



HAL
open science

Une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise

Walid Bannour

► **To cite this version:**

Walid Bannour. Une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Intelligence artificielle [cs.AI]. Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique Tunis (Tunisie), 2022. Français. NNT : . tel-03848644

HAL Id: tel-03848644

<https://hal.science/tel-03848644>

Submitted on 10 Nov 2022

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

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

UNIVERSITÉ DE LA MANOUBA
ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES DE L'INFORMATIQUE



THÈSE DE DOCTORAT

en vue de l'obtention du titre de docteur en
INFORMATIQUE

Une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise

WALID BANNOUR

SOUTENUE LE 04 JUILLET 2022, DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

NAOUFEL KRAIEM	PROFESSEUR, ISI	PRÉSIDENT
WALID BARHOUMI	PROFESSEUR, ENICARTHAGE	RAPPORTEUR
MAHA KHEMAJA	MAÎTRE DE CONFÉRENCES, ISSATSo	RAPPORTEUR
INES BAYOUDH	MAÎTRE DE CONFÉRENCES, ENSIT	EXAMINATRICE
HENDA BEN GHÉZALA	PROFESSEUR, ENSI	DIRECTRICE DE THÈSE
AHMED MAALEL	MAÎTRE-ASSISTANT, ISSATSo	CO-ENCADRANT

Laboratoire de recherche : recherche en génie logiciel, applications distribuées, systèmes décisionnels et imagerie intelligente (RIADI)

Résumé :

Depuis la nuit des temps, l'Homme a toujours été victime des désastres, que ce soit naturels ou causés par lui-même. En effet, ces catastrophes inévitables engendrent souvent des pertes économiques et sociales importantes. La réponse aux situations de crise demeure, jusqu'à nos jours, une tâche complexe et cruciale et représente un défi majeur pour l'Homme en général et pour les preneurs de décisions d'urgence en particulier. Assister ces derniers à la réponse aux crises par la mise en œuvre d'approches d'aide à la décision est un challenge à relever.

L'objectif de cette thèse est de proposer une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Particulièrement, le but de cette approche est de générer un plan de réponse d'urgence adaptable à une situation de crise courante. L'approche proposée est basée sur un couplage entre les ontologies et le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC). Concernant les ontologies, elles ont servi, entre autres, à la représentation des connaissances liées à la réponse aux crises. Quant au RàPC, qui est une méthodologie de raisonnement par analogie et d'apprentissage issue de l'intelligence artificielle, il a permis la capitalisation des connaissances issues des retours d'expériences des situations antérieures de réponse aux crises. L'intérêt de l'approche proposée réside, non seulement dans l'assistance des gestionnaires de crise dans leur tâche de génération d'une solution de réponse d'urgence, mais aussi dans l'amélioration du cycle de raisonnement.

Mots-clés : Raisonnement à Partir de Cas, Ontologies, Mesures de similarité, Réponse à une crise, Aide à la décision.

Abstract :

Since the beginning of time, Man has always been a victim of natural disasters and those caused by himself. Indeed, these unavoidable disasters often result in significant economic and social losses. Responding to crisis situations remains, until today, a complex and crucial task and represents a major challenge for mankind in general and for emergency decision makers in particular. Assisting them in responding to crises by implementing decision support approaches is a challenge to be met.

The objective of this thesis is to propose a decision support approach for crisis response. In particular, the goal of this approach is to generate an emergency response plan adaptable to a current crisis situation. The proposed approach is based on a coupling between ontologies and Case-Based Reasoning (CBR). The ontologies were used, among other things, to represent the knowledge related to crisis response. As for CBR, which is a methodology of reasoning by analogy and learning derived from artificial intelligence, it has allowed the capitalization of knowledge from the feedback of previous crisis response situations. The interest of the proposed approach lies, not only in assisting crisis managers in their task of generating an emergency response solution, but also in improving the reasoning cycle.

Keywords : Case-based reasoning, Ontologies, Similarity measures, Crisis response, Decision support.

Résumé

Depuis la nuit des temps, l'Homme a toujours été victime des désastres, que ce soit naturels ou causés par lui-même. En effet, ces catastrophes inévitables engendrent souvent des pertes économiques et sociales importantes. La réponse aux situations de crise demeure, jusqu'à nos jours, une tâche complexe et cruciale et représente un défi majeur pour l'Homme en général et pour les preneurs de décisions d'urgence en particulier. Assister ces derniers à la réponse aux crises par la mise en œuvre d'approches d'aide à la décision est un challenge à relever.

L'objectif de cette thèse est de proposer une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Particulièrement, le but de cette approche est de générer un plan de réponse d'urgence adaptable à une situation de crise courante. L'approche proposée est basée sur un couplage entre les ontologies et le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC). Concernant les ontologies, elles ont servi, entre autres, à la représentation des connaissances liées à la réponse aux crises. Quant au RàPC, qui est une méthodologie de raisonnement par analogie et d'apprentissage issue de l'intelligence artificielle, il a permis la capitalisation des connaissances issues des retours d'expériences des situations antérieures de réponse aux crises. L'intérêt de l'approche proposée réside, non seulement dans l'assistance des gestionnaires de crise dans leur tâche de génération d'une solution de réponse d'urgence, mais aussi dans l'amélioration du cycle de raisonnement.

Mots-clés : Raisonnement à Partir de Cas, Ontologies, Mesures de similarité, Réponse à une crise, Aide à la décision.

Abstract

Since the beginning of time, Man has always been a victim of natural disasters and those caused by himself. Indeed, these unavoidable disasters often result in significant economic and social losses. Responding to crisis situations remains, until today, a complex and crucial task and represents a major challenge for mankind in general and for emergency decision makers in particular. Assisting them in responding to crises by implementing decision support approaches is a challenge to be met.

The objective of this thesis is to propose a decision support approach for crisis response. In particular, the goal of this approach is to generate an emergency response plan adaptable to a current crisis situation. The proposed approach is based on a coupling between ontologies and Case-Based Reasoning (CBR). The ontologies were used, among other things, to represent the knowledge related to crisis response. As for CBR, which is a methodology of reasoning by analogy and learning derived from artificial intelligence, it has allowed the capitalization of knowledge from the feedback of previous crisis response situations. The interest of the proposed approach lies, not only in assisting crisis managers in their task of generating an emergency response solution, but also in improving the reasoning cycle.

Keywords : Case-based reasoning, Ontologies, Similarity measures, Crisis response, Decision support.

Dédicaces

*À mes chers parents,
À mon épouse bien aimée,
À mon cher fils tendrement aimé*

Remerciements

C'est avec un immense plaisir et une grande émotion que j'aborde l'écriture des remerciements qui marque la fin de la première étape de mon parcours de recherche et certainement le début d'une autre que j'espère toute aussi fructueuse en résultats et riche en rencontres. Je tiens donc à travers ces lignes à témoigner de ma plus grande reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'achèvement de ce travail.

*En premier lieu, je remercie Monsieur **Naoufel KRAIEM**, Professeur à l'Université de Tunis El Manar, pour avoir bien voulu examiner mon travail et pour l'honneur qu'il a bien voulu m'accorder en acceptant de présider ce jury.*

*Je remercie énormément Monsieur **Walid BARHOUMI**, Professeur à l'Université de Carthage et Madame **Maha KHEMAJA**, Maître de Conférences à l'Université de Sousse, d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.*

*Je remercie vivement Madame **Ines BAYOUDH**, Maître de Conférences à l'Université de Tunis, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de ce jury.*

*Je voudrais adresser mes chaleureux remerciements à ma directrice de thèse Madame **Henda Ben GHÉZALA**, Professeur Émérite à l'Université de Manouba et Directrice du Laboratoire RIADI, qui m'a accompagné de près tout au long de mon parcours de recherche et qui m'a inconditionnellement soutenue dans toutes mes démarches. Je la remercie aussi de m'avoir accordé une grande liberté dans le travail tout en assurant un suivi méticuleux.*

*Je voudrais aussi adresser ma profonde reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à mon cher Co-encadrant Monsieur **Ahmed MAALEL**, Maître Assistant à l'Université de Sousse, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité, son intérêt envers mon travail et surtout pour la confiance qu'il m'a accordée et ses encouragements continus. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude la plus chaleureuse.*

Enfin, je tiens à remercier tous mes ami(e)s proches, mes collègues et toute personne qui m'a soutenu tout au long de mon parcours de recherche.

