et Pollueur-Payeur.owl, pour voir aussi comment les connaissances spécifiques à un modèle viennent compléter les connaissances génériques du domaine du changement climatique.

Pour les comportements **initialiser les agents sémantiques, envoyer les connaissances aux agents demandeurs** et **visualiser une demande sur les résultats de la simulation**, l'agent ciel sémantique charge les conditions initiales qui sont des faits en RDF. Pour avoir une idée de cette base de faits contenant les conditions initiales de la simulation, la Figure 47 est un extrait de conditions initiales de deux agents S1 et L1 du système multi-agent sémantique représenté par les figures Figure 44 et Figure 45.

```

<Société rdf:ID="S1">
  <nom>S1</nom>
  <quota>2500</quota>
  <consomation rdf:resource="http://www.cluva.eu/ontocluva-instances#NH4"/>
  <debitConsomation>500</debitConsomation>
  <periode rdf:resource="#t0"/>
</Société>

<Laitier rdf:ID="L1">
  <nom>A2</nom>
  <quota>90000</quota>
  <consomation rdf:resource="http://www.cluva.eu/ontocluva-instances#CO2"/>
  <debitConsomation>100</debitConsomation>
  <periode rdf:resource="#t0"/>
</Laitier>

```

Figure 47: Extrait base de faits conditions initiales : agents S1 et L1 à l'instant t0.

Après leur initialisation, les agents sémantiques évoluent dans le temps en utilisant les connaissances du domaine de l'environnement dans leurs comportements et leurs communications. Dans leur évolution, les agents sémantiques rendent compte de leurs activités pour chaque instant de la simulation à l'agent ciel sémantique qui traduit les contenus de ces messages d'enregistrement en annotations RDF qu'il écrit dans une base d'annotations, nommée résultats de la simulation.

La Figure 48 qui suit est un extrait de cette base montrant les agents sémantiques S1 et L1 (aussi présents dans les conditions initiales, c.-à-d. à l'instant t0) à l'instant t6.

```

<Société rdf:ID="S1">
  <nom>S1</nom>
  <quota>2500</quota>
  <consomation rdf:resource="http://www.cluva.eu/ontocluva-instances#NH4"/>
  <debitConsomation>500</debitConsomation>
  <periode rdf:resource="#t6"/>
</Société>

<Laitier rdf:ID="L1">
  <nom>L1</nom>
  <quota>90000</quota>
  <consomation rdf:resource="http://www.cluva.eu/ontocluva-instances#CO2"/>
  <debitConsomation>100</debitConsomation>
  <vendreCredit rdf:resource="#S1"/>
  <quantiteVendu>8500</quantiteVendu>
  <periode rdf:resource="#t6"/>
</Laitier>

```

Figure 48 : Extrait base de faits résultats simulation : agents S1 et L1 à l'instant t6 ; A cette instant t6, L1 a vendu du crédit d'émission à S1 et la quantité de cette vente est de 8500 tonnes de CO2.

En plus d'offrir aux agents les connaissances de leur environnement, l'architecture sémantique proposée permet aussi la visualisation sémantique et sélective des résultats de la simulation à partir de ces connaissances et d'une requête de visualisation. Cette visualisation du résultat se fait par l'intermédiaire du comportement **visualiser une demande sur les résultats de la simulation** de l'agent ciel sémantique.

Lors de l'exécution du comportement « *visualiser une demande sur les résultats de la simulation* », l'agent ciel sémantique du pollueur Payeur charge les connaissances génériques, les connaissances spécifiques, les conditions initiales et les résultats de la simulation dans le moteur d'inférence et de recherche sémantique CORESE, voir la Figure 49. L'agent ciel sémantique envoie ensuite à ce moteur une demande de visualisation, pour voir seulement la partie du résultat qui l'intéresse, voici quelques exemples de demandes de visualisation : Visualiser les agents pollueurs; Visualiser les agents pollueurs qui émettent du CO2 ; Visualiser les laitiers qui émettent un Gaz à effet de serre ; Visualiser les sociétés qui achètent du crédit d'émission ; Visualiser les sociétés qui ont une amende.

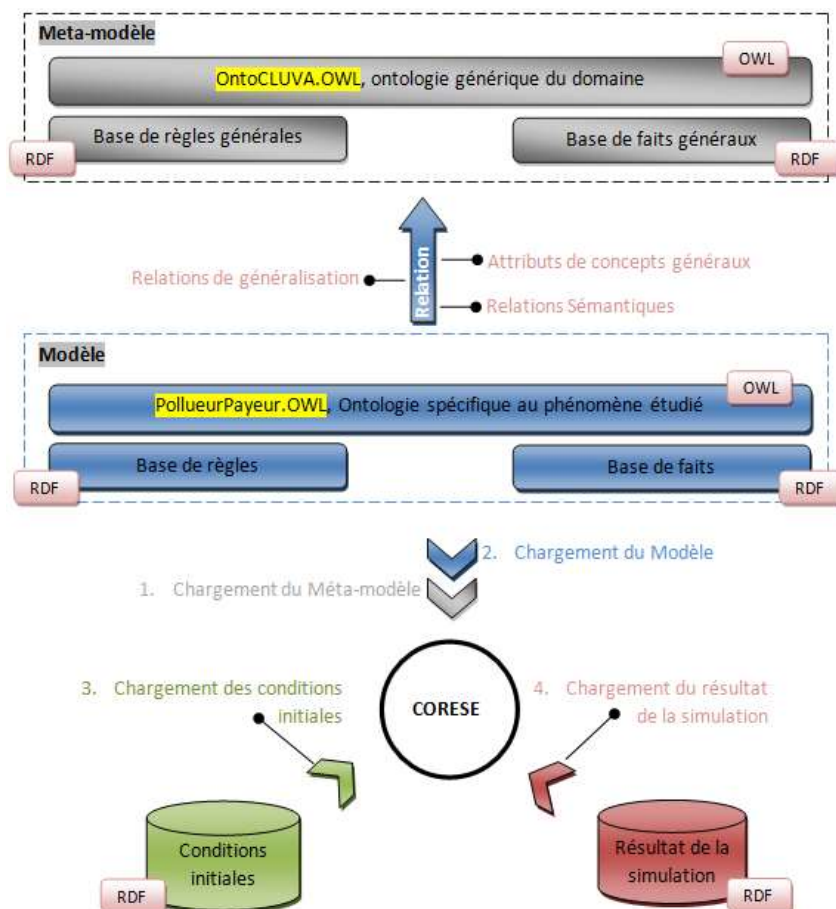


Figure 49: Le contenu de l'agent ciel sémantique du phénomène pollueur payeur lors de l'exécution de son comportement « visualiser une demande sur les résultats de la simulation »

Après les connaissances spécifiques, nous présentons dans la suite les agents sémantiques du principe du pollueur payeur à implémenter avec SimSem2C.

9.3.3 Les agents sémantiques pour pollueur payeur

Les agents du modèle du principe du pollueur payeur sont des spécialisations de la classe abstraite Agent sémantique implémentée dans le niveau générique dans SimSem2C qui a des comportements et des communications dans ce niveau (voir la section 9.2.3). Dans la Figure 50, nous avons choisi comme exemple d'agents du principe du pollueur payeur Pollueur, Société et Laitier qui sont des agents sémantiques car dans leur implémentation ils spécialisent la classe abstraite Agent sémantique.

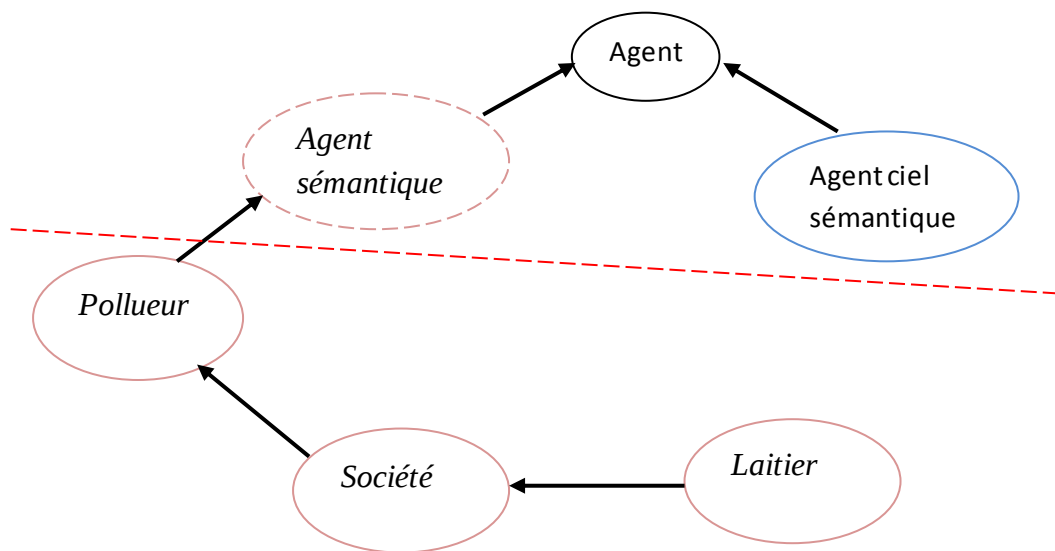


Figure 50 : Les agents sémantiques du principe du pollueur payeur dans la hiérarchie des agents implémentés dans SimSem2C

Les comportements spécifiques des agents sémantiques du principe du pollueur payeur

Dans le simulateur sémantique SimSem2C, il faut pour chaque modèle identifier les comportements spécifiques des agents sémantiques. Dans le cadre du modèle pollueur payeur, les agents sémantiques Pollueur, Société et Laitier ont par exemple les comportements :

- Consommer crédit d'émission
- Lancer appel d'offres
- Répondre appel d'offres
- Vendre crédit d'émission
- Acheter crédit d'émission

- Appliquer une nouvelle politique d'émission
- Etc.

Les communications naturelles des agents sémantiques du principe du pollueur payeur

Dans la définition d'un agent sémantique, on déclare un attribut constant contenant le concept de l'ontologie qui lui est associé. Cet attribut permet de savoir qu'un tel agent est associé à un tel concept du domaine.

Cela aide dans la communication entre les agents sémantiques. Ainsi un agent sémantique peut envoyer un message groupé à des agents sémantiques associés à un concept donné pour collaborer avec eux. Pour cela, il commence par envoyer une demande de connaissances à l'agent ciel sémantique pour savoir quels sont les agents qui sont associés à ce concept. Le diagramme de séquences de la Figure 51 illustre des exemples de communications naturelles entre des agents sémantiques.

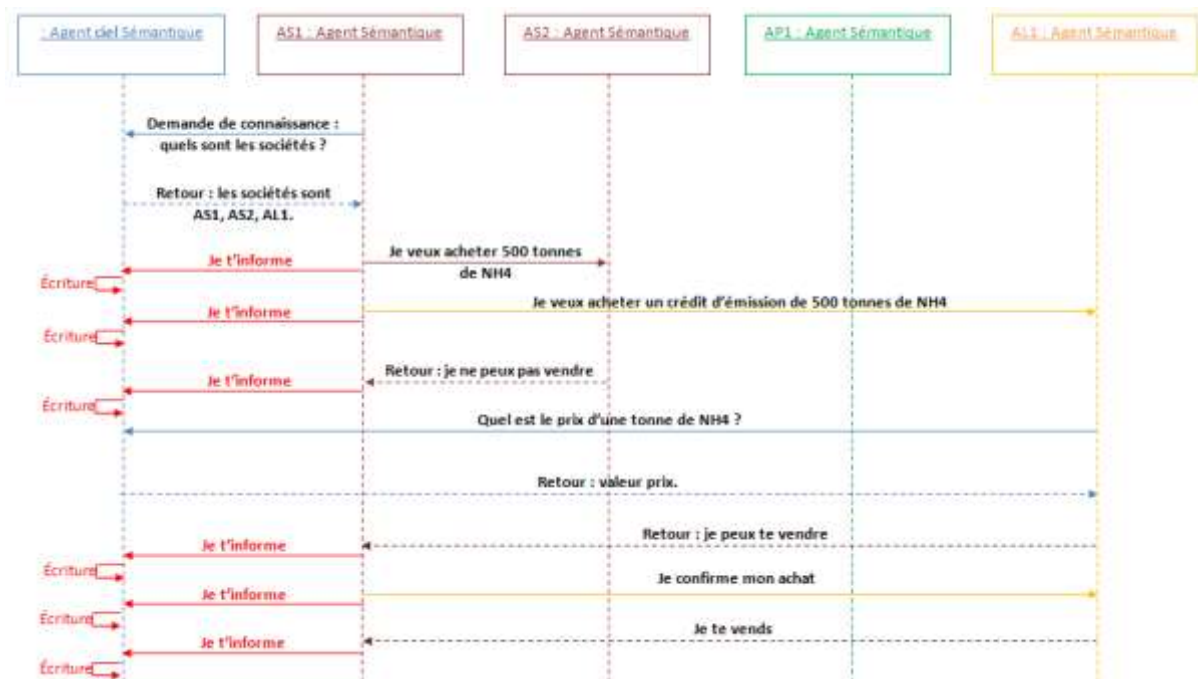


Figure 51 : les communications naturelles entre les agents sémantiques.

L'agent AS1 envoie ensuite un message (Je veux acheter 500 tonnes de NH4) aux agents associés au concept Société, c'est-à-dire aux agents AS2 et AL1. AS2 répond par un message (Je ne vends pas). AL1 après avoir envoyé une demande à un agent ciel sémantique (quel est le prix d'une tonne de NH4 ?) pour connaître le prix répond à AS1 par un message (Je peux te vendre). AS1 confirme par message qu'il achète et AL1 lui vend.

9.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif était de voir comment il faut appliquer l'architecture du SMA sémantique que nous avons proposée pour un domaine comme celui du changement climatique et pour le modèle comme celui du principe du pollueur payeur. Pour cela, nous avons décomposé l'architecture du SMA sémantique en deux niveaux, un niveau générique pour un domaine et un niveau spécifique à un modèle dans un domaine.

Dans ce chapitre, nous avons aussi abordé les formalismes de représentation des connaissances (connaissances génériques, connaissances spécifiques, conditions initiales et résultats de la simulation) qui sont les formalismes du web sémantique basées sur XML, qui est un standard pour l'échange de données sur le web. Cela nous a donné deux importantes possibilités : (1) L'échange de résultats de simulation entre des experts sur le web et (2) la visualisation web des résultats des simulations.

Avec ces deux possibilités, nous pouvons aller vers une plateforme web sémantique de partage et de visualisation des modèles de systèmes multi-agents sémantiques du changement climatique qui permettra aux experts de déposer des résultats de simulation sémantique et de visualiser les résultats des simulations d'autres experts.

Dans le chapitre 10 qui suit, nous présentons le prototype pour la simulation du modèle du principe du pollueur payeur avec SimSem2C, qui est implémenté avec JADE³². Dans cette simulation, la visualisation est une visualisation 2D fondée sur la technologie Java 2D.

Dans l'avenir, nous verrons la simulation d'autres modèles pour l'adaptation, la résilience et la diminution de la vulnérabilité des populations avec SimSem2C.

Dans SimSem2C, OntoCLUVA peut être enrichie par les connaissances spécifiques, par la partie en rouge dans le modèle conceptuel de la Figure 46, pour aller vers une ontologie du CC spécifique pour ce cadre d'utilisation. Mais nous n'avons pas proposé, dans cette thèse, une approche pour la maintenance d'OntoCLUVA dans le cadre de SimSem2C. Cela est donc une autre perspective de cette thèse.