Table des matières

Introduction générale	1
I Etat de l'art	7
1 La réponse aux crises : contexte et problématiques	9
1.1 Qu'est ce qu'une crise ?	10
1.1.1 Définitions et caractéristiques	10
1.1.2 Types des désastres	12
1.2 La gestion de crise	13
1.2.1 Les phases de la gestion de crise	13
1.3 La phase de réponse à une crise	15
1.3.1 Les parties prenantes dans un scénario de crise	15
1.3.2 Prise de décision en situation de crise	17
1.3.3 La tâche de réponse au niveau de la cellule de crise	19
1.4 Vers une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise	21
1.4.1 Enjeux liés à la réponse à une crise	21
1.4.2 Travaux connexes d'aide à la décision pour la réponse à une crise	23
1.4.3 Vers un choix	26

2 Les ontologies	29
2.1 Les ontologies	30
2.1.1 Généralités	30
2.1.2 Composantes d'une ontologie	32
2.1.3 Classifications des ontologies	33
2.1.4 Ingénierie d'ontologie	34
2.1.5 Similarité sémantique entre concepts	44
2.2 Ontologies pour la représentation des situations de crise	47
2.2.1 Travaux connexes	47
2.2.2 Synthèse de l'analyse bibliographique	50
3 Le raisonnement à partir de cas	54
3.1 Le raisonnement à partir de cas	55
3.1.1 Généralités	55
3.1.2 Composantes du RàPC	58
3.1.3 Représentation de cas	60
3.1.4 Cycle du RàPC	60
3.1.5 Mesures de similarité	64
3.1.6 Rôles des ontologies dans un processus de RàPC	66
3.2 Approches à base de RàPC pour la réponse à une crise	66
3.2.1 Méthode de recherche	66
3.2.2 Travaux connexes	67
3.2.3 Synthèse	69
3.2.4 Limites des travaux examinés	71
II Approche proposée	75
4 Une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise	77
4.1 Architecture globale de l'approche proposée	78

4.1.1	Collecte collaborative des données situationnelles de crise	79
4.1.2	Élaboration du cas cible	79
4.1.3	Raisonnement	81
4.2	Modélisation ontologique des situations de réponse à une crise	82
4.2.1	Présentation	82
4.2.2	Processus de développement de l'ontologie	82
4.3	Raisonnement à partir de cas pour la réponse à une crise	94
4.3.1	Représentation de cas de réponse à une crise	95
4.3.2	Recherche de cas	97
4.3.3	Adaptation de cas	104
4.3.4	Révision et apprentissage	106
5	Expérimentation et évaluation	109
5.1	Construction de la base de cas	110
5.1.1	Sources des cas	110
5.1.2	Instanciation de l'ontologie de la base de cas	111
5.2	Étude de cas	112
5.2.1	Collecte des données de crise	113
5.2.2	Élaboration du cas cible	113
5.2.3	Cycle de RàPC	115
5.3	Évaluation de l'approche proposée	123
5.3.1	Analyse comparative avec une méthode existante de recherche de cas similaires	124
5.3.2	Interprétation des résultats d'intégration de la CPT dans la méthode de recherche de cas similaires	126
	Conclusions et perspectives	129
	Bibliographie	134

Table des figures

1.1	Les phases de la gestion de crise, adaptée de (Vivacqua et Borges, 2012)	16
1.2	Scénario de réponse à une crise, adaptée de (Fogli et Guida, 2013)	17
1.3	Framework général du processus de prise de décision, adaptée de (Lu et Ruan, 2007)	19
1.4	Carte conceptuelle illustrant le soutien des types de connaissances durant la phase de réponse à une crise, adaptée de (Diniz <i>et al.</i> , 2005)	21
2.1	Procédure de conception et d'évaluation d'ontologie (Grüninger et Fox, 1995)	38
2.2	Méthodologie de construction d'ontologies proposée par (Uschold et King, 1995; Uschold et Gruninger, 1996)	39
2.3	La méthodologie de construction d'ontologies METHONTOLOGY (Fernández-López <i>et al.</i> , 1997; Gomez-Perez <i>et al.</i> , 2004)	40
2.4	La méthodologie de développement d'ontologies On-To-Knowledge (Staab <i>et al.</i> , 2001)	41
2.5	Pile de langages de balisage d'ontologie, adapté de (Corcho <i>et al.</i> , 2003)	42
3.1	Conteneurs de connaissances, adapté de (Richter et Weber, 2016; Stahl, 2003)	59
3.2	Cycle du raisonnement à partir de cas, adapté de (Aamodt et Plaza, 1994)	61
3.3	Approches de recherche de cas	62
3.4	Vu d'ensemble sur les approches basiques d'adaptation, adapté de (Aamodt et Plaza, 1994; Wilke et Bergmann, 1998)	63
4.1	Architecture globale de notre approche à base de RàPC et d'ontologie	80

4.2	Processus de développement et d'évaluation d'ontologies, adapté de (Haghighi <i>et al.</i> , 2013)	83
4.3	Représentation des caractéristiques d'une crise	86
4.4	Exemple de représentation des caractéristiques d'une crise	88
4.5	Représentation des impacts d'une crise	90
4.6	Exemple de représentation des impacts d'une crise	91
4.7	Représentation de la réponse à une crise	92
4.8	Exemple de représentation de la réponse à une crise	94
4.9	Critères d'évaluation de l'ontologie <i>CROnto</i>	95
4.10	Le cycle RàPC de notre approche proposée	96
4.11	Un extrait de l'ontologie de la base de cas	97
4.12	Méthode proposée pour la recherche de cas similaires	99
4.13	Processus d'adaptation d'une solution de réponse à une crise	105
4.14	Modèle ontologique du plan stratégique initial de réponse	106
4.15	Modèle ontologique du plan stratégique de réponse adapté	107
4.16	Processus de révision et d'apprentissage	107
5.1	Processus adopté pour la construction de la base de cas	111
5.2	Échantillon d'apprentissage collecté	112
5.3	Exemple de cas historique de crise stocké dans la base de cas	112
5.4	Solution de l'exemple du cas historique	113
5.5	Maquette de l'application mobile de collecte des données de crise d'inondation	114
5.6	Le modèle ontologique instancié de la solution récupérée du cas le plus similaire <i>HC₁</i>	120
5.7	Le modèle ontologique instancié de la solution adaptée	123
5.8	Illustration graphique des similarités obtenues par notre méthode et par la méthode de (Fan <i>et al.</i> , 2014)	125

Liste des tableaux

1.1	Types des désastres (Shaluf, 2007a; Guha-Sapir <i>et al.</i> , 2015)	14
2.1	Types d'ontologies (Gomez-Perez <i>et al.</i> , 2004)	35
2.2	Ontologies pour la représentation des situations de crise	51
3.1	Objectifs et contextes d'application des systèmes à base de RàPC pour la réponse à une crise	70
3.2	Méthodes et techniques utilisées dans les phases de représentation, de recherche et d'adaptation des cas	72
4.1	Liste des concepts extraits d'ontologies et de méta-modèles existants	84
4.2	Un extrait de relations entre concepts de l'ontologie CROnto	85
4.3	Un extrait des propriétés de données	87
4.4	Les relations entre les classes relatives à la représentation de la réponse à une crise	93
5.1	Détails sur les attributs d'évènement de crise	115
5.2	Valeurs des attributs d'évènement de crise	115
5.3	Résultats de calcul des similarités syntaxiques locales et globales des évènements de crise	117
5.4	Variables linguistiques floues de l'attribut f_3 et les nombres triangulaires flous correspondants	118
5.5	Résultats de calcul des similarités locales et globales des évènements de crise en utilisant la mesure de similarité à base de la théorie des perspectives cumulées	119

5.6	Résultats de calcul des similarités globales d'évènements de crise	120
5.7	Résultats de calcul des similarités sémantiques locales et globales des impacts de crise	121
5.8	Similarités des cas historiques et leurs rangs correspondants selon notre méthode de recherche de cas similaires	124
5.9	Similarités des cas historiques et leurs rangs correspondants selon la méthode de (Fan <i>et al.</i> , 2014)	125
5.10	Similarités d'évènement de crise des cas historiques et leurs rangs correspondants sans intégration de la CPT	126
5.11	Similarités d'évènement de crise des cas historiques et leurs rangs correspondants avec intégration de la CPT	127

Introduction générale

Contexte de l'étude

Les catastrophes, que ce soit naturelles ou causées par l'Homme, ont des impacts négatifs sur l'économie et la société, causant de multiples pertes humaines (morts, blessés et perdues) et des dommages aux biens et aux infrastructures. Prenons l'exemple de l'ouragan Irma qui a frappé les îles des Caraïbes et le sud des États-Unis le 30 août 2017, entraînant 133 décès (45 décès directs et 88 décès indirects) et des milliards de dollars de pertes économiques selon le « National Hurricane Center » (Cangialosi *et al.*, 2018). Ajoutons la crise sanitaire de COVID-19 qui a entraîné la mort de plus de 6 millions de personnes dans le monde entier¹. Ainsi, gérer ces situations critiques pour réduire les impacts de la crise et sauver les vies des gens est crucial et reste un défi pour notre communauté et pour les gestionnaires de crise en particulier.

La gestion de crise peut être définie comme étant une tâche complexe, à multiples facettes, et qui implique différentes activités de gestion exécutées par les gestionnaires des urgences et les parties prenantes. Ses objectifs incluent la prévention de la survenance d'événements catastrophiques imprévus, le contrôle des dommages sociaux et des pertes économiques et l'élimination des impacts causés par des événements désastreux (Chen *et al.*, 2017). En effet, la gestion de crise peut être vue comme un cycle composé de quatre phases : la prévention, la préparation, la réponse et le rétablissement (Vivacqua et Borges, 2012). Le but de la phase de prévention est de réduire la vulnérabilité d'une population et de diminuer les impacts nocifs des futurs désastres. La phase de préparation vise à augmenter la capacité de réponse chez les acteurs impliqués dans une situation de crise. L'objectif de la phase de réponse est de sauver les vies des gens, protéger les biens et éviter des pertes économiques majeurs et les problèmes environnementaux qui peuvent en survenir. La phase de rétablissement sert à ramener la communauté victime d'un désastre à un niveau normal de fonctionnement.