³² **JADE** (Java Agent DEvelopment) est un framework de développement de systèmes multi-agents, open-source et basé sur le langage Java. Il offre en particulier un support avancé de la norme FIPA-ACL, ainsi que des outils de validation syntaxique des messages entre agents basé sur les ontologies. [Wikipédia, (date de consultation 18/01/2014)]

Chapitre 10

Les prototypes Catalog2C et SimSem2C dans le cadre du projet CLUVA

Dans ce chapitre nous présentons d'abord le projet CLUVA et ses objectifs qui ont motivé le besoin de disposer du SGC du CC. Ensuite il présente l'utilisation du catalogage des ressources de partenaires, Catalog2C et pour finir ce chapitre présente l'utilisation du simulateur sémantique SimSem2C.

10.1 Le projet CLUVA

Le projet CLUVA réunit des experts sur le climat, des experts en gestion des risques, des urbanistes et des spécialistes des sciences sociales dans un effort de recherche intégré. Ainsi, le projet CLUVA implique un partenariat de treize (13) institutions de recherche à travers l'Europe et l'Afrique. Le tableau qui suit est la liste de ces institutions.

Partenaire	Sigle	Logo	Pays
Université d'Addis Abeba	AAU ³³		Ethiopie
AMRA Scarl (<i>coordinateur</i>)	AMRA ³⁴		Italie
Université d'Ardhi	ARU ³⁵		Tanzanie
Centre euro-méditerranéen sur les changements climatiques	CMCC ³⁶		Italie
Conseil pour la recherche scientifique et industrielle	CSIR ³⁷		Afrique du sud
Centre Helmholtz pour la recherche environnementale	UFZ ³⁸		Allemagne
Université de Copenhague	KU ³⁹		Danemark
Institut norvégien pour la recherche urbaine et régionale	NIBR ⁴⁰		Norvège
Université technique de Munich	TUM ⁴¹		Allemagne
Université de Ouagadougou	UO ⁴²		Burkina Faso
Université de Yaoundé I	UYI ⁴³		Cameroun
Université Gaston Berger de Saint-Louis	UGB ⁴⁴		Sénégal
Université de Manchester	UM ⁴⁵		Royaume-Uni

Avec ce partenariat CLUVA a choisi pour cadre d'étude cinq (5) villes africaines très vulnérables aux risques liés aux changements climatiques :

Saint-Louis. Les activités prévues comprennent des scénarios d'inondations, des crues soudaines, l'élévation du niveau de la mer et d'autres activités, y compris la mise en œuvre éventuelle de modèles multi-risques.

Ouagadougou. Les activités prévues comprennent des scénarios d'inondations, vagues de chaleur et de la désertification, de la vulnérabilité physique des bâtiments et des filières de mauvaise qualité, l'application des dangers multiples et éventuellement de modèles multi-

³³<http://www.aau.edu.et/>

³⁴<http://www.amracenter.com/>

³⁵<http://www.aru.ac.tz/>

³⁶<http://www.cmcc.it/>

³⁷<http://www.csir.co.za/>

³⁸<http://www.ufz.de/>

³⁹<http://www.ku.dk/>

⁴⁰<http://www.nibr.no/>

⁴¹<http://portal.mytum.de/welcome/>

⁴²<http://www.univ-ouaga.bf/>

⁴³<http://www.uy1.uninet.cm/>

⁴⁴<http://www.ugb.sn/>

⁴⁵<http://www.manchester.ac.uk/>

risques, la vulnérabilité sociale et économique, l'amélioration de la gouvernance et la capacité planification urbaine.

Douala. Les activités prévues comprennent des scénarios de l'élévation du niveau de la mer et les inondations et la vulnérabilité relative au système de transport.

Dar es Salaam. L'activité sera principalement consacrée aux risques hydro-géologiques (glissements de terrain de la ville et les inondations), au niveau de la mer montante, scénario de risque de cyclones, à l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes de drainage de l'eau, à la vulnérabilité et aux coûts de renforcement des établissements informels, aux stratégies d'utilisation des terres et la planification urbaine faible mais aussi à la gouvernance.

Addis-Abeba. Les activités prévues comprennent les scénarios de risque de sécheresse, la désertification et les inondations, la vulnérabilité des bidonvilles et ligne de vie, et d'autres activités.

La Figure 52 suivante montre une localisation de ces villes en Afrique.

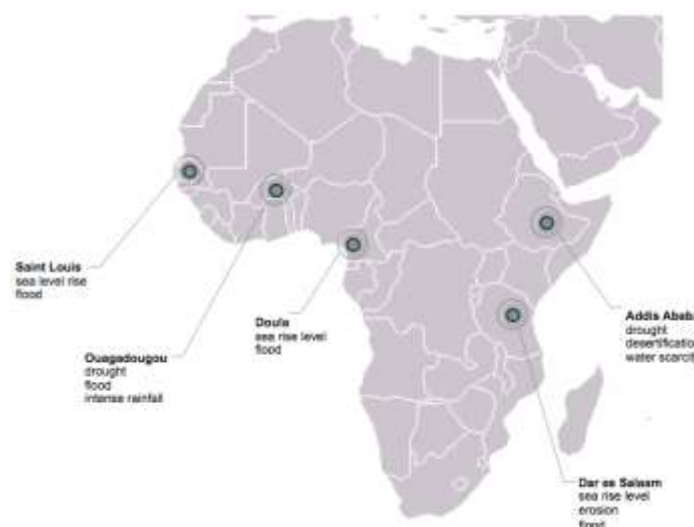


Figure 52: La carte des cinq villes sélectionnées pour servir de cas d'étude

Dans ce cadre d'étude constitué des cinq villes et leurs partenaires, le projet CLUVA a pour objectif global de développer des méthodes et des connaissances pour la gestion des risques, la réduction de la vulnérabilité et l'amélioration de la capacité d'adaptation et de la résilience des villes africaines face aux changements climatiques en collaboration avec des partenaires localisés dans ces villes.

Pour cela, le projet CLUVA veut :

- ❖ réaliser des études prospectives pour évaluer les risques et les vulnérabilités de grands centres urbains en Afrique. Il mettra l'accent sur l'évaluation des impacts environnementaux, sociaux et économiques des risques du changement climatique.
- ❖ élaborer et proposer des stratégies innovantes de gestion de risques climatiques liés à l'adaptation pour rendre les villes plus résilientes aux futures possibilités des changements climatiques induits par les Aléas et les risques avec de fortes composantes interdisciplinaires.

Spécifiquement, ce projet a pour objectifs d'aboutir à :

- **OS1** : nouveaux modèles à échelle réduite du changement climatique ;
- **OS2** : une approche qui regarde l'Aléa comme un effet de cascade du changement climatique ;
- **OS3** : une approche novatrice de l'évaluation de la vulnérabilité et la prévention des catastrophes ;
- **OS4** : une approche innovante de multi-modélisation du risque ;
- **OS5** : une approche associant urbanisme et gouvernance ;
- **OS6** : un transfert des connaissances et un renforcement des capacités ;
- **OS7** : une fusion de différentes approches.

Le projet CLUVA s'applique dans le domaine multidisciplinaire et complexe du changement climatique et de la vulnérabilité urbaine. Ce projet dispose de données et de modèles propriétaires, distribués et aux formats hétérogènes. Il dispose aussi d'experts du domaine du changement climatique et de la vulnérabilité urbaine.

Les objectifs spécifiques (OS1, OS2, OS3, OS4, OS5) de CLUVA montrent le besoin de simuler des modèles en utilisant les connaissances et les données. Le besoin de partager des connaissances, des données et des modèles peut se voir à travers l'objectif spécifique OS6. L'objectif spécifique OS7 montre quant à lui le besoin d'intégrer les connaissances, les données et les modèles de ses partenaires.

Ainsi, le partenaire Université Gaston Berger de Saint-Louis, avec son équipe Ingénierie des connaissances, a ressenti que ce projet a le besoin de représenter les connaissances du CC, de faire partager ces connaissances, les données et les modèles à ces

partenaires et aussi de faire intégrer les données, les modèles et les connaissances spécifiques (relatives à un sous domaine, une application, un phénomène, etc.) développer par les partenaires de ce projet pour aider les décideurs de ces villes africaines dans leurs processus de décision en les apportant les informations et les connaissances nécessaires.

Et pour répondre à ce besoin, le partenaire Université Gaston Berger de Saint-Louis développe une plateforme de gestion des connaissances du domaine de la vulnérabilité urbaine face aux changements climatiques dans la cadre du projet CLUVA. La réalisation de cette plateforme est au centre même de cette thèse que nous détaillons dans la partie qui suit.

10.2 Catalog2C pour CLUVA

Nous commençons cette partie par la page d'accueil de ce catalogue, présentée par la Figure 53, donnant la possibilité de :

- Créer un partenaire (1)
- Déclarer une ressource (donnée, modèle, expertise, web service, etc.) (2)
- Faire une recherche de ressources
 - Par navigation (3.1)
 - Par mot clé (3.2), qui est une recherche sémantique
- Maintenir l'ontologie OntoCLUVA dans Catalog2C en (4)

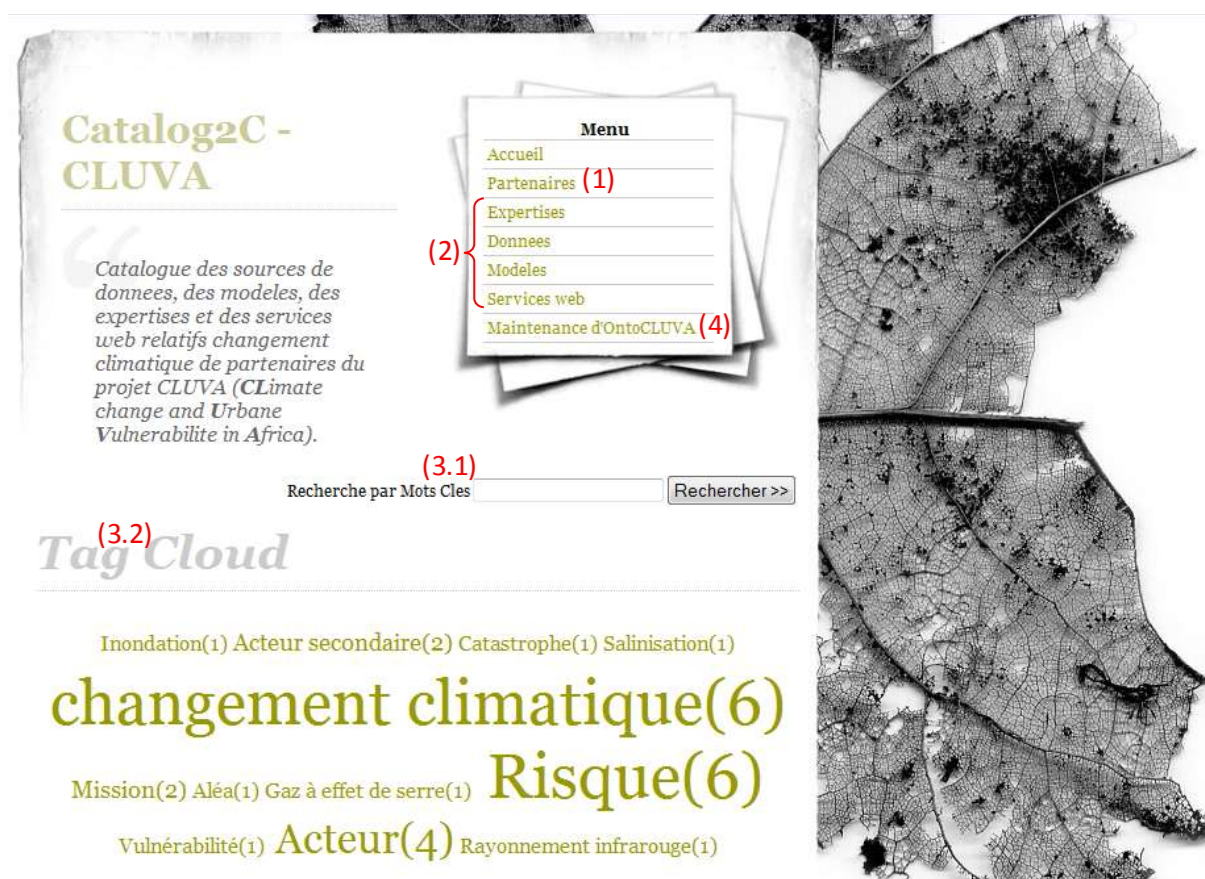


Figure 53 : Page d'accueil de Catalog2C - CLUVA

10.2.1 La description des ressources de partenaires

La description des partenaires et leurs ressources est le premier module de notre application. Elle ajoute des annotations dans la base d'annotation CatalogCLUVA.rdf en respectant le vocabulaire décrit dans l'ontologie VCatalog.owl (voir Annexe 2).

Les deux formulaires de la Figure 54 donnent une idée sur les formulaires de description des partenaires et des ressources.

La Figure 54 montre la description du modèle « *modeleAdaptation* » du partenaire LANI. De la même façon que ce modèle M0012, on pourrait ajouter d'autres descriptions de ressources (données, modèles, web services, ...) pour LANI ou d'autres partenaires.

Il faut remarquer que les mots clés associés à la description de l'expertise M0012 sont des termes du domaine. Il faut aussi savoir que nous ne forçons pas l'utilisateur à choisir des termes dans l'ontologie. Il ne connaît même pas l'existence de l'ontologie. Il donne naturellement des termes qui donnent une idée sur la ressource.

Decrire Partenaire

Les champs avec le signe () sont obligatoires.*

Identifiant (*): LANI

Nom (*): LANI

Adresse (*): UFR SAT, Université Gaston Berger de Saint-Louis

Pays: Sénégal

Lien web: www.lani.sn

Description: Laboratoire d'Analyse Numérique et d'Informatique (L.A.N.I.) de l'université Gaston Berger de Saint-Louis du Sénégal. LANI est composé de deux équipes: Maths et

Ajouter >>

Decrire Modele

Les champs avec le signe () sont obligatoires.*

Identifiant (*): M0012

Nom (*): modeleAdaptation

Mots clés (*): adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance

format (*): owl

Lien web:

Partenaire (*): LANI

Description: modélisation de l'adaptation des populations face aux risques d'inondation et du rôle des acteurs de la gouvernance face à l'adaptation

Ajouter >>

Figure 54 : les formulaires d'ajout de partenaires et des descriptions montrant la description du modèle « modeleAdaptation » du partenaire LANI.

Les contenus de ces formulaires sont écrits en RDF et sont enregistrés dans la base d'annotations CatalogCLUVA.rdf, voir la Figure 55 suivante.

```

.. catalogueCLUVA.rdf
0 10 20 30 40 50 60 70
<catalog:equipe>LEIDI</catalog:equipe>
<catalog:lien>www.cluvaSaint-Lous.sn</catalog:lien>
<catalog:declarer_par rdf:resource="#CLUVA_UGB"/>
<catalog:description>Description ici ...</catalog:description>
</catalog:Expertise>

<catalog:Expertise rdf:ID="Exp00014">
<catalog:nom>Exp00014</catalog:nom>
<catalog:mots_cles>gaz &#224; effet de serre, rayonnement infrarouge, ris
<catalog:equipe>LEIDI</catalog:equipe>
<catalog:lien>www.cluvaSaint-Lous.sn</catalog:lien>
<catalog:declarer_par rdf:resource="#CLUVA_UGB"/>
<catalog:description>Description ici ...</catalog:description>
</catalog:Expertise>

<catalog:Modele rdf:ID="M001212">
<catalog:nom>M001212</catalog:nom>
<catalog:mots_cles>risque, changement climatique, etc.</catalog:mots_cles>
<catalog:format>docx</catalog:format>
<catalog:lien>www.cluvaSaint-Lous.sn</catalog:lien>
<catalog:declarer_par rdf:resource="#Part002"/>
<catalog:description>Description ici ...</catalog:description>
</catalog:Modele>

<catalog:Modele rdf:ID="M0012">
<catalog:nom>modeleAdaptation</catalog:nom>
<catalog:mots_cles>adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvern
<catalog:format>owl</catalog:format>
<catalog:lien>
<catalog:declarer_par rdf:resource="#LANI"/>
<catalog:description>modelisation de l'adaptation des populations face aux ris
</catalog:Modele>

</rdf:RDF>

```

Figure 55 : Base de faits CatalogCLUVA.rdf ouverte dans l'éditeur PSPad.