La phase de réponse à une crise est considérée comme étant la phase la plus complexe, ainsi, la plus étudiée. Elle inclut plusieurs tâches critiques à savoir la génération d'un plan de réponse d'urgence adaptable à la situation de crise actuelle, l'évaluation des risques émergents, l'assistance médicale, la mobilisation des ressources d'urgence et les opérations de secours et de sauvetage (évacuation, recherche des victimes, etc.). Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans cette phase, et plus spécifiquement, dans la tâche de proposition d'un plan de réponse d'urgence. Notons que cette tâche est la responsabilité des gestionnaires de crise qui travaillent dans la cellule de crise.

L'objectif de cette thèse est de proposer une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Plus spécifiquement, notre approche envisagée a pour but de générer un plan de réponse d'urgence adaptable à la situation de crise actuelle. Dans ce cadre, une étude de la littérature a montré que différentes technologies d'intelligence artificielle (IA) ont été utilisées pour aider les gestionnaires de crise à générer un plan de réponse adaptable à une situation de crise. Parmi ces techniques, nous nous trouvons les cartes cognitives floues (De Maio *et al.*, 2011), la logique non-axiomatique (Slam *et al.*, 2015), les techniques issues de la recherche d'information (Ni *et al.*, 2020) et le raisonnement à partir de cas (RàPC) (Yu *et al.*, 2020b; Amailef et Lu, 2013). En outre, notre étude de la littérature a indiqué l'utilisation de divers formalismes de représentation de connaissances pour représenter les connaissances liées aux situations de réponse à une crise,

1. World Health Organisation : <https://covid19.who.int/>

comme les Frames (Zhang *et al.*, 2015a; Liao *et al.*, 2012) et les ontologies (Santos *et al.*, 2019; Kontopoulos *et al.*, 2018; Haghghi *et al.*, 2013).

Notre analyse a débouché sur l'utilisation des ontologies et le RàPC (Kolodner, 1993) pour développer notre approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Nous avons choisi les ontologies pour la représentation des connaissances de réponse aux crises car elles permettent, entre autres, d'éliminer les problèmes d'interopérabilité sémantique engendrés par la diversité et l'hétérogénéité du vocabulaire des différents acteurs impliqués dans la réponse à une crise (Pompier, Police, SAMU, etc.). Nous avons choisi le RàPC comme méthodologie de raisonnement sur les connaissances capitalisées car les tâches des gestionnaires de crise, à savoir la proposition d'un plan de réponse à une situation de crise, sont généralement axées sur les connaissances et les expériences acquises depuis des situations d'urgence antérieures (Fogli et Guida, 2013; Zhang *et al.*, 2002). Le RàPC est un paradigme de résolution de problèmes qui utilise les connaissances et les expériences acquises dans des situations problématiques antérieures et les réutilise pour résoudre de nouvelles situations similaires. Il imite le processus de raisonnement humain pour résoudre les problèmes et a une capacité d'auto-apprentissage en accumulant l'expérience passée (Relich et Pawlewski, 2018). Par rapport à d'autres techniques de résolution de problèmes (par exemple, le raisonnement à base de règles), le RàPC a l'avantage de capitaliser l'expérience acquise dans les situations problématiques antérieures (Zhang *et al.*, 2018a).

Problématique

La problématique soulevée dans notre projet de thèse peut être examinée selon deux perspectives : de point de vue applicatif et de point de vue théorique.

Problématique applicative

Afin de faire face à une situation de crise, des intervenants, issus de différentes organisations et situés sur le champ de la crise, collectent les données situationnelles de crise et les communiquent à la cellule de crise. Ici, le preneur de décisions d'urgence, souvent envahi par le stress et la pression du temps et doté d'une rationalité limitée dans telles conditions, exploitent les connaissances contextuelles de la situation de crise courante ainsi que ses connaissances personnelles (expertise) et propose un plan de réponse d'urgence adaptable à la crise courante.

Par conséquent et de point de vue applicatif, la problématique posée dans notre projet de thèse se rapporte, d'une part, sur la représentation des connaissances liées au domaine de réponse à une crise et, d'autre part, sur le raisonnement sur ces connaissances en vue de générer une solution de réponse adaptable à la situation de crise courante. Trois enjeux sont évoqués ici :

- Comment modéliser les situations de réponse à une crise et appréhender les problèmes d'interopérabilité sémantique ?
- Comment exploiter ces connaissances afin de générer un plan de réponse adaptable à la situation de crise courante ?

- Comment prendre en compte l'état psychologique du preneur de décisions d'urgence dans le processus de raisonnement ?

Problématique théorique

Notre problématique théorique concerne certains aspects relatifs aux ontologies pour la représentation des connaissances et au RàPC pour le raisonnement. Concernant le modèle ontologique envisagé, nous avons posé la question de recherche suivante : Quels sont les aspects clés du domaine de réponse à une crise que notre ontologie doit couvrir ?

Concernant le raisonnement à l'aide du RàPC, la recherche des cas similaires et la prise en compte du comportement psychologique du gestionnaire de crise dans le processus de raisonnement ont principalement constitué l'objet de notre réflexion. Nous avons ainsi posé les questions suivantes :

- Comment améliorer l'étape de recherche de cas similaires ? Quelles sont les mesures de similarité à utiliser et pourquoi ?
- Comment modéliser le comportement psychologique du preneur de décision d'urgence et intégrer ce modèle dans le processus de raisonnement ?

Contributions de la thèse

Notre approche proposée d'aide à la décision permet de capitaliser les connaissances et les expériences de réponse aux crises et de les exploiter en vue de proposer un plan de réponse d'urgence adaptable à une situation de crise. Notre approche a permis non seulement d'améliorer la façon traditionnelle de gestion de crise, mais aussi de contribuer à l'état d'art des approches à base de RàPC.

Les principales contributions de notre projet de thèse sont résumés ci-dessous :

- Proposition d'une ontologie pour la représentation des connaissances liées aux situations de réponse à une crise : nous nous sommes basés sur une étude bibliographique exhaustive des ontologies proposées dans la littérature pour bâtir notre modèle ontologique. Ce dernier couvre les aspects clés du domaine de réponse à une crise.
- Exploitation de l'ontologie proposée dans toutes les phases du cycle du RàPC : toutes les avantages qu'une ontologie puisse apporter à une approche à base de RàPC ont été atteints. En effet, notre ontologie proposée a été utilisée dans la représentation d'un cas de réponse à une crise (en utilisant son vocabulaire), la définition du vocabulaire du cas cible (en utilisant sa terminologie), le calcul de la similarité sémantique au niveau de la recherche des cas similaires et le stockage des cas historiques.
- Amélioration de la phase de recherche de cas similaires : ceci est concrétisé la proposition d'une méthode de recherche de cas similaires à deux étapes qui utilise une combinaison de mesures de similarité. Plus spécifiquement, la première étape consiste à récupérer les cas potentiellement similaires suite à une comparaison des événements de crise entre un

cas cible et un cas historique. Cette étape de recherche utilise principalement des mesures de similarité syntaxique. La deuxième étape consiste à récupérer les cas les plus similaires à partir de l'ensemble des cas potentiellement similaires (obtenu dans la première étape) et ce, suite à une comparaison des impacts de crise. Cette étape de recherche utilise des mesures de similarité sémantique. L'avantage majeur de cet algorithme de recherche est de réduire le laps de temps nécessaire pour récupérer des cas similaires.

- Prise en compte du comportement psychologique du preneur de décisions d'urgence : les questionnaires de crise sont souvent envahis par le stress, la pression du temps et l'incertitude dans leur travail. Sous telles circonstances, les preneurs de décisions d'urgence sont souvent dotés d'une rationalité limitée, une aversion au risque et une dépendance envers un point de référence (Wang *et al.*, 2017). Ceci pourrait affecter leurs décisions cruciales. Dans cette présente étude, nous avons proposé d'intégrer la théorie des perspectives cumulées (CPT) (Tversky et Kahneman, 1992), qui est un modèle descriptif de prise de décision dans des conditions de risque, dans notre approche d'aide à la décision à base de RàPC, et plus précisément, dans la phase de recherche de cas similaires. L'évaluation de notre approche d'aide à la décision a montré que l'incorporation de la CPT au sein du processus d'évaluation de la similarité de cas a pu améliorer la précision et l'efficacité de l'étape de recherche de cas similaires.

Organisation du manuscrit

Le présent mémoire de thèse est composé de cinq chapitres. Le **premier chapitre**, par une étude exhaustive des concepts de base de notre contexte d'application ainsi qu'une étude bibliographique pour pouvoir aboutir à nos choix méthodologiques. Nous allons tout d'abord explorer les notions de crise, gestion de crise et réponse à une crise dans un ordre décroissant du général au plus spécifique. Ensuite, nous allons examiner les approches existantes ayant pour but la capitalisation des connaissances de réponse à une crise. Par la suite, nous allons étudier les méthodologies et les techniques utilisées pour la génération d'un plan de réponse d'urgence à une crise. Enfin, nous allons décrire nos choix méthodologiques.

Ayant sélectionné les méthodologies sur lesquelles notre approche est bâtie, nous allons conduire dans le **deuxième chapitre** une étude bibliographique exhaustive sur les ontologies. Cette étude va toucher, en premier lieu, les ontologies en tant qu'un formalisme de représentation des connaissances et, en deuxième lieu, les ontologies existantes dans la littérature ayant représenté les situations de crise. Cette analyse bibliographique va déboucher sur une synthèse complète des travaux réalisés afin de pouvoir identifier les principales insuffisances.