Cette base de faits de la Figure 55 sert de données d'exemples aux deux fonctionnalités de recherche sémantique et de maintenance des connaissances.

10.2.2 Recherche sémantique

Dans l'architecture de ce catalogue, on constate la présence de l'ontologie OntoCLUVA du changement climatique et de la vulnérabilité urbaine. Cette ontologie permettra d'effectuer une recherche sémantique dans le catalogue.

Nous proposons deux fonctionnalités de recherche dont la première est une recherche par navigation (nuage de tags) et la seconde est une recherche par mots clés.

10.2.2.1 Recherche par navigation

Pour la recherche par navigation, l'idée est de chercher pour chaque label de concept en français (ou en anglais) de l'espace métrique OntoCLUVA, le nombre de fois (noté N) qu'il est utilisé comme mots clés dans la description des ressources (données, modèles, services web et expertises). Ensuite, on affiche un nuage de tags contenant les vingt (20) labels de concepts qui ont les plus grands N (avec $N > 0$). Dans ce nuage de tags les labels des concepts sont affichés avec une taille de police variable égale à $13 - 10 * ((13 - N) / 13)$. La Figure 56 qui suit est une illustration du nuage de tags dans CatalogCLUVA.



Figure 56 : Nuage de mots clés (Tag Cloud) à partir des connaissances du domaine du CC et des informations dans le catalog2C.

Dans la Figure 57, il apparaît que, les labels « changement climatique » avec sept (6) occurrences et « Risque » avec six (6) occurrences sont les plus fréquents dans les descriptions de ressources. Ces labels et fréquences dans la Figure 57 sont aussi des liens. Par exemple en cliquant sur « Risque (6) », on va vers une liste contenant les sept (6) ressources dont « Risque » apparaît dans leurs mots clés. Dans cette liste, pour chaque ressource, on a un

lien vers la description complète de la ressource, un autre lien vers le partenaire qui la décrit et la liste des mots clés (comme dans la Figure 57).

Risque

Expertise (s)

- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Exp00012>
Decrit par : http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#CLUVA_UGB
Mots Cles : Acteur secondaire, vulnérabilité, risque, catastrophe
- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#JC004>
Decrit par : <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles : ontologie, changement climatique, risque, gouvernance

Source (s) de donnees

- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#D0005>
Decrit par : <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles : Risque, changement climatique, mission, Acteur secondaire, Actor

Modele (s)

- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#M0012>
Decrit par : <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>
Mots Cles : adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance
- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#M001212>
Decrit par : <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part002>
Mots Cles : risque, changement climatique, etc.

Service (s) web

- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#service0012>
Decrit par : <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Part003>
Mots Cles : changement climatique, aléa, Risque

Figure 57 : Les résultats correspondant à la navigation en appuyant sur le mot clé "Risque (6)"

10.2.2.1 Recherche par mot clés

Pour la fonctionnalité recherche par mots clés, nous passons par l'ontologie du domaine pour chercher s'il y a un concept qui a pour label en français (ou en anglais) le mot clé entré en paramètre de recherche. Si c'est le cas, on affiche d'abord les ressources qui ont un mot clé égal au label de ce concept et ensuite, on affiche les ressources qui ont des mots clés égaux aux labels des sous classes (subClassOf) du concept.

Dans la Figure 58, on voit que pour le mot clé « risque » donné en entré du formulaire de recherche, on a six (6) ressources dont les mots clés contiennent « risque » comme confirmé par le nuage de tags de la Figure 56. Elle précise aussi qu'il y a deux (2) ressources dont les mots clés contiennent « inondation » et « salinisation » des labels de concepts sous classes du concept de label « risque ».

Dans ce résultat (Figure 58), nous proposons de naviguer sur les partenaires et les ressources (voir Figure 59 et Figure 60).

modèles et des services web
des partenaires du projet
CLUVA (CLimate change
and Urbane Vulnerabilite in
Africa).

Modèles
Services web
Statistiques CatalogCLUVA

Recherche par Mots Cles

- risque
- **Expertise:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Exp00012>
Decrit par: (http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#CLUVA_UGB)
Mots Cles: Acteur secondaire, vulnerabilite, risque, catastrophe
- **Expertise:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#ICoo4>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Partoo2>)
Mots Cles: ontologie, changement climatique, risque, gouvernance
- **Donnee:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Doo05>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Partoo2>)
Mots Cles: Risque, changement climatique, mission, Acteur secondaire, Actor
- **Modele:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Moo12>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>)
Mots Cles: adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance
- **Modele:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Moo1212>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Partoo2>)
Mots Cles: risque, changement climatique, etc.
- **Service web:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#service0012>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Partoo3>)
Mots Cles: changement climatique, alea, Risque
- **Sous classes**
 - **Modele:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Moo12>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>)
Mots Cles: adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance
 - **Donnees:** <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Doo03>
Decrit par: (<http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Partoo2>)
Mots Cles: gouvernance, acteur gouvernance, mission, salinisation

Figure 58 : Résultats de la recherche de ressources par mot clé sur "risque" ou un voisin de risque. Pour cela nous avons ici les ressources dont les mots clés contiennent risque mais aussi les ressources dont les mots clés contiennent inondation et salinisation.

LANI

URI: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>
Lien web: www.lani.sn
Description: Laboratoire d'Analyse Numérique et d'Informatique (L.A.N.I) de l'université Gaston Berger de Saint-Louis du Sénégal. LANI est composé de deux équipes: Maths et informatique

Expertise (s)

Source (s) de donnees

Modele (s)

- <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#Moo12>

Service (s) web

Figure 59 : Navigation en passant par le partenaire LANI

modeleAdaptation

Lien web:

Format: owl

Mots clés: adaptation, risque, inondation, population, acteur gouvernance

Description: modelisation de l'adaptation des populations face aux risques d'inondation et du role des acteurs de la gouvernance face a l'adaptation

Partenaire: <http://www.cluva.eu/2011/09/16/vcatalog.rdfs-instances#LANI>

Figure 60 : Navigation en passant par le modèle « modeleAdaptation » du partenaire LANI

10.2.3 Maintenance de l'ontologie du CC

	Concepts	Nombre	Pourcentage(%)
+L ✎ +R	Inondation	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Acteur secondaire	2	5.263157894736842%
+L ✎ +R	Catastrophe	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Salinisation	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	changement climatique	6	15.789473684210526%
+L ✎ +R	Mission	2	5.263157894736842%
+L ✎ +R	Aléa	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Gaz à effet de serre	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Risque	6	15.789473684210526%
+L ✎ +R	Vulnérabilité	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Acteur	4	10.526315789473683%
+L ✎ +R	Rayonnement infrarouge	1	2.631578947368421%
+L ✎ +R	Gaz réfrigérant	0	0.0%
+L ✎ +R	Méthane	0	0.0%
+L ✎ +R	Eruption volcanique	0	0.0%
+L ✎ +R	Polution	0	0.0%
+L ✎ +R	Erosion	0	0.0%
+L ✎ +R	Acteur international	0	0.0%
+L ✎ +R	Logiciel	0	0.0%
+L ✎ +R	Alerte	0	0.0%



Figure 61 –Tableau de statistiques d'utilisation des labels des concepts l'ontologie du CC correspondant aux mots clés dans la description des ressources dans Catalog2C

	Mots clés	Nombre	Concept(0/1)
+C	adaptation	1	0
	risque	6	1
	inondation	1	1
+C	population	1	0
+C	acteur gouvernance	2	0
	changement climatique	6	1
+C	etc.	1	0
+C	Mots clés ici ...	2	0
	gaz à effet de serre	1	1
	rayonnement infrarouge	1	1
	risk	1	1
+C	forçage externe	1	0
	Acteur secondaire	2	1
	vulnérabilité	1	1
	catastrophe	1	1
	mission	2	1
	Actor	1	1
	salinisation	1	1
	aléa	1	1
+C	ontologie	1	0

Figure 62 – Statistiques d'utilisation des mots clés dans Catalog2C et leur correspondance ou non à un label de concept de l'ontologie du CC ;

10.2.3.1 Scénario 1 : découverte et ajout d'un label à un concept

Dans la Figure 62, les statistiques montrent que "acteur gouvernance" est utilisé deux fois comme mot clé dans la description des ressources et est sans correspondance dans l'ontologie du CC, signalé par le 0 (zéro) dans la colonne "Concept (0/1)". Un expert peut découvrir ce mot "acteur gouvernance" comme étant un nouveau label du concept "Acteur" présent dans le tableau de la Figure 61 listant les premiers labels des concepts de l'ontologie du CC.

En appuyant sur le bouton ajouter un label () sur Acteur, nous avons la Figure 63 suivante, qui permet d'ajouter "acteur gouvernance" comme label du concept "Acteur".

Ajout de label(s):

Identifiant (*):	http://www.cluva.eu/ontocluya#Acteur
Label (fr) 1:	acteur gouvernance
Label (fr) 2:	
Label (fr) 3:	
Label (en) 1:	governance actor
Label (en) 2:	
Label (en) 3:	

Figure 63: formulaire pour ajouter de nouveaux labels : acteur gouvernance (en français) et governance actor (en anglais) du concept Acteur

10.2.3.2 Scénario 2 : découverte et ajout d'un concept

Un acteur peut aussi découvrir le mot "adaptation" dans la Figure 62 comme étant un nouveau concept à ajouter à l'ontologie du CC.

En appuyant sur le bouton ajouter un concept (+c) dans cette Figure 62, nous avons la Figure 64 suivante qui permet d'ajouter un concept d'ID par défaut "Adaptation" et qui a comme premier label "adaptation" en plus des autres informations (label en anglais, commentaires en français et en anglais) qu'on peut rajouter.

Ajout d'un nouveau concept:

Identifiant (*):	Adaptation
Label (fr) 1:	adaptation
Label (fr) 2:	
Label (fr) 3:	
Label (en) 1:	adaptation
Label (en) 2:	
Label (en) 3:	
Commentaire (fr):	L'ajustement dans les systèmes naturels ou humains en réponse à des changements climatiques actuels ou attendus, ou à leurs
Commentaire (en) :	Commentaire en anglais ici ...

Figure 64: Formulaire d'ajout ; pour ajouter le concept Adaptation avec pour le premier label en français "adaptation", un premier label en anglais "adaptation" et un commentaire en français.

10.2.3.3 Scénario 3 : découverte de modification et modification d'un concept

Dans la Figure 62, nous avons le mot clé "forçage externe" qui d'après les statistiques est utilisé dans la description d'une seule ressource, mais n'a pas de correspondance dans l'ontologie du CC. Un expert peut dire qu'il va ajouter un nouveau label d'un concept déjà existant ou un nouveau concept dont le premier label est ce mot clé "forçage externe".

Mais en regardant de plus près le tableau de la Figure 65, qui est une suite du tableau de la Figure 61, montrant la composition de l'ontologie du CC dans Catalog2C, nous constatons que c'est une simple faute d'orthographe dans l'écriture du mot "forçage externe" en mettant "c" seulement à la place de "ç". Donc dans un cas pareil, il faut éditer le concept à partir du bouton d'édition (✎) et effectuer les modifications nécessaires, voir la Figure 66.

  	Cloud	0	0.0%
  	Vulnérabilité environnementale	0	0.0%
  	Acteur pertinent	0	0.0%
  	Acteur régional	0	0.0%
  	Antropique	0	0.0%
  	Déforestation	0	0.0%
  	Forçage externe	0	0.0%
  	Tempête	0	0.0%
  	Communication radio television	0	0.0%
  	Protocole	0	0.0%
  	Atmosphère	0	0.0%
  	Acteur stratégique	0	0.0%
  	Assistance	0	0.0%
  	Tornado	0	0.0%

Figure 65 : Une suite du tableau de statistiques (Figure 61) d'utilisation des labels des concepts l'ontologie du CC correspondant aux mots clés dans la description des ressources dans Catalog2C

Modification d'un concept:

Identifiant (*):

Label (fr):

Label (en):

Commentaire (fr):

Commentaire (en):

Figure 66 : Formulaire de modification d'un concept : modification du concept Forçage externe pour corriger le "c" du label en français « forçage externe » en "ç" pour avoir « forçage externe ».

10.2.3.4 Ajout de relation entre deux concepts

L'ajout d'une relation permet à un expert en se basant sur son expérience de proposer une relation entre deux concepts de l'ontologie du CC, en appuyant sur le bouton (+ R) des Figure 61 ou Figure 65.

Il faut noter que dans Catalog2C seule les relations de généralisation ou de spécialisations sont utilisées dans la détermination du voisinage d'un mot clé dans la recherche sémantique de ressources à partir d'un mot clé. Mais nous donnons ici la possibilité d'ajouter des relations sémantiques, en plus d'ajouter des relations de généralisation ou de spécialisation (voir la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Après la maintenance de l'ontologie du CC par les scénarios (Figure 63, Figure 64, Figure 66 et Figure 67), la Figure 68 montre que les mis à jour sont effectués.

Ajout d'une relation:

Identifiant Relation (*):

Domain :

Range :

Label (fr) 1:

Label (fr) 2:

Label (en) 1:

Label (en) 2:

Commentaire (fr):

Commentaire en francais ici ...

Commentaire (en) :

Commentaire en anglais ici ...

Figure 67 : Formulaire d'ajout de relation ; Ajout d'une relation de spécialisation entre Adaptation et Instrument.

	Mots clés	Nombre	Concept(0/1)
	adaptation	1	1
	risque	6	1
	inondation	1	1
+C	population	1	0
	acteur gouvernance	2	1
	changement climatique	6	1
+C	etc.	1	0
+C	Mots clés ici ...	2	0
	gaz à effet de serre	1	1
	rayonnement infrarouge	1	1
	risk	1	1
	forçage externe	1	1
	Acteur secondaire	2	1
	vulnérabilité	1	1
	catastrophe	1	1
	mission	2	1
	Actor	1	1
	salinisation	1	1
	aléa	1	1
+C	ontologie	1	0
		11	1

Figure 68 : Statistiques d'utilisation des mots clés dans Catalog2C et leur correspondance ou non à un label de concept de l'ontologie du CC (après ajout du label acteur gouvernance du concept Acteur, ajout du concept Adaptation et modification du label du concept Forçage_externe).

10.3 SimSem2C pour CLUVA- La simulation du principe du pollueur payeur

Nous proposons dans cette section le prototype du simulateur sémantique du modèle du principe du pollueur payeur. Ce prototype est le résultat d'une implémentation spécifique de SimSem2C pour ce modèle du pollueur payeur, présenté dans le chapitre 9 précédent.

Dans ce prototype les agents sont des pollueurs, des sociétés et des laitiers dont nous observons leurs comportements qui consistent à émettre du gaz à effet de serre pendant une durée fixée. Ensuite ces agents se rendent au « marché du carbone » où ils échangent des quotas. Après ces échanges, les agents renseignent l'agent ciel sémantique (ACS) sur les transactions qu'ils y auraient faites. Ensuite, les agents sémantiques s'arrêtent et la simulation est arrêtée. L'utilisateur a alors la possibilité d'afficher le fichier contenant les résultats de la simulation ou de visualiser en deux dimensions (avec Java2D⁴⁶) le déroulement de la simulation. La simulation de ce système du pollueur payeur se fait suivant quatre (4) étapes : la saisie des conditions initiales, le déroulement de la simulation, la fin de la simulation avec la disponibilité des résultats et la visualisation de ces résultats de la simulation.