Dans le **troisième chapitre**, nous allons établir un état de l'art sur le RàPC. Plus spécifiquement, nous allons, tout d'abord, présenter les principaux concepts de base qui tournent autour de cette méthodologie de raisonnement (composantes, cycle de raisonnement, mesures de similarité, etc.). Par la suite, nous allons établir une étude de la littérature des approches à base de RàPC existantes ayant pour but la réponse à une crise. Cette étude bibliographique va être conclue par une analyse synthétique des travaux connexes ainsi qu'un recensement de leurs limites.

Dans le **quatrième chapitre**, nous allons présenter notre approche d'aide à la décision à base de RàPC et d'ontologie. En particulier, nous allons, tout d'abord, présenter l'architecture globale de l'approche proposée illustrée en trois principales étapes, à savoir, la collecte collaborative des données situationnelles de crise, l'élaboration du problème cible et le raisonnement. Par la suite, nous allons exposer notre modèle ontologique permettant de représenter les connaissances liées aux situations de réponse à une crise. Enfin, nous allons décrire comment un cas de réponse à une crise est représenté et nous allons détailler chacun des phases du cycle de RàPC.

Au sein du **cinquième chapitre**, nous allons présenter notre approche d'expérimentation et d'évaluation. Concernant l'étape d'expérimentation, nous allons tout d'abord décrire le processus de construction de la base de cas. Ensuite, nous allons mener une étude de cas réel de crise d'inondation afin d'étudier la faisabilité et l'applicabilité de notre approche proposée d'aide à la décision. Concernant l'étape d'évaluation, nous allons conduire, en premier lieu, une étude comparative entre notre méthode de recherche de cas similaires et une autre issue de la littérature afin de vérifier la validité de l'approche proposée. Dans le but de vérifier l'efficacité de notre approche, nous allons mener, en deuxième lieu, une interprétation des résultats d'intégration de la CPT au sein de l'étape de l'évaluation de la similarité de cas.

Première partie

Etat de l'art

Chapitre 1

La réponse aux crises : contexte et problématiques

Sommaire

1.1	Qu'est ce qu'une crise?	10
1.1.1	Définitions et caractéristiques	10
1.1.2	Types des désastres	12
1.2	La gestion de crise	13
1.2.1	Les phases de la gestion de crise	13
1.3	La phase de réponse à une crise	15
1.3.1	Les parties prenantes dans un scénario de crise	15
1.3.2	Prise de décision en situation de crise	17
1.3.3	La tâche de réponse au niveau de la cellule de crise	19
1.4	Vers une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise	21
1.4.1	Enjeux liés à la réponse à une crise	21
1.4.2	Travaux connexes d'aide à la décision pour la réponse à une crise	23
1.4.3	Vers un choix	26

Introduction

Les crises font partie des caractéristiques de notre société. Aucun pays dans ce monde n'est épargné des désastres, des calamités, des conflits, des attaques terroristes et des épidémies (Rosenthal *et al.*, 2001). Par conséquent, toute crise doit être gérée pour freiner les pertes engendrées et assurer un retour à la situation normale du fonctionnement d'un écosystème. Néanmoins, la réponse aux crises n'est sans doute une tâche facile à réaliser. Elle est plutôt une tâche complexe qui inclut plusieurs enjeux et problématiques. Cela a attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans le monde, qui n'ont pas cessé jusqu'à présent de proposer des approches d'aide à la décision pour la réponse aux crises.

Dans ce premier chapitre, nous allons tout d'abord présenter le contexte général de notre étude. Plus spécifiquement, nous allons introduire en premier lieu le concept de « crise », ses caractéristiques et ses types recensés de la littérature. En deuxième lieu, nous allons décrire le concept de « la gestion de crise » et présenter ses quatre phases. Visant à mettre en relief la phase de la réponse à une crise, celle-ci constitue la troisième section du chapitre. Enfin, afin de mieux positionner nos travaux de recherche, nous allons présenter les problématiques auxquelles cette thèse essaie de répondre, ainsi que des travaux connexes existants dans la littérature qui ont essayé d'atteindre les mêmes objectifs. Cette première étude de la littérature nous permettra de sélectionner la voie à suivre pour une étude plus approfondie vers la proposition d'une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise.

1.1 Qu'est ce qu'une crise ?

Le terme « crise » est généralement employé pour désigner des situations indésirables, inattendues, sans précédent et presque ingérables (Hewitt, 1983) (cité dans (Rosenthal *et al.*, 2001)). Plus de détails concernant la notion de crise est donnée dans cette section.

1.1.1 Définitions et caractéristiques

La notion de crise est devenue courant au vingtième siècle et a touché tous les horizons de la conscience contemporaine (Morin, 1976). En effet, le terme « crise » est devenu populaire et son utilisation est devenue fréquente dans une large variété de contextes et de disciplines, en l'occurrence, la sociologie des catastrophes, l'administration publique, les sciences politiques et relations internationales et les technologies d'information) (Boin, 2004). Bien que le terme « crise » soit largement répandu, il manque un consensus sur sa définition (Mitroff *et al.*, 1996; Lagadec et Guilhou, 2002; Boin, 2004). Ceci peut être dû à la diversité des perspectives des chercheurs issues de plusieurs disciplines à savoir l'économie, la santé, le droit, la psychologie, etc. (Boin, 2004).

Plusieurs propositions de définition de la crise ont été évoquées dans la littérature en vue de cerner et de définir ce phénomène. Ainsi pour (Hermann *et al.*, 1972), une crise est « une situation qui menace les objectifs hautement prioritaires de l'unité décisionnelle, limite le temps disponible

pour réagir et surprendre les membres de l'unité décisionnelle par sa survenance. ». (Morin, 1976) de son côté, ajoute que la crise est un moment de perturbation où émergent les incertitudes. De même pour (Dutton, 1986) et (Quarantelli, 1988) qui insistent sur le caractère ambiguë de la situation de crise. Quant à (Lagadec et Guilhou, 2002), ils soulignent que la crise est « l'urgence plus la déstabilisation » et qui combine l'envahissement des difficultés, le désordre dans le fonctionnement des organisations et l'écartement dans les choix fondamentaux. Dans (Boin *et al.*, 2005), les crises sont considérées comme étant des phases transitoires au cours desquelles les gens font face à une menace urgente qui doit être traitée par les preneurs de décisions.

Une autre définition plus précise et plus englobante de la crise a été proposée par (Rosenthal *et al.*, 1989) : « Une menace sérieuse pour les structures de base ou les valeurs et les normes fondamentales d'un système social qui, sous la pression du temps et la grande incertitude des circonstances, nécessite des décisions cruciales ». Selon (Boin et 'T Hart, 2007), le grand avantage de cette définition est qu'elle peut être appliquée à tous les types de perturbations à savoir les désastres naturels, les adversités économiques, les émeutes, etc. En outre, trois éléments clés constituent cette définition à savoir la *menace*, l'*urgence* et l'*incertitude*. Ces composants caractérisent toute situation de crise (Rosenthal *et al.*, 2001). Nous détaillons dans ce qui suit ces caractéristiques.

- *Menace*. Nous parlons d'une crise lorsque les valeurs fondamentales partagées entre les individus d'une communauté sont menacés. Par exemple, lorsque la sûreté, la sécurité, le bien-être, la santé, l'intégrité ou l'équité entre des individus deviennent fragiles ou presque absents à cause des dommages et des destructions ou toute autre sorte d'adversité entraînée par un désastre (Boin et 'T Hart, 2007). Selon (Raphael, 1986), les désastres naturels comme les inondations, les tremblements de terres, etc. donnent souvent un sens plus profond à la crise étant donné que la menace de la mort, de destruction ou de mutilation touche énormément aux valeurs de sûreté et de sécurité d'un individu et de ses bien aimés.
- *Urgence*. Nous ne pouvons pas parler d'une situation de crise si les problèmes posés par des menaces sérieuses ne sont pas immédiats et leur traitement peut être effectué ultérieurement, manquant ainsi tout aspect d'urgence. Prenons l'exemple de la menace du changement climatique : les problèmes y rapportés ne constituent pas une priorité chez les preneurs de décision (décideurs politiques) car ils sont considérés comme étant des problèmes à long terme qui peuvent être traités hors du cercle de l'urgence (Boin et 'T Hart, 2007). La pression du temps est un élément indispensable dans une situation de crise où les décisions se rapportent à des questions de vie ou de mort. Ces décisions doivent être prises dans un intervalle de temps limité et réduit en quelques heures ou quelques minutes voire en quelques secondes (Boin *et al.*, 2005).
- *Incertitude*. Les situations de crise dotent souvent d'un sens élevé d'incertitude. Cette incertitude touche plusieurs éléments de la situation de crise à savoir la nature de la menace (qu'est ce qui s'est passé exactement et comment on est arrivé à cet état?), ses conséquences et les risques qui s'y rapportent (quel est le degré de gravité et de complexité de la situation?) et les actions à prendre pour répondre à cette crise (Comment doit-on agir et qu'est ce qu'il va se passer si on choisit cette option?) (Boin *et al.*, 2005; Boin et 'T Hart, 2007). En effet, une crise est loin d'être une situation normale routinière à gérer. Elle perturbe les régularités rendant ainsi les points de références et les règles de base presque inutiles voire contreproductifs (Rosenthal *et al.*, 2001). Cette perturbation, nourrie par l'aspect de « surprise » ou de « soudaineté » mais aussi par le manque d'informations

sur la situation courante, implique une perte d'orientation et augmente le degré d'incertitude chez les preneurs de décision (Rosenthal *et al.*, 2001).

Dans la littérature, nous avons détecté que le terme « Désastre » (en anglais *Disaster*) est souvent utilisé pour désigner une « crise ». En fait, ces deux termes sont souvent utilisés de manière synonyme et interchangeable. En revanche, dans un discours académique, ces deux concepts font référence à deux situations différentes, mais en même temps sont liées (Shaluf *et al.*, 2003; Boin et 'T Hart, 2007). Nous avons identifié des études comparatives dans lesquelles les auteurs essaient de cerner les concepts de crise et de désastre et de déterminer la relation entre eux (Shaluf *et al.*, 2003; Boin *et al.*, 2005; Boin et 'T Hart, 2007; Al-Dahash *et al.*, 2016). Cette relation a fait l'objet d'une divergence entre plusieurs chercheurs. Certains d'entre eux défendent l'idée que le désastre est plus global que la crise. En d'autres termes, ils affirment que si une crise a été mal gérée ou bien négligée, elle se transformera en un désastre (Davies et Megan, 1998; Boin *et al.*, 2005; Boin et 'T Hart, 2007; Al-Dahash *et al.*, 2016). Par contre, d'autres chercheurs soutiennent l'idée que le désastre est juste un agent de la crise (Shrivastava *et al.*, 1988; Shaluf *et al.*, 2003). En fait, un désastre est largement défini dans la littérature comme étant un événement soudain, imprévu et inhabituel ayant des causes naturelles, technologiques ou sociales, qui entraîne des dommages et des destructions massifs, des pertes économiques et plusieurs victimes (morts et blessés) et qui, temporairement, dépasse les capacités locales de réponse (Parker, 1992; Perry et Quarantelli, 2005). Suite à cette définition, plusieurs points communs entre une crise et un désastre peuvent être identifiés à savoir la nature soudaine de l'évènement majeur, les dommages et les victimes engendrés et la nécessité de prise de décisions cruciales pour atténuer les impacts et sauver les vies des individus (Al-Dahash *et al.*, 2016).

À la lumière des éléments mentionnés ci-dessus et pour ne pas tomber dans des détails loin d'être pertinents pour notre thèse, nous allons utiliser les termes « crise » et « désastre » d'une manière synonyme et interchangeable. En outre, nous considérons qu'une situation de crise est une situation générée suite à un évènement catastrophique (ou plusieurs évènements) qui engendre des impacts à savoir des dommages et des victimes, nécessitant ainsi des mesures de réponse afin de sauver les vies des gens et de limiter les pertes économiques.

1.1.2 Types des désastres

La détermination des types de désastres a fait l'objet de recherche chez plusieurs académiciens (Hood et Jackson, 1992; Turner et Pidgeon, 1997; Haddow *et al.*, 2017), centres de recherche tel que *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)* (Guha-Sapir *et al.*, 2015) et organisations mondiales, en l'occurrence, *WHO (World Health Organization, 2020)* et *IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2020)*. Ainsi, plusieurs classifications de désastres ont été proposées et de diverses terminologies ont été employées pour désigner ces classes. Dans (Shaluf, 2007a), l'auteur a examiné minutieusement les classifications des désastres proposées dans la littérature et a conclu que les désastres peuvent être classés en trois types (voir tableau 1.1) :

- *Naturel*. Les désastres naturels sont des évènements catastrophiques qui résultent de causes naturelles et sont souvent considérés comme étant des « actes de Dieu », signifiant ainsi

qu'ils sont incontrôlables et inévitables (Hood et Jackson, 1992). Il est à noter que nous avons utilisé la catégorisation proposée par la base de données internationale des désastres *EM-DAT* (Guha-Sapir *et al.*, 2015) pour la production des sous-classes des désastres naturels. Comme le montre le tableau 1.1, les désastres naturels distinguent six catégories. Chacune d'elle comprend un nombre de désastres à savoir les inondations pour la catégorie « Hydrologique » et les tremblements de terre pour la catégorie « Géophysique ». Plus de détails sur les désastres naturels peuvent être consultés dans (Shaluf, 2007b; Carter, 2008).

- *Causé par l'Homme*. Les désastres causés par l'Homme sont des événements catastrophiques qui résultent des décisions humaines. Ils se distinguent en 2 larges groupes : socio-technique et guerre. Selon (Shaluf, 2007a), les désastres socio-techniques, appelés aussi désastres surprenants causés par l'Homme, sont subdivisés en quatre catégories comme le montre le tableau 1.1. Parmi eux, la catégorie « Technologique » par exemple, fait référence aux accidents industriels qui sont souvent dûs à des erreurs humaines, organisationnelles et technologiques (Shaluf, 2007c). Concernant les désastres de guerre, appelés aussi désastres à long terme causés par l'Homme, incluent tout conflit entre pays, communautés et les actes terroristes.
- *Hybride*. Les désastres hybrides résultent à la fois d'un désastre naturel et d'un autre causé par l'Homme. En plus de l'exemple mentionné dans le tableau 1.1, nous mentionnons le cas de l'érosion du sol effectuée par l'Homme dans les forêts, qui peut être suivie de pluies intenses et causant ainsi des désastres de glissements de terrains.

1.2 La gestion de crise

Dans (Boin, 2004), « la gestion de crise » est une expression concise souvent utilisée pour désigner toutes les pratiques de gestion qui concernent les phénomènes et les développements non routiniers. (Devlin, 2006) décrit ces pratiques comme étant « des mesures spéciales prises pour résoudre les problèmes causés par une crise ». Plus spécifiquement, la gestion de crise implique des efforts pour empêcher de futures crises de se reproduire, se préparer pour une meilleure protection contre les impacts d'un désastre, réaliser une réponse effective pour une crise actuelle et fournir des plans et des ressources pour le rétablissement de la situation normale à la suite d'une crise (Rosenthal et Pijenburg, 1991). En fait, chacune de ces tâches représente une phase inhérente dans le cycle de vie de la gestion de crise. Dans ce qui suit, nous détaillons chaque phase de ce cycle.

1.2.1 Les phases de la gestion de crise

Dans la littérature, le processus de gestion de crise est souvent représenté sous forme d'un cycle, soulignant ainsi le caractère répétitif des événements de désastre. Ce cycle, illustré dans la figure 1.1, est principalement composé de quatre phases (Alexander, 2002; Carter, 2008; Vivacqua et Borges, 2012; Federal Emergency Management Agency, 2020) :

Type de désastre	Sous-classes de désastre		Exemples de désastres
Naturel	Géophysique		Tremblements de terre, glissements de terrains, éruptions volcaniques
	Météorologique		Cyclones, typhons, ouragans
	Hydrologique		Inondations
	Climatologique		Température extrême, sécheresse, incendies de forêts
	Biologique		Épidémies, infestations des insectes, bousculades des animaux
	Extra-terrestre		Impact d'astéroïde
Causé par l'Homme	Socio-technique	Technologique	Explosions, incendies, fuite de gaz, effondrement de structures, déversement de produits chimiques, marée noire
		Transport	Air, route, ferroviaire, mer
		Échecs dans les lieux publics	Bousculade de la foule, effondrement de bâtiments
	Guerre	Défaillance de production	Défaillance des systèmes informatiques
		National	Guerres civiles, émeutes, terrorisme
		International	Guerres entre pays, attaques nucléaires
Hybride	Naturel et causé par l'Homme		Communauté installée sur une zone inondable

TABLE 1.1 – Types des désastres (Shaluf, 2007a; Guha-Sapir *et al.*, 2015)

- *La phase de prévention/atténuation.* Cette phase, réalisée bien avant l'occurrence d'un désastre, inclut des activités qui ont pour but de réduire la vulnérabilité d'une population et de diminuer les impacts nocifs des futurs désastres. Plus spécifiquement, elle comprend l'identification des risques, leurs évaluations, la planification et l'implémentation de mesures à long terme. Parmi ces mesures préventives, nous pouvons citer par exemple la construction de barrages ou de digues pour contrôler les crues des eaux, l'allocation des

abris et la promulgation de lois et de pénalités.

- *La phase de préparation.* C'est une phase continue qui inclut des activités répétitives avant la survenance d'un désastre. Elle vise à augmenter la capacité de réponse chez les acteurs impliqués dans une situation de crise. Parmi les activités de cette phase, nous mentionnons la conception des plans d'urgence et leurs évaluations, l'entraînement du personnel répondeur, la conduite d'exercices inter-organisationnels et la réalisation de prévisions sur les impacts et les besoins pouvant survenir en cas d'un désastre particulier (par exemple les besoins en matière de ressources et d'abris).
- *La phase de réponse.* La réponse à une crise commence immédiatement dès le déclenchement d'un évènement catastrophique et se termine lorsque la situation d'urgence se stabilise et devient sous contrôle. Les mesures de réponse sont principalement destinées à sauver les vies des gens, protéger les biens et éviter des pertes économiques majeurs et les problèmes environnementaux qui peuvent en survenir. Ces mesures comprennent entre autres la mise en action des plans d'urgence préalablement préparés dans la phase de préparation, la mobilisation des ressources, l'évaluation des risques émergents de la situation de crise actuelle, l'assistance médicale, l'évacuation et les opérations de recherche et de sauvetage. (Diniz *et al.*, 2005) ont décrit la phase de réponse à une crise comme étant un cycle composé de trois étapes : (a) prise de décisions suite à une évaluation de la situation de crise courante ; (b) transformation des décisions en actions ; (c) affectation de la situation courante de crise par les actions réalisés et d'éventuels évènements externes, ce qui peut engendrer de nouvelles décisions.
- *La phase de rétablissement.* Cette phase commence dès que la situation d'urgence est maîtrisée. Son principal objectif est de ramener la communauté victime d'un désastre à un niveau normal de fonctionnement. D'un côté, la phase de rétablissement inclut des activités à court terme comme la restauration des services essentiels et vitales pour la communauté victime. De l'autre côté, elle comprend des actions à long terme qui peuvent durer des semaines, des mois ou des années. Ces activités couvrent entre autres la réparation des dommages, la reconstruction des bâtiments et des installations détruites et la réhabilitation physique et psychologique des victimes qui ont gravement souffert des effets du désastre.