10.3.1 La saisie des conditions initiales

Dans l'exemple que nous proposons ici, nous désirons observer le comportement de six (5) agents qui sont des pollueurs. Nous renseignons dans un premier temps les informations relatives à chacun de ces agents (nom, quota, gaz émis, etc.) (Figure 69) puis la durée de la simulation qui est de 20 secondes (Figure 70). On peut aussi avant de lancer la simulation, dont nous suivons le déroulement depuis la fenêtre de la Figure 72, voir le contenu du fichier stockant les conditions initialement saisies (Figure 71).

⁴⁶ **Java2D** est une bibliothèque graphique de bas niveau pour Java, faisant partie à la fois de JFC et de Java Media. Cette bibliothèque est le fruit d'une collaboration entre Sun Microsystems et Adobe Systems pour pallier les manques et déficiences de l'AWT. Tant la pile d'exécution de Java2D que ses commandes offrent d'ailleurs une grande similarité avec le langage de rendu PostScript [wikipédia, (date de consultation : 24/01/2014)]

The figure shows five instances of the 'SAISIE DONNEES' window in the SMA 3P application, each representing a different agent (S1 to S5). The data entered in each window is as follows:

Agent	Nom Societe	Quotas (Tonnes)	Debit Emission	type De Gaz	Concept Associé
S1	S1	700	45	Dioxyde de Carbone	societe
S2	S2	170	5	Methane	societe
S3	S3	170	9	Methane	societe
S4	S4	900	70	Dioxyde de Carbone	laitier
S5	S5	80	3	Protoxyde D'azote	societe

Figure 69 : La saisie de conditions initiales. On appui sur le bouton « Valider » continuer la saisie d'autres agents (c'est le cas après la saisie des agents S1, S2, S3 et S4) et pour finir la saisie on appui sur le bouton « Terminer la saisie » (c'est le cas après la saisie de l'agent S5).

The 'Duree Simulation' window in SMA 3P displays the simulation duration. The input field contains the value '20'. Below the input field are three buttons: 'lancer la Simulation', 'Voir Condit. Init.', and 'Reprendre la saisie'.

Figure 70 : Fenêtre pour la saisie de la durée de la simulation. Dans cette fenêtre l'utilisateur, avant de lancer la simulation, a la possibilité de consulter un fichier au format RDF dans lequel sont inscrits les conditions initiales qu'il avait auparavant saisies (voir la figure 68), pour en vérifier la rectitude. Pour cela, il lui suffit de cliquer sur le bouton « Voir Condit. Ini. ». Il peut aussi reprendre la saisie ou sinon lancer la simulation.

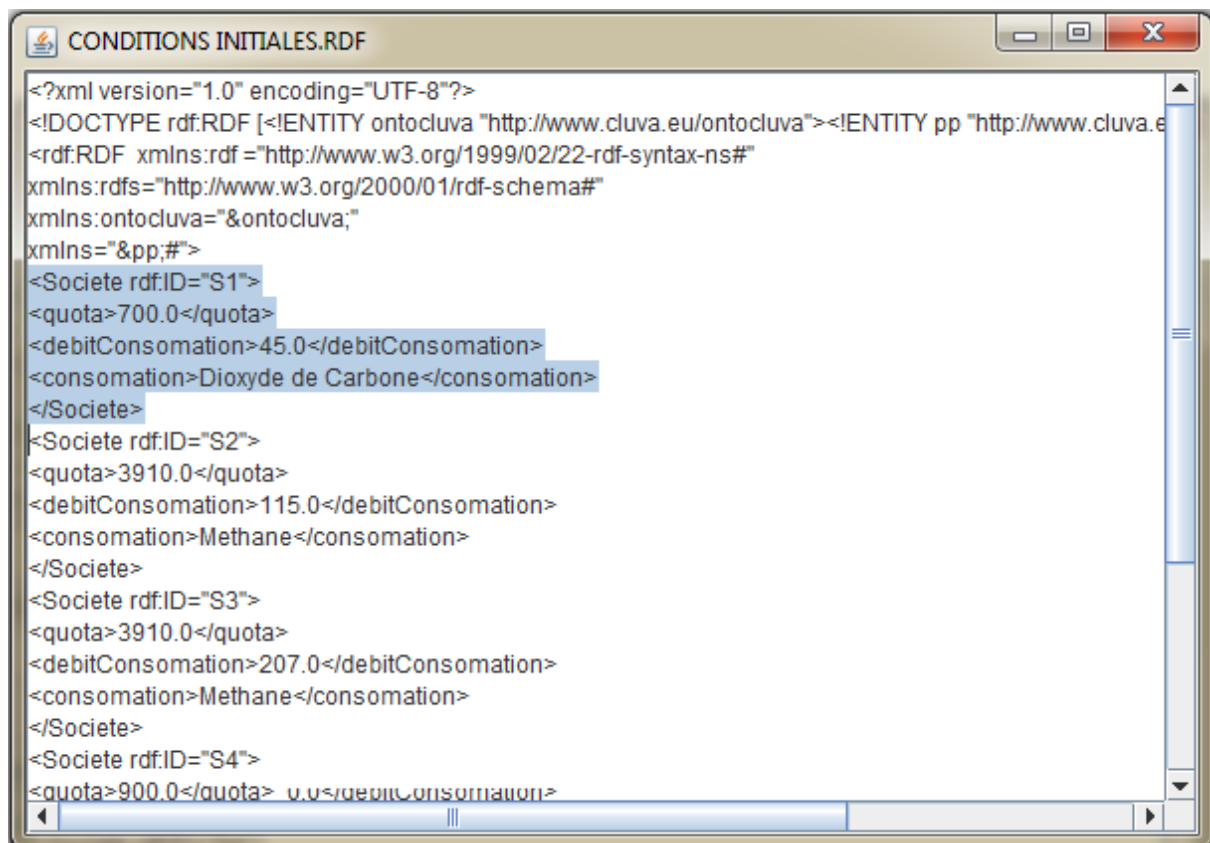


Figure 71 : Fenêtre affichant les conditions initiales saisies ; dans cette fenêtre on a : l'agent S1 est une Société. Son quota est de 700 tonnes de dioxyde de carbone (CO2). Il consomme du CO2 avec un débit d'émission de 45 tonnes.

10.3.2 Le déroulement de la simulation

La fenêtre « Déroulement de la simulation » nous renseigne sur le déroulement de la simulation en temps réel. Les renseignements qu'elle nous fournit portent sur les communications entre les agents et les émissions de gaz de ces derniers. Nous en fournissons une capture dans Figure 72 qui suit.

Elle comporte trois (3) boutons, l'un permettant d'annuler la simulation à tout moment (bouton *Annuler*), les deux (2) autres permettant de visualiser les résultats de la simulation en 2D ou de consulter le fichier au format RDF contenant ces résultats. Ces deux(2) boutons sont désactivés tant que la simulation n'est pas finie. Mais une fois cette dernière terminée, ils sont activés et l'utilisateur a alors la possibilité de les utiliser.

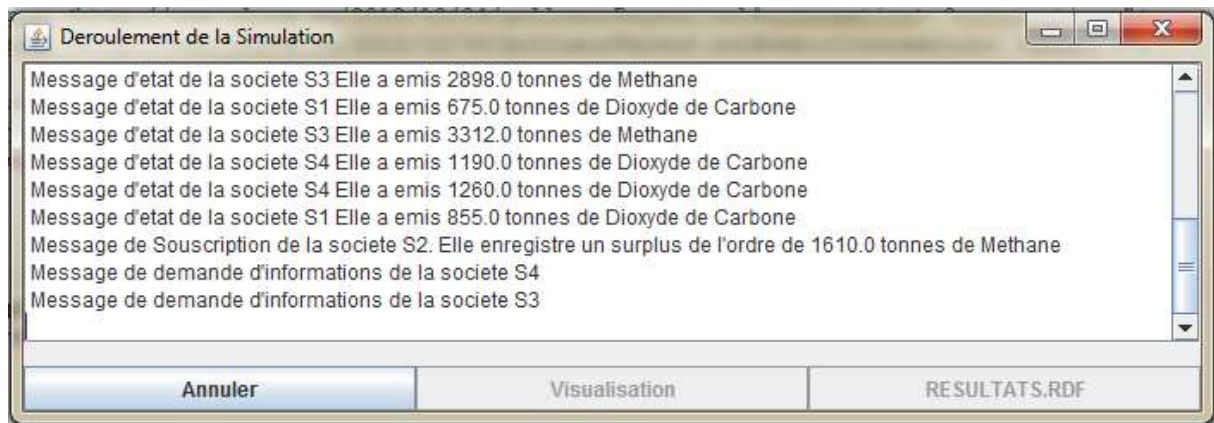


Figure 72 : Fenêtre montrant le déroulement de la simulation. Nous pouvons le voir ici, des renseignements sur les communications des agents sémantiques (Message de souscription de la société S2) et sur l'activité des agents (Message d'état de la société S4 qui a émis 1260 tonnes de dioxyde de carbone).

10.3.3 Résultats de la simulation

A la fin de la simulation, l'utilisateur a la possibilité de visualiser en 2D le déroulement de la simulation ou de consulter le fichier `resultats.rdf` faisant office de journal contenant tous les faits relatifs à la simulation : les communications, les échanges de quotas, les demandes de connaissances à l'ACS, etc. Pour consulter ce fichier, l'utilisateur a juste à appuyer sur la touche `RESULTATS.RDF` de la fenêtre (Figure 72) pour avoir la fenêtre (Figure 73) contenant les informations ou les faits de la simulation.

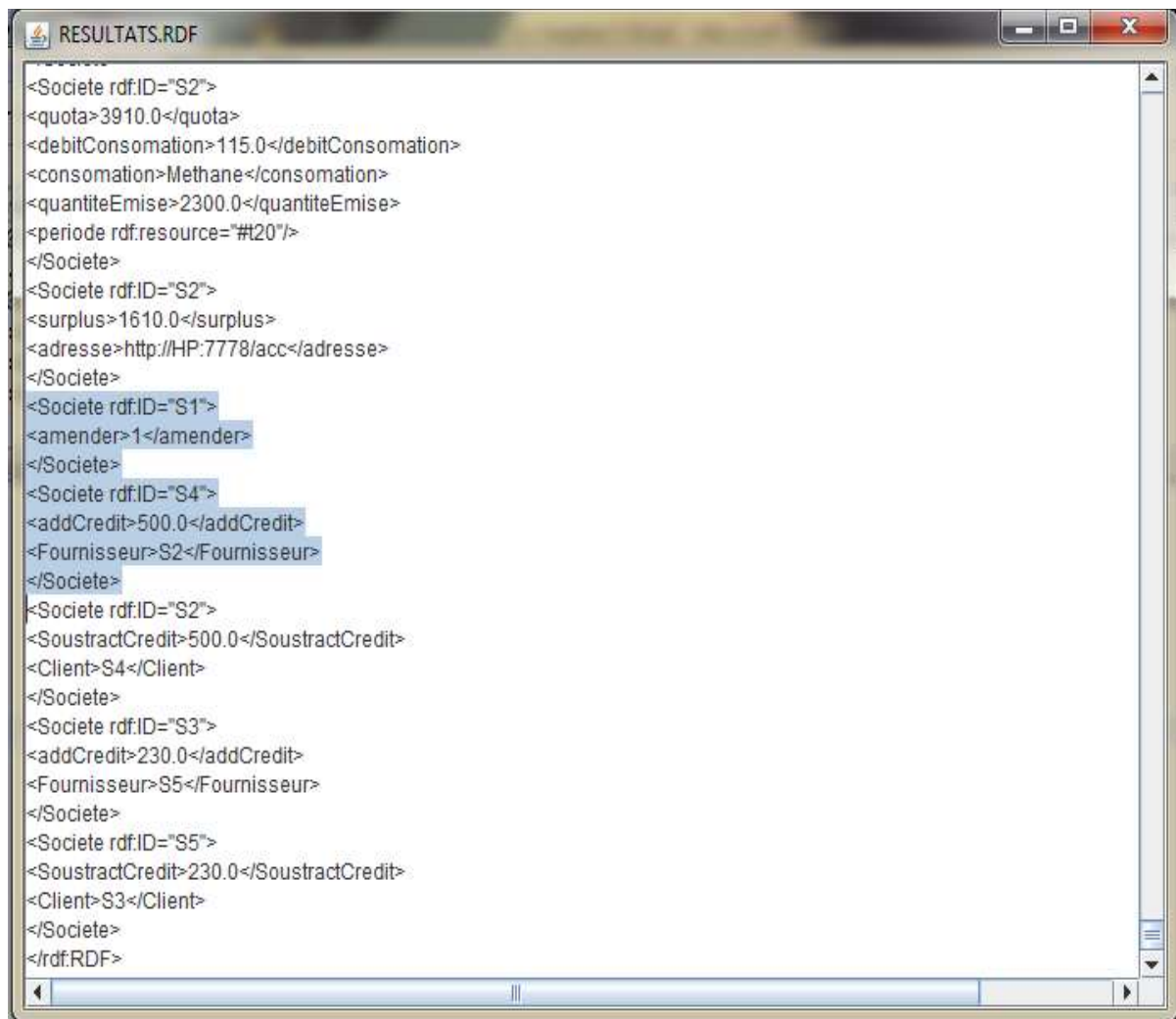


Figure 73 : Fenêtre montrant les résultats de la simulation grâce à la consultation du fichier **RESULTATS.RDF**, l'utilisateur pourra savoir ce qui s'est échangé entre les agents sémantiques. Nous pouvons voir, la sélection en bleu dans la fenêtre que la société S1 est amender et que la société S4 a vu son crédit carbone augmenté de 500 tonne et que la société lui ayant vendu du quota est S2).

Les résultats de la simulation et les connaissances du domaine du changement climatique qui sont associées à ces résultats sont dans des formalismes du web sémantique (OWL, RDF(S), RIF, SPARQL basées sur XML) donc peuvent être partagés et visualisé sur le web par des experts partenaires. Dans le prototype que nous présentons ici la visualisation est en 2D (voir Figure 75, Figure 76, Figure 78 et Figure 79).

10.3.4 Visualisation des résultats

Nous représentons chaque agent par trois(3) cercles, en utilisant la technologie JAVA 2D. Le premier colorié en vert représente le quota de la société, sa taille diminue, par unité de temps, proportionnellement au débit d'émission. Dans ce premier cercle est inscrit un second cercle

colorié en orange et représente le seuil, qui une fois atteint précise que la société a épuisé son quota. Le cercle rouge précise, s'il est le seul restant, que la société est victime d'une amende.

L'agent ciel sémantique est représenté par une ligne (en bleu) et nous illustrons l'écoulement du temps par un compteur à rebours commençant à 0 et s'arrêtant à une valeur égale à la durée de la simulation. Ci-après, nous donnons des captures montrant la visualisation des requêtes figurant dans les captures de la section précédente (voir Figure 75, Figure 76, Figure 78 et Figure 79).

Dans cette visualisation, l'utilisateur peut faire une sélection des agents dont il veut observer le comportement au cours de la simulation. Pour ce faire nous lui fournissons une fenêtre de par laquelle il écrit une requête spécifiant les agents qu'il veut observer. Nous donnons, ci-après, deux (2) exemples illustrant deux (2) demandes de visualisation. La demande de visualisation est en SPARQL (Figure 74 et Figure 77) par souci de simplification du code mais extensible à un langage naturel (si on veut le faire utilisé par des experts).

L'utilisateur après avoir écrit sa requête de visualisation clique sur le bouton « Exécuter » pour l'exécution de la requête. Une fois la requête exécutée, les boutons « Visualiser » et « Résultat Requête » sont activés. L'utilisateur peut soit consulter le fichier en RDF contenant les résultats de sa requête de visualisation ou soit visualiser ces résultats en 2D. Pour exemple, il faut voir les deux cas de visualisation (Figure 74, Figure 75 et Figure 76) et (Figure 77, Figure 78 et Figure 79).