Dans le cadre des présents travaux de thèse, nous nous limitons à la phase de réponse à une crise

1.3 La phase de réponse à une crise

1.3.1 Les parties prenantes dans un scénario de crise

Rappelons que la phase de réponse à une crise (appelée aussi « phase de gestion d'urgence » (Van De Walle *et al.*, 2009)) commence dès l'occurrence d'une situation dangereuse engendrée par un évènement catastrophique, nécessitant ainsi des mesures de réponse immédiates. L'objectif essentiel de cette phase est de sauver les vies des victimes et d'éviter des dommages et des pertes supplémentaires. Ceci nécessite alors des interventions massives et rapides de toutes les parties impliquées dans la situation de crise, allant des institutions publiques jusqu'aux citoyens victimes.

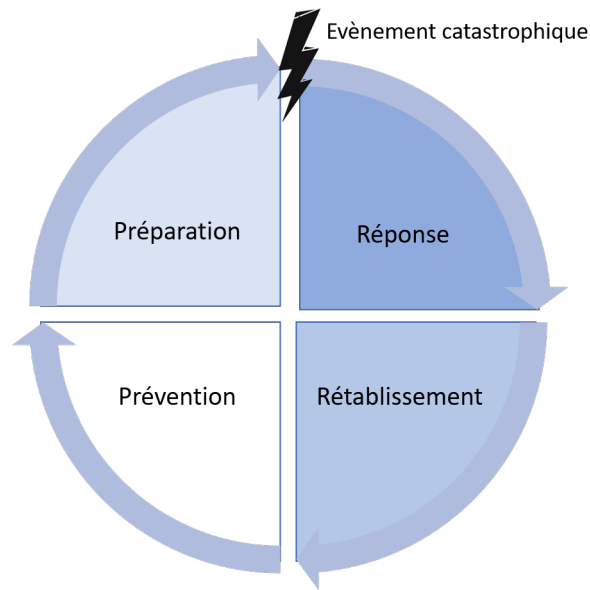


FIGURE 1.1 – Les phases de la gestion de crise, adaptée de (Vivacqua et Borges, 2012)

(L'opacité indique l'importance du temps dans chaque phase)

Ces derniers sont considérés les véritables « premiers intervenants » qui agissent souvent en se basant sur des connaissances que les officiels n'en disposent pas (Palen *et al.*, 2010). D'une manière générale, cinq catégories d'acteurs sont impliquées dans toute situation de crise (Fogli et Guida, 2013) :

- *La population impactée* qui inclut toutes les personnes directement affectées par un désastre.
- *La population de contexte* qui couvre les personnes qui sont liées à la population d'impact et qui ne sont pas directement affectées par un évènement catastrophique, à savoir les amis et les proches.
- *Le personnel d'intervention* (ou les répondeurs à une crise) y compris les professionnels (par exemple, les pompiers) et les volontaires engagés dans la gestion pratique de l'urgence.
- *L'unité de gestion d'urgence* (ou la cellule de crise) (Mace Ramete, 2015) en charge de la planification, de la coordination et de la surveillance ou le contrôle des tâches effectuées par le personnel d'intervention.
- *Les institutions* impliquées dans la gestion de l'urgence à un niveau local, gouvernemental ou international (par exemple, la mairie, le ministère de l'intérieur, etc.).

Tout au long du processus de réponse à une crise, plusieurs interactions entre ces catégories d'acteurs s'effectuent à un niveau interne au sein de chaque catégorie et à un niveau externe entre elles. La plupart de ces interactions ont pour objectif la coordination entre les acteurs impliqués afin de mener une gestion effective de la situation d'urgence. En se basant sur les catégories d'in-

tervenants mentionnées ci-dessus et les interactions effectuées entre elles, l'environnement de la réponse à une crise peut être ainsi structuré en quatre niveaux comme le montre la figure 1.2 :

- *Le niveau de population* inclut la population impactée, la population de contexte ainsi que toute interaction entre elles.
- *Le niveau opérationnel* englobe le personnel d'intervention, les interactions au sein de ce niveau afin d'organiser les opérations de secours, les interactions avec le niveau de population et celles avec le niveau de gestion.
- *Le niveau de gestion* comprend l'unité de gestion d'urgence, les interactions intérieures et celles avec le niveau opérationnel et le niveau institutionnel.
- *Le niveau institutionnel* inclut les institutions liées au gouvernement ainsi que leurs interactions avec le niveau de gestion.

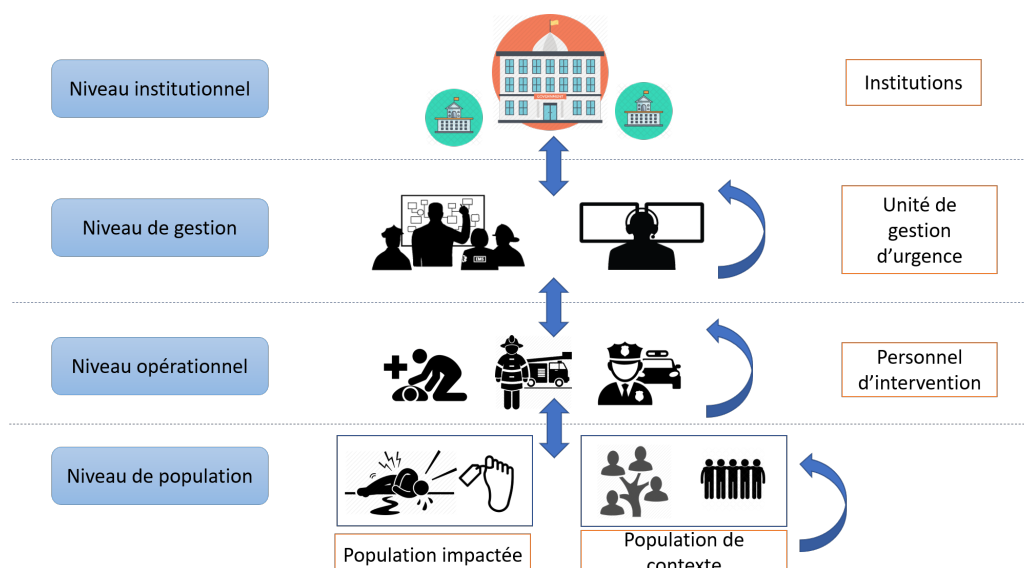


FIGURE 1.2 – Scénario de réponse à une crise, adaptée de (Fogli et Guida, 2013)

1.3.2 Prise de décision en situation de crise

La gestion de crise implique la prise de décisions cruciales par différents acteurs engagés. Ainsi, les preneurs de décisions font face à plusieurs problèmes de décision. D'une façon générale, les problèmes de décision rencontrés dans une organisation peuvent être classifiés selon différents critères. (Turban *et al.*, 2004) (cité dans (Zhang *et al.*, 2015b)) ont proposé une classification des problèmes de décision en se basant sur le degré de complexité du problème donné :

- *Structuré*. Un tel problème peut être décrit par des modèles mathématiques classiques existants, tels que la programmation linéaire ou les méthodes statistiques. Des méthodes de so-

lution standards peuvent être ainsi appliquées pour obtenir une solution optimale à ce type de problème.

- *Non structuré*. Ce type de problème est souvent caractérisé par l'incertitude, l'imprécision et le flou impliquant ainsi une absence d'une méthode de solution standard. L'intuition humaine ou le jugement des experts interviennent souvent dans ce genre de problème de décision.
- *Semi-structuré*. Cette catégorie de problème combine à la fois les traits des problèmes de décision structurés et non structurés. La résolution de ce genre de problème demande alors des méthodes de solution standards en plus de l'intuition humaine.

Les problèmes de décision peuvent être aussi classifiés selon le niveau de décision ([Anthony, 1965](#)) (cité dans ([Niu et al., 2009](#))) :

- *Stratégique*. Les décisions stratégiques (appelées aussi les décisions de planification stratégique) concernent les objectifs et les politiques à long terme d'une organisation. Ces décisions, souvent non structurées, se situent à un niveau de gestion élevé et sont accompagnés d'un degré élevé d'incertitude. Dans un contexte de gestion de crise, ce type de décisions concerne l'orientation générale des organisations impliquées dans la gestion de crise. Ainsi, les résultats de ces décisions peuvent être sous la forme de plans stratégiques de gestion de crise, plans à long terme d'allocation des ressources, etc.
- *Tactique*. Les décisions tactiques (appelées aussi les décisions de contrôle de gestion), concernent l'acquisition et l'utilisation efficiente des ressources d'une organisation pour atteindre ses objectifs. Ces décisions peuvent être considérées semi-structurées et appartiennent à un niveau intermédiaire de gestion. En gestion de crise, les décisions tactiques incluent celles qui sont prises par l'unité de gestion d'urgence (ou la cellule de crise) (voir section 1.3.1) afin de répondre à une situation d'urgence. Ces décisions peuvent aboutir à des plans d'intervention sur le champ de crise, allocation des ressources nécessaires, etc.
- *Opérationnel*. Les décisions opérationnelles (appelées aussi les décisions de contrôle opérationnel) portent sur l'exécution efficace de tâches spécifiques. Ces décisions, souvent structurées, appartiennent à un niveau bas de gestion. En gestion de crise, les décisions opérationnelles sont prises sur le champ d'une crise par le personnel d'intervention (ou les répondants).

Afin d'aboutir à une solution pour chaque problème de décision, un processus de prise de décision doit être mis en œuvre. Ce processus commence tout d'abord par la compréhension du problème de décision et se termine par le choix d'une solution parmi plusieurs alternatives ([Niu et al., 2009](#)). Un processus général de prise de décision a été proposé par ([Simon, 1960](#)) et est composé de trois étapes :

1. *Intelligence*. Cette étape inclut la définition du problème de décision ainsi que la détermination des exigences qu'une future solution doit satisfaire.
2. *Modélisation*. Il s'agit de la création, le développement et l'analyse d'un nombre de solutions possibles pour le problème de décision déjà défini.

3. *Choix*. Cette étape inclut dans un premier temps une évaluation des alternatives par rapport aux objectifs et aux exigences posés par le problème de décision. Si l'alternative la plus prometteuse n'a pas de conséquences négatives significatives, elle sera finalement choisie.

Une quatrième étape a été ajoutée au modèle de processus de prise de décision général de (Simon, 1960) appelée *Implémentation* (Mintzberg *et al.*, 1976; Courtney, 2001; Lu et Ruan, 2007). Évidemment, cette phase désigne l'implémentation de la solution choisie pour le problème de décision identifié. La figure 1.3 illustre toutes les étapes discutées du modèle de processus de prise de décision. Dans ce qui suit, nous nous intéressons principalement aux décisions du niveau tactique

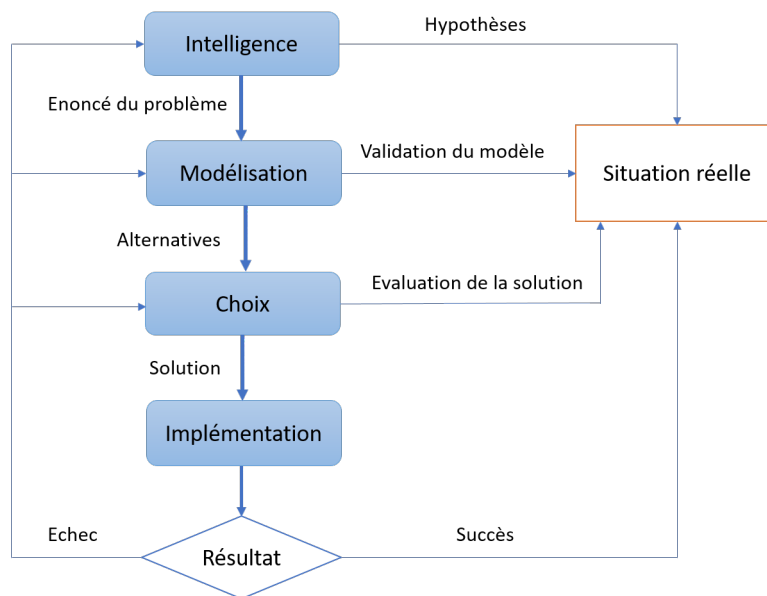


FIGURE 1.3 – Framework général du processus de prise de décision, adaptée de (Lu et Ruan, 2007)

issues des cellules de crise.

1.3.3 La tâche de réponse au niveau de la cellule de crise

La réponse à une crise est une tâche complexe qui nécessite l'intervention de plusieurs acteurs à savoir *les gestionnaires de crise* (ou *les gestionnaires d'urgence*) situés dans la cellule de crise. Ces personnes sont priées de prendre des décisions critiques et rapides afin de sauver les vies des victimes et éviter des dommages supplémentaires. Plus spécifiquement, les gestionnaires de crise ont principalement la responsabilité de (Vivacqua et Borges, 2012; Fogli et Guida, 2013; Fogli *et al.*, 2017) :

- analyser et évaluer la situation de crise courante. Pour se faire, les gestionnaires d'urgence doivent tout d'abord acquérir les données situationnelles de crise qui parviennent du champ

du désastre, les valider et analyser les conséquences ou les risques qui peuvent émerger dans une telle situation. La *collaboration* et la *coordination* avec les répondeurs situés sur le champ de la crise sont indispensables pour acquérir les informations concernant la situation actuelle d'urgence et pour leur communiquer les instructions à exécuter. En outre, les gestionnaires d'urgence ont la mission de surveiller la situation de crise pour tout éventuel évènement ainsi que suivre l'avancement de l'exécution des actions par le personnel d'intervention.

- planifier les interventions nécessaires pour atteindre les objectifs prioritaires de la gestion d'urgence. A la lumière des informations collectées, les gestionnaires de crise ont le devoir d'analyser les besoins primordiaux de la situation d'urgence actuelle et générer un plan de réponse adaptable à la situation de crise courante tout en tenant compte des contraintes, des législations, des réglementations et des procédures inhérentes dans le plan de réponse global préparé dans la phase de préparation.
- allouer les ressources nécessaires pour exécuter les activités incluses dans le plan d'action généré. Les gestionnaires de crise ont la responsabilité de mobiliser et coordonner les ressources nécessaires pour la réponse à une crise ainsi que prévoir leurs demandes.

Par ailleurs, ces tâches sont gourmandes en *connaissances*. En d'autres termes, les gestionnaires de crise doivent exploiter leurs compétences et leurs expériences acquises depuis des situations de crise antérieures (Fogli et Guida, 2013). D'une manière générale, les décisions prises durant la réponse à une crise se basent sur des combinaisons de plusieurs types de connaissances : connaissances personnelles antérieures, connaissances formelles antérieures et connaissances contextuelles actuelles (Diniz et al., 2005). La figure 1.4 illustre le soutien de ces types de connaissances durant la phase de réponse à une crise (décrite dans la section 1.2.1).

- Les *connaissances personnelles antérieures* sont intégrés dans l'esprit de chaque acteur intervenant et sont acquises depuis des expériences réelles ou des simulations de contextes réelles passées. D'après les auteurs, ces connaissances sont importantes pour le domaine de réponse à une crise car elles permettent de réduire le temps nécessaire pour prendre des décisions. En outre, ce type de connaissance est considéré implicite, très personnel et difficile à formaliser.
- Les *connaissances formelles antérieures* sont explicites et sont situées entre autres dans le plan de réponse à une crise qui décrit les procédures à suivre suite à un désastre. Parmi ces connaissances, on peut citer les cartes et les descriptions des infrastructures.
- Les *connaissances contextuelles actuelles* sont issues de la situation de crise courante et ses développements puisqu'une crise dote d'un caractère dynamique. Plus spécifiquement, ces connaissances incluent des informations qui concernent l'évènement de désastre, éventuels évènements importants qui peuvent submerger au cours d'une situation de crise et les actions réalisés par les équipes des répondeurs. Ces connaissances peuvent être alimentés par des sources humaines ou par des sources machines telles que les capteurs.

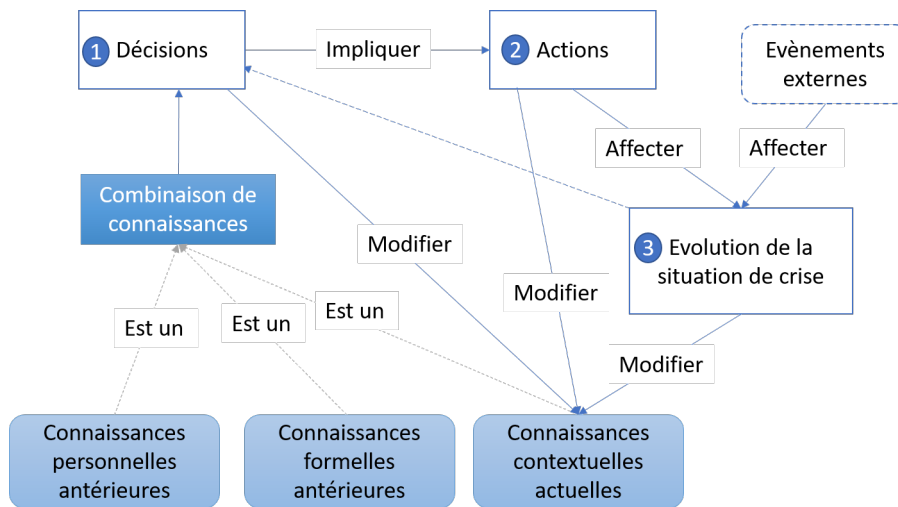


FIGURE 1.4 – Carte conceptuelle illustrant le soutien des types de connaissances durant la phase de réponse à une crise, adaptée de (Diniz *et al.*, 2005)

1.4 Vers une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise

La tâche de réponse à une crise n'est aucunement une tâche simple mais plutôt une tâche complexe remplie de difficultés et d'écueils. Des enjeux sont alors présents devant les gestionnaires de crise pendant l'exécution de leurs tâches. Dans cette section, nous allons décrire tout d'abord des défis qui peuvent être rencontrés pendant la phase de réponse à une crise. Ces enjeux constituent la problématique globale de cette thèse. Puis, nous allons présenter quelques travaux connexes existants dans la littérature ayant pour objectif de répondre aux enjeux identifiés. Enfin, à la base d'une synthèse des travaux liés, nous allons présenter nos choix méthodologiques. Ceux-ci permettent de créer le cadre restreint des présents travaux de thèse.