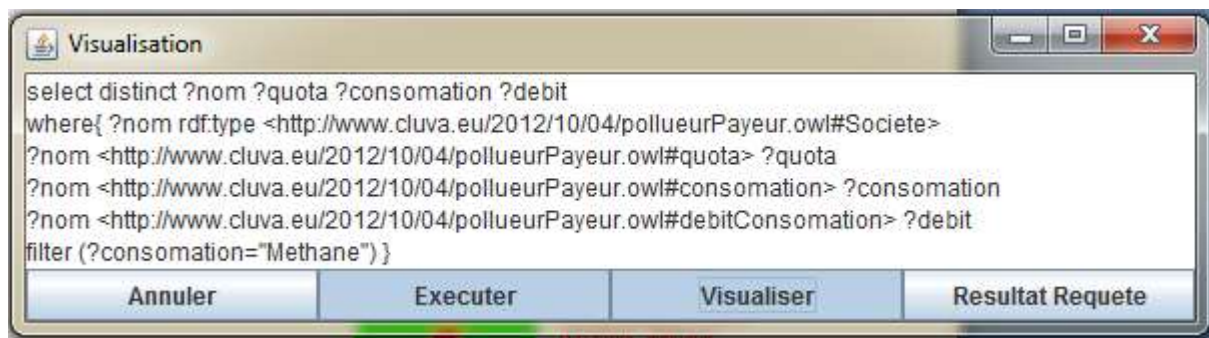


Figure 74 : Demande de visualisation du comportement des Sociétés émettrices de Méthane

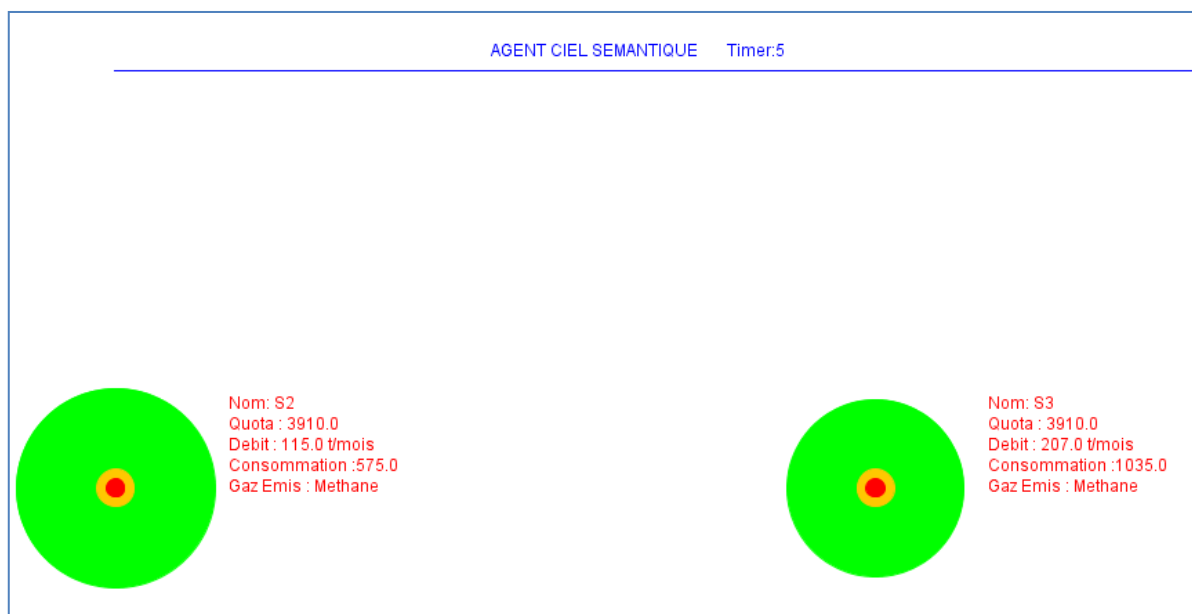


Figure 75 : Etat des Sociétés émettrices de Méthane à la période t = 5

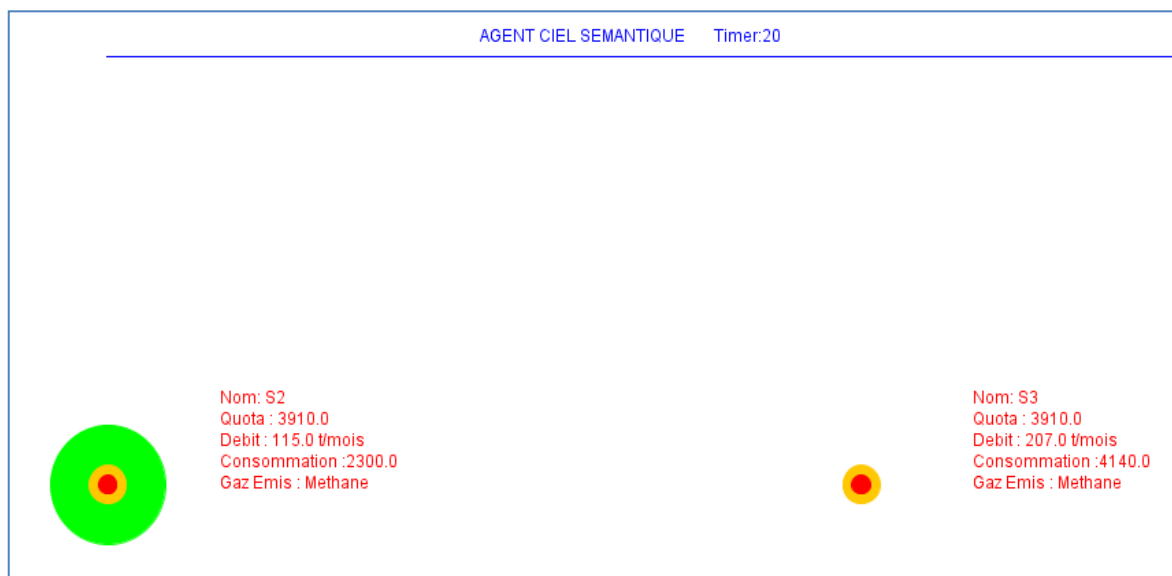


Figure 76 : Etat des Sociétés émettrices de Méthane à la période t = 20

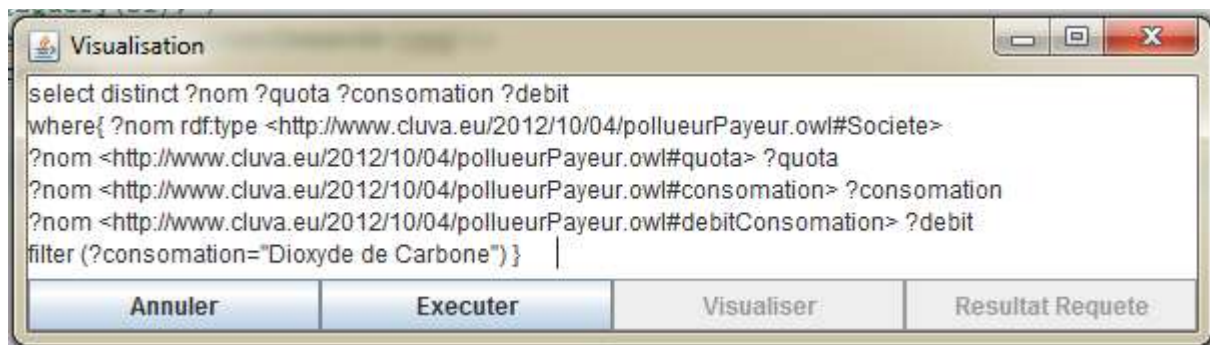


Figure 77 : Demande de visualisation du comportement des Sociétés émettrices de Dioxyde de Carbone

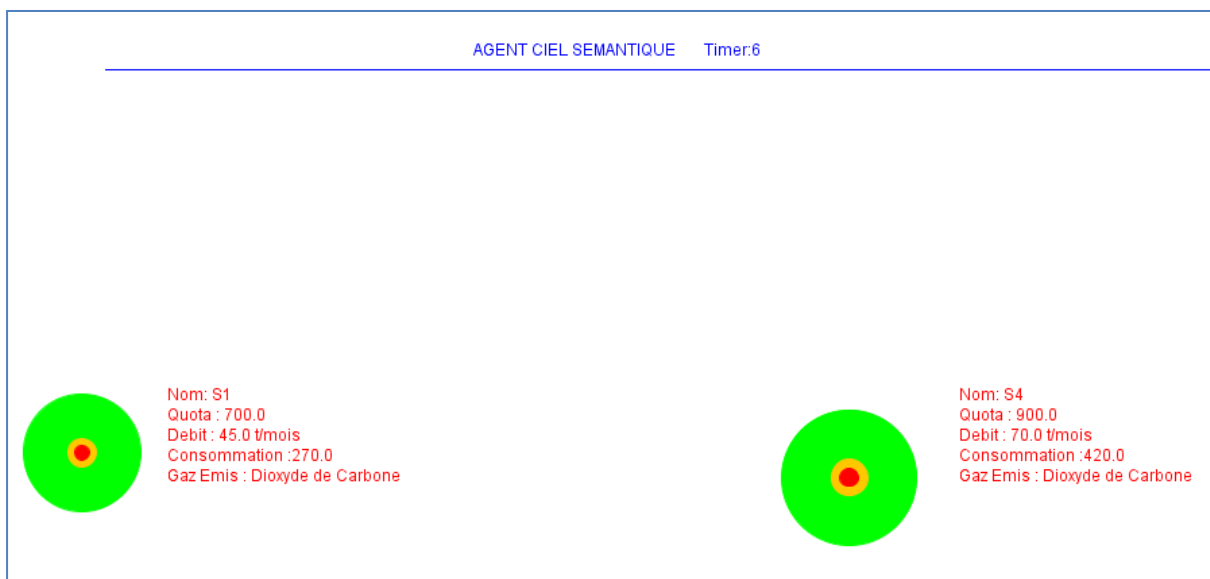


Figure 78 : Etat des Sociétés émettrices de CO2 à la période t = 6

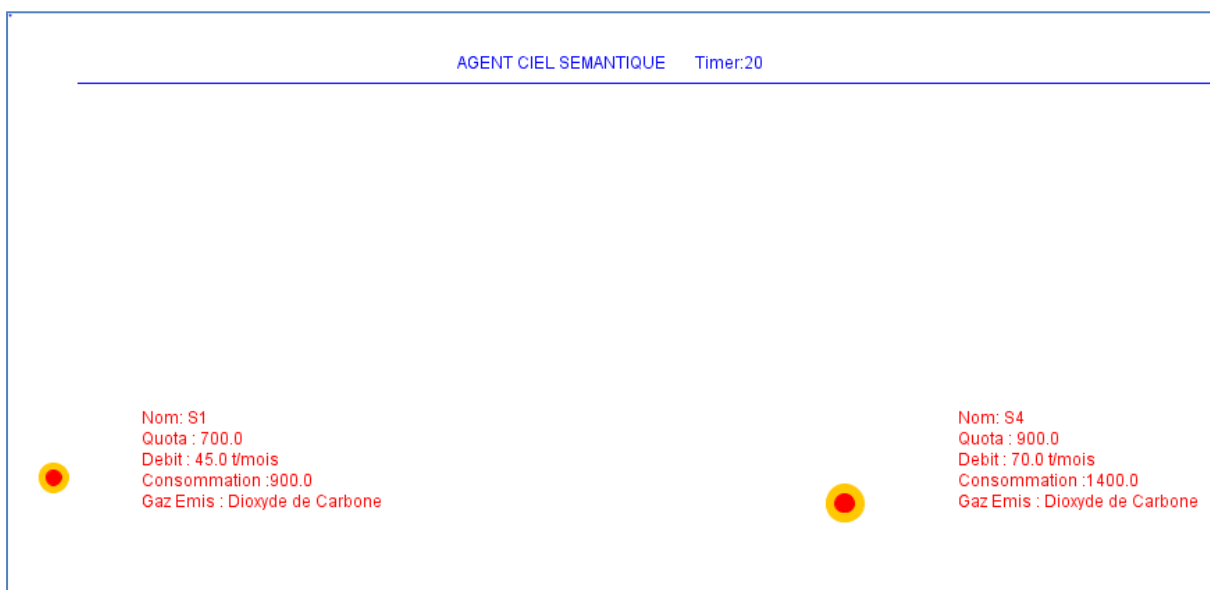


Figure 79 : Etat des Sociétés émettrices de CO2 à la période t = 20

10.4 Conclusion

L'implémentation de SimSem2C pour le pollueur payeur est faite avec les Framework JADE pour la partie multi-agent et Java2D pour la visualisation 2D. L'implémentation utilise aussi l'API CORESE pour charger les connaissances, faire les inférences et répondre aux demandes de visualisation avec les formalismes du web sémantiques, c'est-à-dire OWL, RDF(S), RIF et SPARQL.

L'implémentation de SimSem2C est souple et facile à faire évoluer car elle est composée de technologies qui évoluent (Java, JADE, Java2D, CORESE, OWL, RDF(S), RIF et SPARQL).

Les perspectives dans le simulateur sémantique sont :

- Partage et visualisation web sémantique des résultats de simulation de SimSem2C, car les résultats sont aux formalismes web sémantiques basés sur XML, langage de partage dans le web.
- L'évolution des connaissances dans les cadres du Catalog2C (vérification de la sémantique des changements, la validation des changements par les experts, la gestion des versions des connaissances) et du SimSem2C ;

Conclusion générale

Les conséquences du changement climatique justifient l'intérêt des politiques et des scientifiques par rapport à cette question. Le changement climatique (CC) constitue ainsi un domaine multidisciplinaire et complexe au carrefour de plusieurs disciplines interdépendantes (la climatologie, l'urbanisme, la gouvernance des risques, etc.) et faisant intervenir plusieurs acteurs humains et institutionnels de spécialités différentes. Ces derniers doivent, entre autres, communiquer, partager et intégrer leurs connaissances pour mieux jouer leurs rôles.

Dans ce domaine du changement climatique, la connaissance occupe une place stratégique dans la lutte contre les risques et les catastrophes. Par conséquent, dans la gouvernance, c'est-à-dire la gestion et la prévention, des risques et des catastrophes climatiques le manque de connaissances des populations, des sociétés ou des décideurs est considéré comme une cause de l'augmentation des conséquences de ces changements.

Les connaissances à elles seules ne suffisent pas pour la gestion des risques, mais c'est la gestion des connaissances, permettant d'organiser les connaissances pour atteindre les objectifs des organisations, qui répond aux besoins d'adaptation aux risques. Les trois situations suivantes (illustrées par trois caricatures) montrent ce rapport entre les niveaux de connaissances et la gestion des risques :

- La **situation 1** montre un enfant, qui n'a pas la connaissance du risque et qui s'expose. Il ouvre la bouche du lion (qui est la force du risque) pour introduire sa tête (qui est sa faiblesse).
- La **situation 2** montre une personne qui a la connaissance du risque, mais qui est sous-expérimentée. Elle voit sur le chemin, qu'elle prend toujours pour aller au champ, un lion qui dormait (un risque) et elle fuit pour ne pas s'exposer. Ce qui n'est pas une solution durable car comme c'est son chemin le risque est permanent.
- La **situation 3** montre une femme (la mère Afrique) qui s'accompagne du risque. Elle est même protégée face à d'autres risques qui regardent ses objets de convoitise (sa richesse). C'est une illustration optimiste qu'avec la connaissance et la simulation sémantique, cette mère (Afrique) a apprivoisé le risque et dispose maintenant de compétences, d'intelligence ou de sagesse pour faire du risque un ami intime.

Situation 1 : Information, Non connaissance des risques



Situation 2 : Connaissances des risques



Situation 3 : Compétences (Intelligence ou sagesse) sur risques



L'objectif général de cette thèse était de proposer un système de gestion des connaissances du domaine du changement climatique pour passer de la situation 2 à la situation 3 ci-dessus. Les objectifs spécifiques étaient d'abord de proposer un patron de conception d'ontologies du domaine du changement climatique (pour la représentation des connaissances du changement climatique à partir d'une base générique de connaissances de ce domaine) et ensuite une architecture d'un système multi-agent sémantique basée sur une ontologie (représentant des

connaissances) de domaine accessible aux agents, dans la simulation, pour leurs comportements et leurs communications.

Dans cette conclusion, nous faisons d'abord un bilan des contributions de cette thèse, puis la revue des questions de recherche et nous terminons par dégager des perspectives.

Bilan

Architecture d'un système de gestion des connaissances du changement climatique

Nous avons proposé une architecture d'un système de gestion des connaissances pour la représentation et l'évolution des connaissances, le catalogage et la recherche sémantique de ressources, la simulation multi-agent sémantique, l'intégration des ressources et l'aide à la décision. Cette architecture est la contribution générale de cette thèse, les autres contributions sont spécifiques et réalisent les différents modules du SGC fondé sur cette architecture.

Construction d'un patron de conception d'ontologie

Notre première contribution est la construction d'un patron de conception d'ontologies du changement climatique, une ontologie générique nommée *OntoCLUVA*. Hormis un modèle conceptuel sur les risques et les catastrophes en général, il n'existe pas de ressources ontologiques pour le domaine. Nous nous sommes donc intéressés, dans un premier temps, à représenter les connaissances génériques du domaine du changement climatique, par un patron de conception d'ontologie de ce domaine, pour gérer les besoins de connaissances différents selon les tâches. Pour cela, nous avons fait un choix parmi les approches de méthodologies proposées par l'ingénierie ontologique adaptées pour la construction d'un patron de conception d'ontologies du domaine du changement climatique qui, dans notre cas, est une ontologie générique. L'originalité de ce travail de représentation des connaissances génériques porte sur la considération des caractéristiques multidisciplinaire et complexe de ce domaine pour la construction de ce patron de conception d'ontologies.

Architecture de SMA sémantique.

La deuxième contribution concerne une architecture sémantique de système multi agent (SMA) pour la prise en compte de la connaissance des agents de leur environnement dans la simulation des systèmes complexes en ajoutant une dimension ontologique dans les SMA. Pour la simulation de ces modèles du changement climatique, nous proposons, en plus des dimensions classiques *agent*, *environnement*, *interaction* et *organisation* d'intégrer une

nouvelle dimension dite *ontologique* dans les systèmes multi-agents pour permettre aux agents d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement d'exécution.

Implémentation des modules de catalogage (Catalog2C) et de simulation sémantique (SimSem2C) du système de gestion des connaissances du changement climatique

Nous avons spécifié un système de gestion des connaissances du domaine du changement climatique. Dans ce cadre, nous avons développé un catalogue de ressources de partenaires du changement climatique, nommé Catalog2C, permettant la description des ressources et la recherche sémantique de ressources de partenaires. Nous avons aussi proposé un simulateur sémantique de systèmes complexes du changement climatique, nommé SimSem2C, basé sur l'architecture de SMA sémantique. Ces implémentations sont dans le cadre du projet CLUVA.

Revue des questions de recherche

Dans la description de la problématique de notre thèse, nous avons énoncé un certain nombre de questions de recherche relatives aux problèmes qu'on peut se poser qui consiste à aller vers un système de gestion des connaissances du changement climatique. Le travail que nous avons décrit dans ce manuscrit a apporté un certain nombre de réponses à ces questionnements. Nous les passons en revue.

Question 1 : Quelle architecture proposer pour un système de gestion des connaissances du changement climatique ?

Pour répondre à cette question, nous avons proposé dans cette thèse une architecture générale et fonctionnelle d'un système de gestion des connaissances permettant la gestion des ressources de partenaires du changement climatique, par un catalogue de ressources nommé Catalog2C et d'un système d'intégration des ressources, la simulation sémantique de modèles de systèmes multi-agents intégrant la dimension ontologie dans le système, ce qui permet aux agents d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement dans leurs communications et leurs comportements et l'aide à la décision. Cette architecture est centrée sur les connaissances génériques, le patron de conception d'ontologies du domaine du CC OntoCLUVA.

Question 2 : Comment faut-il représenter les connaissances génériques du changement climatique en considérant que ce domaine est multidisciplinaire et complexe?

La réponse à cette question est que nous sommes partis avec les ressources disponibles (les experts et les ingénieurs de connaissances dans le projet CLUVA, les corpus de textes, etc.) et les méthodologies et approches de l'ingénierie des connaissances pour construire un patron de conception d'ontologies du domaine du CC, en tenant en compte des caractères multidisciplinaire et complexe de ce domaine. Ensuite nous avons proposé une méthodologie pour la construction d'ontologies spécifiques du domaine du changement climatique, en se basant sur ce patron de conception d'ontologies, OntoCLUVA, pour satisfaire les besoins différents de connaissances des modules du système de gestion des connaissances.

Question 3 : Quelle architecture devons-nous proposer pour cataloguer les ressources de partenaires du changement climatique ?

Nous avons proposé une architecture pour un catalogue devant permettre à des partenaires du CC distribués géographiquement et devant collaborer de décrire leurs ressources (données, modèles et expertises), de rechercher sémantiquement des ressources disponibles auprès d'un partenaire pour favoriser la collaboration entre des partenaires dans ce domaine du changement climatique et de maintenir les connaissances du domaine du CC utilisées dans ce catalogue, qui est initialement le patron de conception d'ontologies du domaine du CC.

Cette architecture est implémentée par un catalogue des ressources de partenaires du changement climatique nommé Catalog2C que nous avons implémenté dans cette thèse.

Question 4 : Quelle est la distance sémantique à formaliser, dans ce contexte du catalogue des ressources de partenaires du changement climatique, pour permettre la recherche sémantique dans ce catalogue?

Nous avons ici proposé une hypothèse, qui dit que « les mots clés utilisés dans la description des ressources appartiennent au vocabulaire du domaine du changement climatique, initialement le patron de conception d'ontologie OntoCLUVA ». Puis, de cette hypothèse, nous avons formalisé une distance entre deux mots clés en passant par la distance entre les deux labels de concepts de l'ontologie du CC correspondant à ces deux mots clés, qui (distance entre les deux labels de concepts) est calculée à partir de la distance, atténuée par la profondeur, de CORESE entre leur concept.

Question 5 : Quelle est l'architecture d'un système multi-agent (SMA) à proposer pour permettre aux agents ce SMA d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement dans leurs communications et dans leurs comportements ?

Nous avons complété l'architecture classique d'un SMA, qui a quatre dimensions : agent, environnement, interaction et organisation, en ajoutant une nouvelle (cinquième) dimension ontologique. Cela permet aux agents d'accéder aux connaissances du domaine de leur environnement et utiliser ces connaissances dans leurs communications et leurs comportements. Cette architecture sémantique propose des perspectives pour l'intégration de systèmes multi-agents sémantiques.

Nous avons appliqué, dans cette thèse, cette architecture sémantique de SMA dans le cadre d'un simulateur sémantique des modèles de systèmes complexes du changement climatique, nommée SimSem2C.

Question 6 : Comment assurer la maintenance de l'ontologie du domaine du CC dans chaque utilisation par un module du système de gestion des connaissances que nous proposons?

Nous avons proposé une approche pour la maintenance (évaluer afin de faire évoluer) de l'ontologie du CC dans le cadre de son utilisation par chaque module ou sous système (Catalog2C, SimSem2C, Aide2C, etc.) du système de gestion des connaissances. En effet, les connaissances dans le domaine du CC sont très dynamiques.

Nous avons, pour le cas de Catalog2C, proposé une approche semi-automatique (car interviennent dans ce processus les experts) basée sur les statistiques sur l'utilisation ou non des concepts de l'ontologie du CC dans la description des ressources.

Nous avons montré que l'ontologie du CC, utilisée comme méta modèle dans SimSem2C, le simulateur sémantique des modèles de ce domaine, pouvait être enrichie par les connaissances spécifiques aux modèles simulés.

En répondant aux questions de recherche, notre travail de thèse a ouvert d'autres questions ou problématiques de recherche que nous proposons en perspective.

Perspectives

Les recherches que nous avons menées dans le cadre de cette thèse peuvent être approfondies afin de répondre à d'autres questions qui peuvent toujours contribuer à la construction d'une ontologie spécifique du domaine du changement climatique, à la réalisation du système de gestion des connaissances du changement climatique et à l'évolution de l'architecture de SMA sémantique. Ces perspectives peuvent être regroupées en trois catégories.

Ingénierie ontologique

Le patron OntoCLUVA est utilisable pas seulement pour la construction d'ontologies du CC pour le SGC que nous proposons, mais il peut être utilisé dans la construction d'autres ontologies du changement climatique. Dans un premier temps nous allons publier ce patron de conception d'ontologie du CC sur le web pour permettre à d'autres projets avec les besoins de représentation des connaissances du changement climatique de pouvoir le réutiliser.

Ce patron de conception est un grand bloc générique. Il peut être décomposé en quatre sous blocs à l'image des sous domaines du changement climatique. Ainsi dans l'avenir nous proposerons les quatre patrons de conception d'ontologies : le patron des causes du changement climatique, le patron des risques et des catastrophes, le patron vulnérabilité urbaine et le patron gouvernance des risques et des catastrophes.

Pour l'évolution des connaissances, de l'ontologie du CC dans les cadres du Catalog2C, nous avons implémenté quatre scénarios de maintenance. Pour perspectives nous implémenterons la vérification de la sémantique des changements, la validation des changements par les experts et la gestion des versions des connaissances.

Par contre dans SimSem2C, nous n'avons pas encore proposé une approche de maintenance de l'ontologie du CC utilisée comme méta-modèle ; cela est aussi une de nos perspectives.

Dans SimSem2C, OntoCLUVA peut être enrichie par les connaissances spécifiques pour aller vers une ontologie du CC spécifique pour ce cadre d'utilisation de SimSem2C.

Utilisation de Catalog2C dans CLUVA 2 et vers une approche d'intégration

Catalog2C, en donnant la possibilité aux partenaires d'identifier des ressources disponibles chez les autres partenaires, constitue une première étape d'intégration des ressources de ces partenaires, voir la Figure 80 suivante.

En plus d'être une première étape d'intégration, ce catalogue permet d'enrichir les connaissances que nous avons sur les ressources des partenaires par :

- des statistiques sur les formats des ressources, leur disponibilité, leur localisation, etc.
- la maintenance de l'ontologie du changement climatique, par la découverte et l'adaptation de composants d'ontologies, dans l'utilisation de ce catalogue de ressources par des partenaires.

L'ontologie du CC contenant les connaissances nécessaires sur les ressources à intégrer (déjà décrites dans Catalog2C) et des statistiques sur les ressources nous permettra de proposer une meilleure approche d'intégration de ces ressources. Ainsi la suite de ce travail sur la gestion des ressources du CC est de voir comment utiliser l'ontologie du changement climatique, créée à partir d'OntoCLUVA et maintenue par Catalog2C, et les statistiques sur les descriptions des ressources des partenaires de CLUVA pour résoudre le problème d'intégration des ressources des partenaires de ce projet CLUVA.

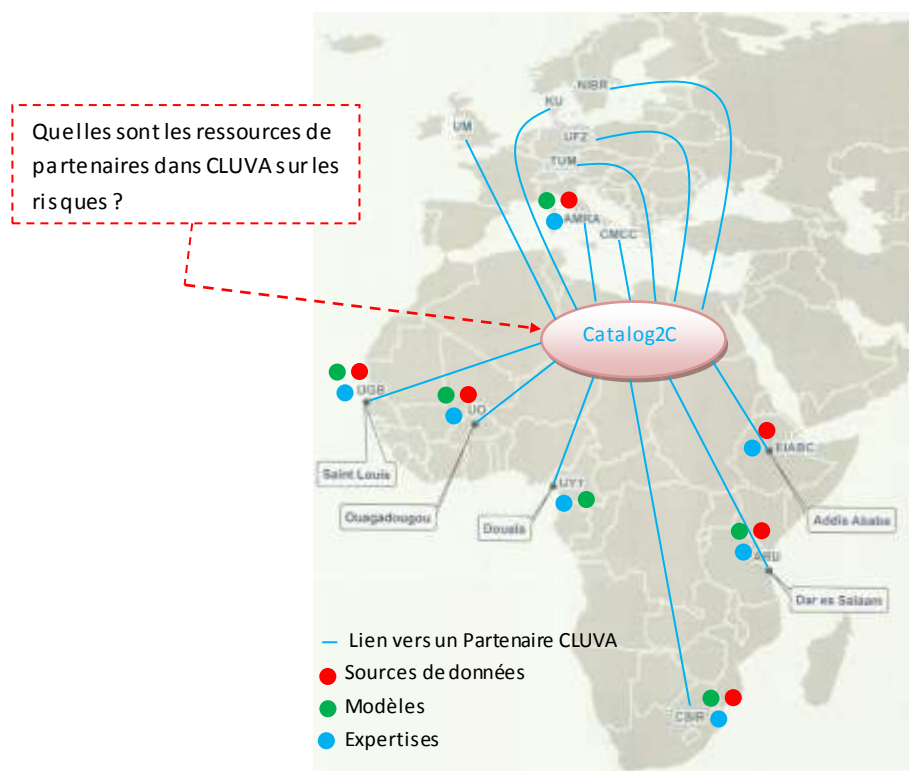


Figure 80 – Utilisation de Catalog2C par les partenaires du projet CLUVA pour la description et l'identification de ressources de partenaires. Pour exemple, un partenaire peut demander : Quelles sont les ressources de partenaires sur les risques ? Pour réponse Catalog2C retourne les ressources (données, modèles, expertises, ...) des partenaires sur les risques. Cette illustration de Catalog2C nous permet de voir comment ce catalogue relie les treize (13) partenaires du projet CLUVA.

Compléter l'implémentation de SimSem2C

A court terme, nous allons voir comment normaliser les communications d'humanisation et d'enregistrement dans l'architecture de SMA sémantique qui consistent à échanger des messages, contenant des connaissances, entre un agent sémantique et l'agent ciel sémantique. Ce travail va permettre aux agents de recevoir et d'envoyer des messages aux formats du web sémantique par exemple : OWL, RDFS et RDF pour les réponses et SPARQL pour les demandes de connaissances.

Nous allons aussi compléter l'implémentation de l'utilisation des connaissances par les agents sémantiques dans ce simulateur sémantique. Pour cela nous verrons aussi dans l'avenir, d'autres modèles pour l'adaptation, la résilience et la diminution de la vulnérabilité des populations à simuler avec SimSem2C.

Partage et visualisation web sémantique des résultats de simulation de SimSem2C

Dans le simulateur sémantique proposé pour les modèles des systèmes complexes du domaine du changement climatique qui est l'application de l'architecture du SMA sémantique que nous avons pour ce domaine, nous avons utilisé les formalismes web sémantique pour la représentation des connaissances (connaissances génériques, connaissances spécifiques, conditions initiales et résultats de la simulation). Ces formalismes sont basés sur XML qui est un standard pour l'échange de données sur le web. Cela nous a donné deux importantes possibilités : l'échange de résultats de simulation entre des experts sur le web et la visualisation web des résultats des simulations.

Avec ces deux possibilités, nous pouvons aller vers une plateforme web sémantique de partage et de visualisation des modèles de systèmes multi-agents sémantiques du changement climatique qui permettra aux experts de déposer des résultats de simulation sémantique et de visualiser les résultats des simulations d'autres experts.

Intégration de systèmes multi-agents et autres architectures SMA sémantiques

A moyen terme, nous verrons l'intégration de systèmes multi-agents sémantiques basés sur l'architecture de SMA sémantique que nous avons proposée. Mais nous verrons aussi, à long terme, d'autres architectures de SMA sémantique pour permettre le choix d'architecture de SMA sémantique suivant la nature des systèmes complexes à étudier. Pour qu'à long terme faire l'implémentation des modules intégration des ressources et l'aide à la décision du système de gestion des connaissances du CC.

Références

- [1]. A. El Fallah Seghrouchni. Principes et architecture des systèmes multi-agents», Chapitre Les modèles de coordination d'agents cognitifs. Hermès, 2001. 19
- [2]. A. Gangemi et V. Presutti. Ontology Design Patterns. In S. Staab et R. Studer, editors, Handbook on Ontologies (Second Edition). Springer, Berlin, 2008.
- [3]. A. Gangemi. Ontology design patterns for semantic web content. In Y. Gil, E. Motta, V. R. Benjamins, et M. A. Musen, editors, The Semantic Web - ISWC 2005 : 4th International Semantic Web Conference, ISWC 2005, Galway, Ireland, Lecture Notes in Computer Science 3729, 2005.
- [4]. A. Gangemi. Ontology Design Patterns for Semantic Web Content. In Proceedings of the 4th International Semantic Web Conference, pages 262–276. Springer, 2005.
- [5]. A. Rao et M. Georgeff. «An Abstract Architecture for Rational Agents». Proceedings of C. Rich, W. Swartout, et B. Nebel, the International Workshop on Knowledge Representation, KR'92, pp 439–449, 1992. 11, 20
- [6]. Alexis Drogoul, De La Simulation Multi-Agent A La Résolution Collective de Problèmes : Une Étude De l'Émergence De Structures D'Organisation Dans Les Systèmes Multi-Agents, sous la direction de J. FERBER, 1993.
- [7]. Amal El Fallah-Seghrouchni, Serge Haddad, Tarak Melitti, Alexendru Suna, Interopérabilité des systèmes multi-agents à l'aide des services web, JFSMA 2004.
- [8]. Armel Ayimdji, Souleymane Koussoube, Laure Pauline Fotso, Développement des systèmes multi-agents à partir d'ontologies, CARI 2010.
- [9]. B. Bachimont. (2000). Engagement sémantique et engagement ontologique : conception et réalisation d'ontologies en Ingénierie des connaissances. In J. Charlet, M. Zacklad, G. Kassel & D. Bourigault (Eds.), Ingénierie des connaissances, évolutions récentes et nouveaux défis. Paris: Eyrolles.
- [10]. Béatrice Fuchs and Amedeo Napoli, Éléments de réflexion sur les composants d'ontologies et leur manipulation par RàPC, 17ème séminaire français sur le raisonnement à partir de Cas, pages 107-113, juin 2009.

- [11]. Bellifemine F., Caire G., Trucco T., Rimassa G., JADE : Programmer's Guide, Février 2002.
- [12]. Bellifemine FL, Caire G, Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE: John Wiley & Sons; 2007.
- [13]. BERNERS-LEE Tim, HENDLER James and LASILLA Ora, The Semantic Web, Scientific American, May 2001.
- [14]. Borst, W., 1997, Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse: Ph.D. Dissertation, University of Twente.
- [15]. Cheikh Ahmed Tidiane Niang, Vers plus d'automatisation dans la construction de systèmes médiateurs pour le web sémantique : une application des logiques de description, Thèse de Doctorat de l'Université de Tours et de l'UGB, Soutenue le 05 juillet 2013 à l'UGB de Saint-Louis.
- [16]. Corby O., Dieng-Kuntz R., Faron-Zucker C., Gandon F., (2006) Searching the Semantic Web: Approximate Query Processing Based on Ontologies, IEEE Intelligent Systems, January/February (Vol. 21, No. 1), pp. 20-27, ISSN: 1541-1672.
- [17]. Csongor I. Nyulas, Martin J. O'Connor, Samson W. Tu, David L. Buckeridge, Anna Okhmatovskaia, Mark A. Musen, "An Ontology-Driven Framework for Deploying JADE Agent Systems," wi-iat, vol. 2, pp.573-577, 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, 2008
- [18]. D. Provitolo, J.P. Müller, E. Dubos Paillard, (2009) Vers une ontologie des risques et des catastrophes : le modèle conceptuel, Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires, Rochebrune (Megève) : France (2009).
- [19]. Danny Weyns, H. Van Dyke Parunak, Fabien Michel, Tom Holvoet, et Jacques Ferber. Environments for multiagent systems state-of-the-art and research challenges. In E4MAS, éditeurs Danny Weyns, H. Van Dyke Parunak, et Fabien Michel, volume 3374 de Lecture Notes in Computer Science, pages 1–47. Springer, 2004.
- [20]. Delia C. ROGOZAN, Gestion de l'évolution des ontologies : Méthodes et outils pour un référencement sémantique évolutif fondé sur une analyse des changements entre versions d'ontologie, Thèse de Doctorat de l'Université du Québec à Montréal et de l'institut national des sciences appliquées de Rouen, Soutenue MAI 2008.

- [21]. Dr. Adrien Coly, notes de cours 2011, les risques naturels : les risques géomorphologiques, les risques climatiques et hydrologiques, les risques sismiques et risques volcaniques, Université Gaston Berger de Saint-Louis.
- [22]. E. Blomqvist. Pattern ranking for semi-automatic ontology construction. In R.L. Wainwright et H. Haddad, editors, Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2008), pages 2248–2255. ACM, 2008.
- [23]. Emmanuel B., Mounia H. & Henri B. (2005) Raisonnement et gestion des compétences ; extraction et gestion des connaissances (EGC 2005).
- [24]. F. Balbo, A. El Fallah Seghrouchni, et S. Pinson. Organisation et applications des SMA, Chapitre La coordination d’actions par planification Multi-Agents. Hermès, 2002. 19
- [25]. Fabien Gandon, Rose Dieng-Kuntz, Ontologie pour un système multi-agents dédié à une mémoire d’entreprise, Ingénierie des connaissances 2001.
- [26]. Fabien Gandon. Distributed artificial intelligence and knowledge management: Ontologies and multi-agent systems for a corporate semantic web. Thesis in informatics. INRIA and University of Nice - Sophia Antipolis — Doctoral School of Sciences and Technologies of Information and Communication (S.T.I.C.), 2002.
- [27]. Flouris, G. (2006). On Belief Change and Ontology Evolution. PhD thesis, University of Crete, Department of Computer Science.
- [28]. Frédéric Leone et Freddy Vinet, La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d’évaluation des risques naturels.
- [29]. Gandon F., Corby O., Diop I., Lo M., (2008) Distances sémantiques dans des applications de gestion d’information utilisant le web sémantique, Similarité sémantique atelier à EGC 2008, Sophia Antipolis.
- [30]. Gaoussou Camara, Conception d’un système de veille épidémiologique à base d’ontologie, Thèse de Doctorat de l’Université de Paris Sud et de l’UGB – Soutenue le 9 décembre 2013 à l’UGB de Saint-Louis.
- [31]. GEO-CONFIANCE, un glossaire pour questionner, problématiser, identifier et comprendre des mots-clefs.
- [32]. GIEC et GETE, Préservation de la couche d’ozone et du système climatique planétaire: Questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés, Résumé à

- l'intention des décideurs, Rapport accepté par les Groupes de travail I et III du GIEC, 2005, ISBN: 92-9169-218-2.
- [33]. GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- [34]. GIEC, Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Rapport du Groupe de travail I du GIEC, 2001.
- [35]. Gómez-Pérez, A. (1999). Evaluation of taxonomic knowledge in ontologies and knowledge bases. In Proc. of the 12th Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management, KAW'99. Voyager Inn, Banff, Alberta, Canada. <http://sern.ucalgary.ca/KSI/KAW/KAW99/papers.html>
- [36]. GRUBER T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 5, 199–220.
- [37]. Guillevic, Ch (1991) Psychologie du travail, Paris, Nathan, p. 145.
- [38]. Haase, P. et Sure, Y. (2004). D3.1.1.b State-of-the-Art on Ontology Evolution, SEKT/2004/D.3.1.1.b/v0.5. Institute AIFB, University of Karlsruhe.
- [39]. Ibrahima Diop and Moussa Lo (2013) An Ontology Design Pattern of the Multidisciplinary and Complex Field of Climate Change, Advances in Computer Sciences: an International Journal, Volume 2, Issue 5, pp. 104-113, ISSN: 2322-5157.
- [40]. Ibrahima Diop, Moussa Lo, Adrien Coly, Choix méthodologiques pour la construction d'une ontologie du domaine de la vulnérabilité urbaine face aux aléas liés aux changements climatiques, Actes du 4e Colloque National sur la Recherche en Informatique et ses Applications – Thiès, Sénégal, Avril 2012.
- [41]. Ibrahima Diop, Moussa Lo, Jean Marie Dembele, Papa Alioune Cisse, Architecture d'un système multi-agents sémantique : Application au domaine changement climatique et vulnérabilité urbaine, Actes du 5e Colloque National sur la Recherche en Informatique et ses Applications – Ziguinchor, Sénégal, Avril 2013.

- [42]. J. Ferber. Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions, Paris, 1995.
- [43]. J. Zhong, H. Zhu, J. Li, Y. Yu. (2002) Conceptual Graph Matching for Semantic Search, In Proc. Of 10th International Conference on Conceptual Structures, ICCS2002, LNCS 2393, Springer Verlag, pp. 92-106, Borovets, Bulgaria,
- [44]. Jérôme Champavère, De la représentation des connaissances au Web sémantique Un survol, Version du 10 mars 2010
- [45]. Jiang, J., Conrath, D., (1997) Semantic Similarity based on Corpus Statistics and Lexical Taxonomy. In Proc. of International Conference on Research in Computational Lin-guistics, Taiwan,
- [46]. J-M Laurent, (2005) KM : Knowledge Management, Les trois dimensions d'un projet OCSIMA.
- [47]. John Tranier, Vers une vision intégrale des systèmes multi-agents : Contribution à l'intégration des concepts d'agent, d'environnement, d'organisation et d'institution, Thèse, Soutenue le 18 décembre 2007, Université de Montpellier II.
- [48]. Karapiperis, S. and Apostolou, D. (2006). Consensus Building in Collaborative Ontology Engineering Processes, Journal of Universal Knowledge Management, Volume 1, Issue 3, pp. 199-216.
- [49]. Kolasa J. et Pickett S. T. 1991, Ecological Heterogeneity, Springer-Verlag, 1991.
- [50]. La revue GÉORISQUES, La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles.
- [51]. La revue focus N°2/09, « Réduction des risques de catastrophe : une approche axée sur l'égalité hommes-femmes et les moyens d'existence ».
- [52]. Leacock C. & Chodorow M, Combining Local Context and WordNet Similarity for Word Sense Identification ». In WordNet: An Electronic Lexical Database, C. Fellbaum, MIT Press, 1998.
- [53]. M. Fernandez, A. Gomez-Perez, and N. Juristo. METHONTOLOGY: From Ontological Arts Towards Ontological Engineering. In Proceedings of the AAAI97 Spring Symposium Series on Ontological Engineering, Stanford, USA, pages 33-40, March 1997.

- [54]. M. Grüninger and M. S. Fox. Methodology for the design and evaluation of ontologies. In International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI95), Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, 1995.
- [55]. M. Laclavik, Z. Balogh, M. Babik, L. Hluch, AGENTOWL: Semantic knowledge model and agent architecture, Computing and Informatics, Vol. 25, 2006, 419–437.
- [56]. M. Uschold and M. King. Towards a methodology for building ontologies. In Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing (IJCAI), 1995.
- [57]. M. Weggeman. Knowledge Management: The Modus Operandi for a Learning Organization. In J. F. Schreinemakers ed, Knowledge Management: Organization, Competence and Methodology, Proc. of ISMICK'96, Rotterdam, the Netherlands, Wurzburg:Ergon Verlag, Advances in Knowledge Management, vol. 1, 21-22 Octobre 1996, p. 175-187.
- [58]. M.C. Suárez-Figueroa. Doctoral Thesis: NeOn Methodology for Building Ontology Networks: Specification, Scheduling and Reuse. Spain. Universidad Politécnica de Madrid. June 2010.
- [59]. Mariano Fernández López, Asunción Gómez-Pérez, Juan Pazos Sierra, and Alejandro Pazos Sierra. Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. IEEE Intelligent Systems, 14(1):37_46, January 1999.
- [60]. Michal Laclavik, Zoltan Balogh, Marian Babik, and Ladislav Hluchfy. Agentowl: Semantic knowledge model and agent architecture. Computers and Artificial Intelligence, 25(5), 2006.
- [61]. Moisdon J.C., Du Mode d'Existence des Outils de Gestion, Paris, Seli Arslan, 1997.
- [62]. Mondary, 2011
- [63]. N.F. Noy, R.W. Ferguson, and M.A. Musen. The knowledge model of protégé-2000: Combining interoperability and flexibility. Lecture Notes in Computer Science, 1937:69_82, 2000.
- [64]. Nathalie Aussenac-Gilles, Brigitte Biébow et Sylvie Szulman, (2000). Modélisation du domaine par une méthode fondé sur l'analyse de corpus, 9e Conférence Francophone d'Ingénierie des Connaissances IC 2000, Toulouse : France (2000).

- [65]. Neches, Robert; Fikes, Richard; Finin, Tom; Gruber, Thomas; Patil, Ramesh; Senator, Tod; and Swartout, William. Enabling Technology for Knowledge Sharing. In *AI Magazine*, Fall, 1991.
- [66]. Olivier Corby, Rose Dieng-Kuntz, Catherine Faron-Zucker, Fabien Gandon, and Alain Giboin. Le moteur de recherche sémantique Corese. In Proc. of the Workshop Raisonner le web sémantique avec des graphes, AFIA platform, Nice, May 2005.
- [67]. Ousmane Sall, Contribution à la modélisation de données multi-sources de type DATAWEB basé sur XML, Thèse de Doctorat de l'Université du Littoral et de l'UGB – Soutenue le 27/01/2010 à Calais.
- [68]. Paolo GASPARINI, Angela DI RUOCC, Anne-Marie BRUYAS, Changements climatiques et vulnérabilité des villes africaines, research briefs in CLUVA project, publié en 2013.
- [69]. Paul Hsueh-Min Chang, Kuang-Tai Chen, Yu-Hung Chien, Edward Chao-Chun Kao, et Von-Wun Soo. From reality to mind: A cognitive middle layer of environment concepts for believable agents. In the Proceedings of Environments for Multiagent Systems (E4MAS), pages 57–73, 2004.
- [70]. Philippe Laublet, Chantal Reynaud, Jean Charlet, Sur quelques aspects du Web sémantique, Actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3
- [71]. Phuc Hiep LUONG, Gestion de l'évolution d'un web sémantique d'entreprise, Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Soutenue le 14 décembre 2007.
- [72]. Pinto, S., Staab, S., et Tempich, C. (2004). DILIGENT: Towards a fine-grained methodology for Distributed Loosely-controlled and evolving Engineering of ontologies. 1 Paper presented at the 16th European Conference on Artificial Intelligence ECAI2004, Valencia.
- [73]. Rada, R., Mili, H., Bicknell, E., Blettner, M., (1989) Development and Application of a Metric on Semantic Nets, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 19(1), pp. 17-30.
- [74]. Resnik, P., (1995) Semantic Similarity in a Taxonomy: An Information-Based Measure and its Applications to Problems of Ambiguity in Natural Language. In Journal of Artificial Intelligence Research, vol 11, pp. 95-130,

- [75]. Rim JEDIDI, Approche d'évolution d'ontologie guidée par des patrons de gestion de changement, Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Sud XI Orsay, Soutenue le 26 Novembre 2009.
- [76]. Rose Dieng-Kuntz - Olivier Corby - Fabien Gandon - Alain Giboin - Joanna Golebiowska - Nada Matta – Myriam Ribière, Méthodes Et Outils Pour La Gestion Des Connaissances: Une approche pluridisciplinaire du Knowledge Management (2nd Edition), Dunod Edition - INFORMATIQUES Série Systèmes d'information - ISBN 2 10 006300 6.
- [77]. Rose Dieng-Kuntz, Olivier Corby, Fabien Gandon, Alain GIBOIN, Golebiowska J., Matta N., Ribiere M., KNOWLEDGE MANAGEMENT, Méthodes et outils pour la gestion des connaissances , 2° édition, Dunod, 2001.
- [78]. Rudi Studer, V. Richard Benjamins, and Dieter Fensel. Knowledge engineering: Principles and methods. Data and Knowledge Engineering, 25(1-2):161_197, March 1998.
- [79]. S. Staab, H.P. Schnurr, R. Studer, Y. Sure. Knowledge Processes and Ontologies. IEEE Intelligent Systems 16(1):26–34. (2001).
- [80]. Serrou Belkacem et Djouadi Slimane, Gestion des connaissances, Dans le cadre du cours cognition et connaissances De Alain Mille, Université de Lyon.
- [81]. Stuart J. Russell et Peter Norvig. Artificial Intelligence. A Modern Approach. Prentice Hall, 2003.
- [82]. Subercaze, Julien and Maret, Pierre, Programming Semantic Agent for Distributed Knowledge Management, Springer Semantic Agent Systems, pp : 47- 65 (2011)
- [83]. Sunagawa, E., Mizoguchi, R., et ail. (2003). An Environment for Distributed Ontology Development Based on Dependency Management. Paper presented at the International Semantic Web Conference (ISWC), Florida, USA.
- [84]. Sylviane Tabarly, Mégapoles et risques en milieu urbain. L'exemple d'Istanbul.
- [85]. Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications, KNOWLEDGE ACQUISITION, 5:199_220, 1993.
- [86]. Tim Berners-Lee, Le WEB va changer de dimension, L'AVENIR D'INTERNET, N°413, Novembre 2007, La recherche 35.

- [87]. UNISDR-2009, la terminologie de la Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies (UNISDR), version anglaise de la terminologie 2009, www.unisdr.org.
- [88]. Wu Z, Palmer, M. (1994) Verb Semantics and Lexical Selection. In Proc. of the 32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Las Cruces, New Mexico.
- [89]. Y. Fukuda Variations of Knowledge in Information Society, In Proceedings ISMICK 95, p3-8
- [90]. Yariv Aridor, David Carmel, Ronny Lempel, Aya Soffer, and Yoëlle S. Maarek. Knowledge agents on the web. In CIA '00: Proceedings of the 4th International Workshop on Cooperative Information Agents IV, The Future of Information Agents in Cyberspace, pages 15{26, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
- [91]. Youyong Zou, Tim Finin, Li Ding, Harry Chen, and Rong Pan. Using semantic web technology in multi-agent systems: a case study in the taga trading agent environment. In ICEC '03: Proceedings of the 5th international conference on Electronic commerce, pages 95-101, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [92]. Yves Demazeau. VOYELLES. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, Avril 2001.
- [93]. Zacklad M., Grundstein M., Le management des connaissances : modèles d'entreprise et applications, Paris, Hermès Sciences Publications, 2001.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire de compétences

Questionnaire de compétences

NB : Les champs qui ont l'étoile () sont obligatoires.*

Prénom & Nom * :

Titre ou statut * :

Sujet de Thèse :

Mots clés de la thèse :

Laboratoire * :

Equipe * :

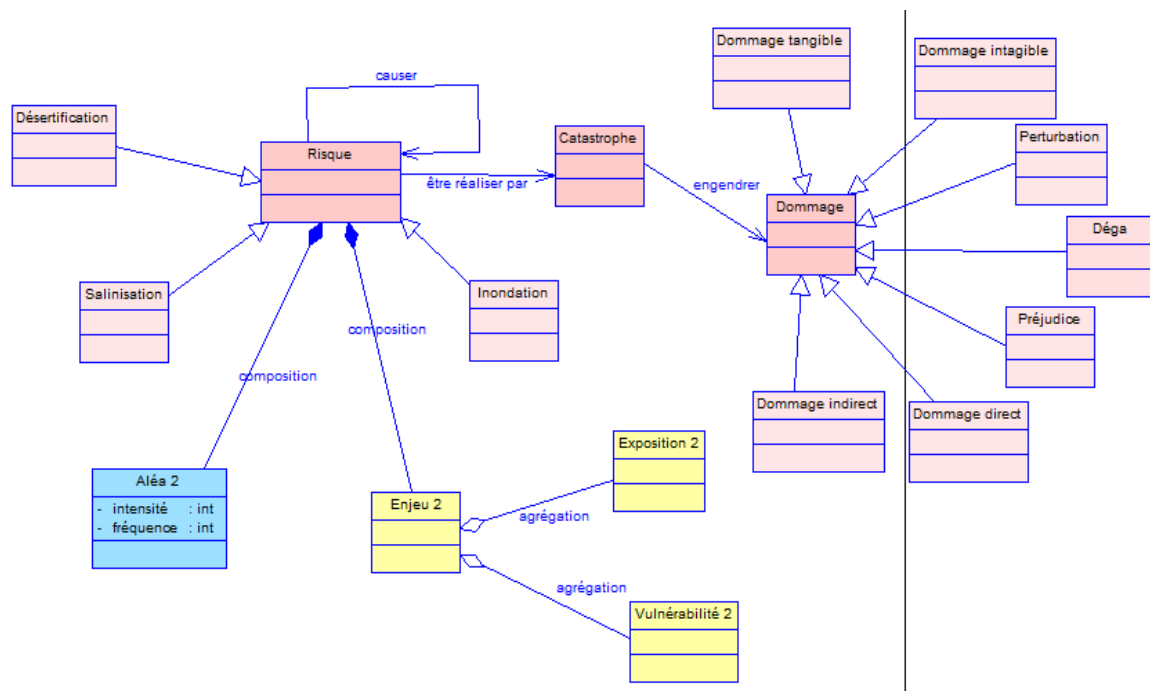
Thématique de recherche * :

NB : Il faut cocher vos thèmes de recherches parmi ceux de la liste.

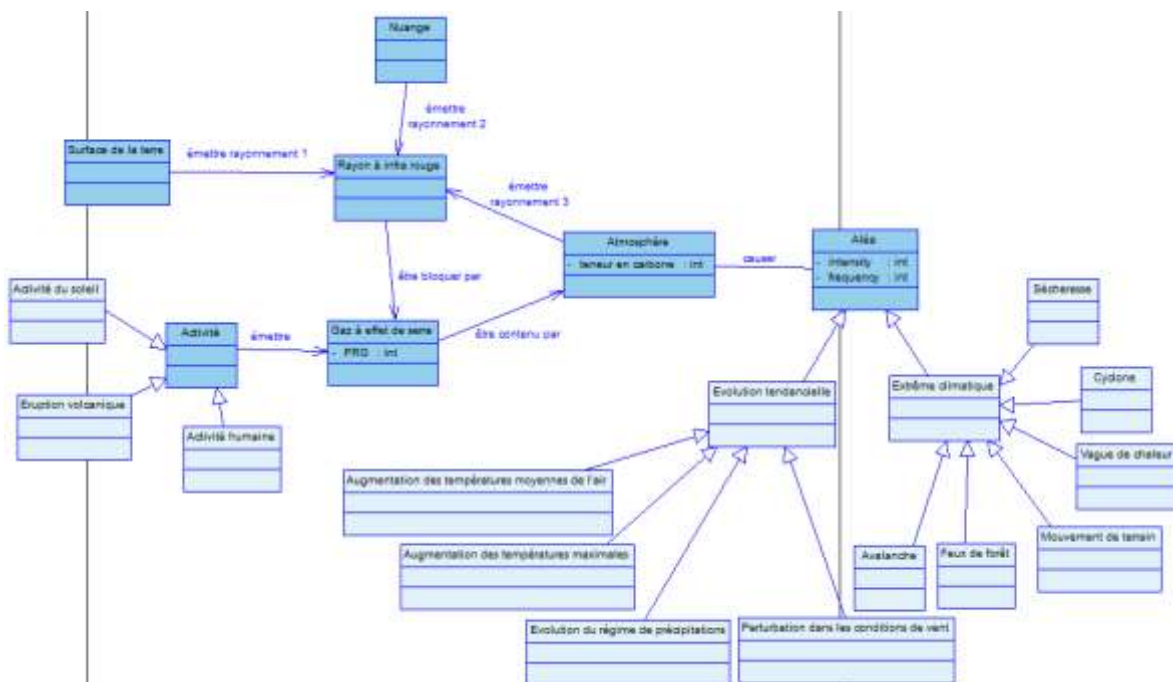
- ☐ Gaz à effet de serre,
- ☐ Aléa,
- ☐ Enjeux,
- ☐ Vulnérabilité,
- ☐ Risque,
- ☐ Dommage,
- ☐ Acteur gouvernance,
- ☐ Instruments de la gouvernance
- ☐ Changement climatique
- ☐ Gouvernance des risques

Vos expériences dans le domaine du changement climatique et de la vulnérabilité urbaine :

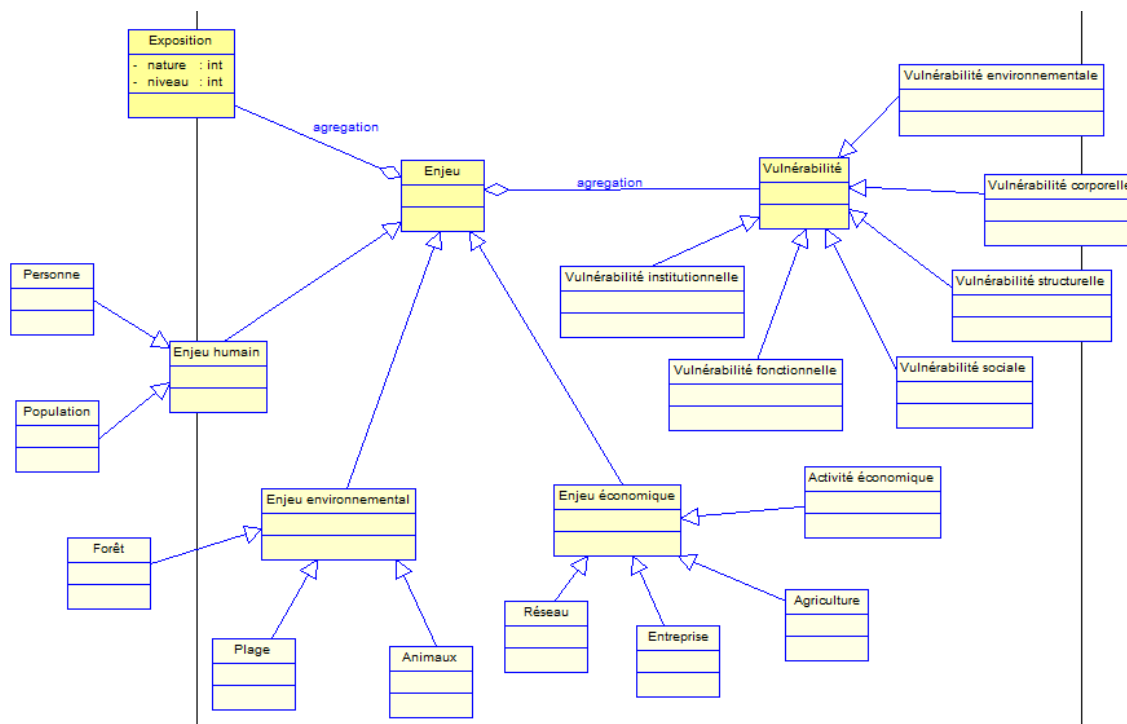
Annexe 2 : Modèle informel du sous domaine Risques et catastrophes



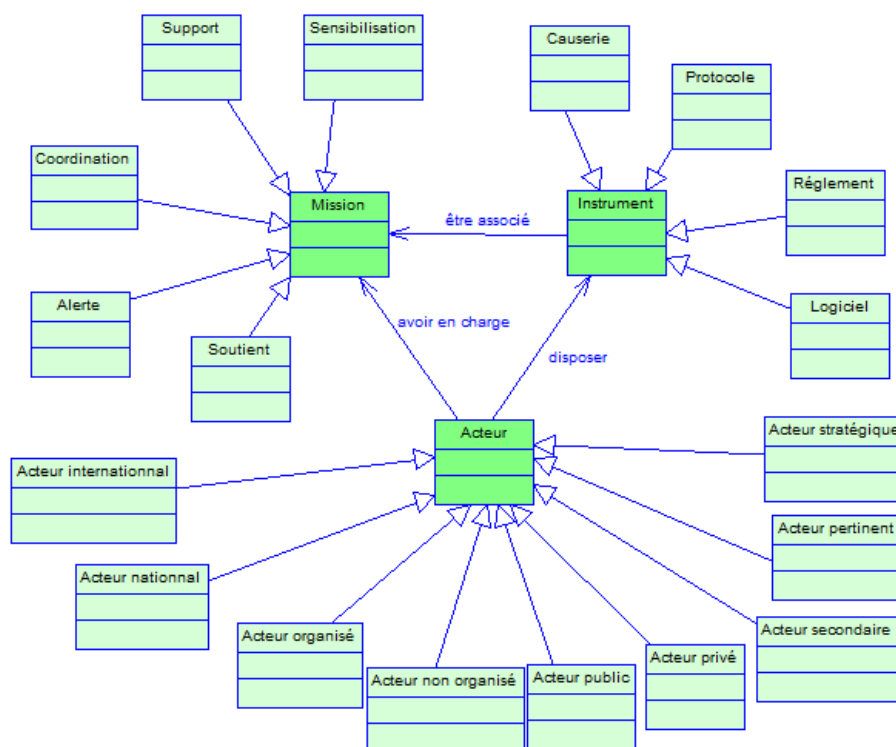
Annexe 3 : Modèle informel du sous domaine changement climatique



Annexe 4 : Modèle informel du sous domaine vulnérabilité urbaine



Annexe 5 : Modèle informel du sous domaine gouvernance



Annexe 6 : Corpus général de ressources terminologiques du domaine du CC.

Références de Ressources terminologiques et ontologiques	Nature	Description
[UNISDR, 2009]	Terminologie	La terminologie de la <i>Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies</i> (UNISDR) a pour but de promouvoir une compréhension et une utilisation communes des concepts de réduction de risques de catastrophe et vise à soutenir les efforts des autorités, des praticiens et du grand public dans ce domaine.
[GIEC bilan 2001]	Rapport d'experts	<i>Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques</i>
[Rapport spécial du GIEC et du GETE]	Rapport d'experts	<i>Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire</i> Questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique
[Géo confiance]	Glossaire	Un glossaire pour questionner, problématiser, identifier et comprendre des mots-clefs.
[Info Resource, 2009]	revues d'articles scientifiques	Revue info Ressource, focus 2/09, <i>Réduction des risques de catastrophe: une approche axée sur l'égalité hommes-femmes et les moyens d'existence.</i>
[GÉORISQUES, 2005]	revues d'articles scientifiques	Ce volume rassemble les contributions présentées lors du séminaire organisé le 8 février 2005 par le laboratoire GESTER et le master professionnel « Gestion des catastrophes et des risques naturels » de l'université Paul-Valéry, et intitulé « <i>La réduction de la vulnérabilité de l'existant face aux menaces naturelles</i> ». Frédéric Leone et Freddy Vinet, maîtres de conférence en géographie à l'université Paul-Valéry de Montpellier, ont coordonné ce volume.
[Adrien Coly, 2011]	Cours	Notes de cours de Master environnement à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar en 2011 du Dr. Adrien COLY sur Les risques naturels (Les risques géomorphologiques - Les risques climatiques et hydrologiques - Les risques sismiques et risques volcaniques).
[Provitolo D. et al., 2009]	Modèle conceptuel	Extraits du modèle conceptuel de l'ontologie du domaine des risques et des catastrophes.