1.4.1 Enjeux liés à la réponse à une crise

Les enjeux présentés ci-dessous s'articulent autour de la tâche de *la proposition d'un plan de réponse à une situation de crise*.

Une collaboration nécessaire entre les parties prenantes

Les situations de crise sont des situations complexes, dynamiques et nécessitent souvent la participation de plusieurs acteurs issus de diverses organisations, en l'occurrence la protection civile, la police et les services médicaux. La collaboration entre ces différentes parties prenantes joue

un rôle très important pour répondre efficacement à une situation d'urgence et obtenir des résultats fructueux (Kapucu et Garayev, 2011). Selon (Kamensky et Burlin, 2004), le terme « collaboration » peut être utilisé dans une situation où « des personnes issues de différentes organisations produisent quelque chose ensemble via à des efforts, des ressources et des prises de décisions conjoints, et partagent la propriété du produit ou du service final ».

Dans le contexte de réponse à une crise, la collaboration (inter-organisationnelle) peut se manifester dans la collecte des données situationnelles de crise par les différents répondeurs situés sur le champ de la crise (Pompiers, policiers, agents médicaux) et la communication de ces informations aux gestionnaires de crise situés dans la cellule de crise. Toutefois, chaque organisation de réponse possède son propre vocabulaire et son propre système d'information. Par conséquent, des problèmes de communication peuvent être engendrés vu l'hétérogénéité de la sémantique des données échangées. Ainsi, le manque d'un vocabulaire commun entre les parties prenantes dans une situation de crise conduit à une augmentation des problèmes d'interopérabilité sémantique et par conséquent peut entraîner des échecs dans la tâche de réponse à une crise (Liu *et al.*, 2013). La problématique envisagée ici est donc *comment modéliser les situations de réponse à une crise pour structurer les informations collectées depuis le champ de la crise et appréhender les problèmes d'interopérabilité sémantique ?*

Un plan de réponse adaptable à la situation de crise

Suite à l'évaluation de la situation de crise à la lumière des données acquises, les gestionnaires de crise doivent mettre en œuvre des plans d'action préalablement élaborés et exercés en phase de préparation afin de faire face à la situation d'urgence en cours. Cependant, comme chaque situation de crise est unique, ces plans ne peuvent pas être directement utilisés et nécessitent une adaptation (Vivacqua et Borges, 2012). Pour se faire, les gestionnaires d'urgence doivent exploiter les connaissances contextuelles acquises depuis le niveau opérationnel et utiliser par la suite les connaissances personnelles et les connaissances formelles afin de générer un plan de réponse adaptable à la situation de crise courante (voir la section 1.3.3). La difficulté réside donc dans l'articulation de ces types de connaissances afin d'atteindre les objectifs visés. En d'autres termes, *comment exploiter tous ces types de connaissances afin de proposer un plan de réponse adaptable à la situation de crise courante ?*

L'importance du comportement psychologique du preneur de décision

Les gestionnaires de crise doivent accomplir leurs tâches dans un environnement caractérisé par le stress, la fatigue, la surcharge de responsabilités, la pression du temps et l'incertitude (Fogli et Guida, 2013). Dans un tel environnement, le preneur de décision est doté d'une rationalité limitée, d'une aversion au risque et d'une dépendance envers un point de référence, ce qui peut certainement affecter ses décisions (Wang *et al.*, 2017). Ainsi, le comportement psychologique du gestionnaire de crise joue un rôle très important dans le processus de prise de décision (Wang *et al.*, 2015). La question réside donc dans la prise en compte de l'état psychologique du preneur de décision dans le processus de prise de décision. Plus spécifiquement, *comment tenir compte de l'état psychologique du gestionnaire de crise dans le processus de génération d'un plan de*

réponse adaptable à la situation de crise courante ?

1.4.2 Travaux connexes d'aide à la décision pour la réponse à une crise

L'objectif principal de cette thèse est la proposition d'une approche d'aide à la décision pour la suggestion d'un plan de réponse stratégique à une crise. Pour atteindre un tel objectif, les gestionnaires de crise doivent disposer des *objets d'aide à la décision* qui, selon (Fogli et Guida, 2013), sont les entités abstraites sur lesquelles les gestionnaires de crise travaillent dans leurs activités. Ces entités sont :

- *Évènements*. Le concept d'évènement inclut les évènements majeurs (désastres), leurs caractéristiques ainsi que leurs conséquences (dommages, victimes, etc.). Toutes les connaissances se rapportant aux évènements peuvent être considérées comme étant des connaissances contextuelles car elles sont fortement liées à la situation actuelle de crise. Ces connaissances peuvent être acquises depuis le champ de la crise à l'aide des répondants du niveau opérationnel.
- *Plans*. Un plan est une description formelle de procédures d'intervention à exécuter afin de répondre à une situation de crise décrite par un ensemble d'évènements. Il spécifie les actions à exécuter et le flux de contrôle correspondant (exécution séquentielle ou parallèle des actions, conditions liées à l'exécution des actions, etc.). D'une manière générale, les plans de réponse aux crises codifient des connaissances qui se rapportent aux réglementations de réponse (connaissances formelles antérieures) et aux meilleures pratiques et expériences acquises (connaissances personnelles antérieures).
- *Ressources*. L'exécution d'une action incluse dans un plan nécessite une ou plusieurs ressources spécifiques. Bien évidemment, les ressources ne sont pas infinies. Elles sont caractérisées par une quantité. De plus, elles appartiennent à plusieurs catégories à savoir les ressources humaines et les ressources matérielles.

Afin de modéliser les connaissances qui se rapportent aux situations de crise et éventuellement à la réponse aux situations d'urgence, plusieurs types de structures ont été utilisés dans la littérature à savoir :

- les *métamodèles* (Fertier *et al.*, 2020; Othman *et al.*, 2014; Othman et Beydoun, 2013; Ramète *et al.*, 2012; Bénaben *et al.*, 2008). Un métamodèle est le résultat d'un processus de métamodélisation d'un domaine de connaissances bien spécifique, en l'occurrence le domaine de la gestion des crises. Ce processus crée les constructions et les règles nécessaires pour la genèse de modèles. Ceci est effectué par la création d'une collection de concepts pour représenter des entités, des actions ou des états d'un domaine de connaissances particulier (Sowa, 1984; Othman et Beydoun, 2013). Dans notre contexte, les métamodèles facilitent aux utilisateurs la création de modèles solutions de gestion de crise d'une perspective spécifique pour résoudre des problèmes bien définis. Par exemple, (Bénaben *et al.*, 2008) ont proposé un métamodèle qui permet de caractériser les situations de crise. Le

métamodèle créé est ensuite traduit en une ontologie afin qu'elle puisse être capable de soutenir des mécanismes de raisonnement.

- les *ontologies* (Santos *et al.*, 2019; Kontopoulos *et al.*, 2018; Haghghi *et al.*, 2013). Une ontologie, grâce à ses concepts, les relations entre eux et ses axiomes, permet de modéliser les connaissances d'un domaine particulier, en l'occurrence le domaine de la réponse à une crise. En outre, l'ontologie fournit une explication unifiée et non ambiguë de ses concepts et ses relations, ce qui lui permet d'être partagée et réutilisable par plusieurs utilisateurs (Liu *et al.*, 2013). Dans notre contexte, une ontologie permet de modéliser les connaissances liées à une perspective spécifique du domaine de la réponse à une crise, ainsi que la résolution des problèmes liés à l'interopérabilité sémantique.
- les *Frames* ou cadres (Zhang *et al.*, 2015a; Liao *et al.*, 2012). Créés par (Minsky, 1974), les frames sont des structures ayant pour rôle la représentation des connaissances stéréotypées (Jouve, 1992). Ils permettent de représenter des entités du monde réel ainsi que leurs parties et leurs constituants. Dans notre contexte, les frames ont été utilisés pour représenter des connaissances liées à divers aspects d'une situation de crise à savoir un scénario de crise (entité) et ses caractéristiques (parties) (Zhang *et al.*, 2015a).

Plusieurs approches d'aide à la décision ont été proposées dans la littérature dans le but de générer un plan de réponse adaptable à une situation de crise. De différentes méthodes et techniques ont été utilisées pour atteindre un tel objectif à savoir :

- *Les cartes cognitives floues (Fuzzy Cognitive Maps)*. Introduites par (Kosko, 1986), les cartes cognitives floues (ou FCMs) représentent une technique issue du domaine du Soft Computing, capable de modéliser le comportement des systèmes au moyen d'un ensemble de concepts et de relations causales entre eux. Une FCM peut être vue comme étant un graphe orienté composé de nœuds (concepts) et d'arêtes de connexion entre ces nœuds indiquant une relation de causalité. (De Maio *et al.*, 2011) ont proposé un Framework à base de connaissances pour l'aide à la décision en cas d'urgence. Les auteurs ont utilisé les ontologies pour la modélisation du domaine de réponse à une crise et les FCMs pour le raisonnement en vue d'obtenir un plan d'action d'urgence. Dans (De Maio *et al.*, 2011), les concepts utilisés par la FCM sont ceux de l'ontologie de domaine déjà développée afin de représenter les connaissances du domaine de réponse à une crise. Selon les auteurs, ces concepts peuvent représenter les caractéristiques d'une crise (par exemple, un tremblement de terre), l'action d'urgence (par exemple, extinction des incendies) et les types des ressources (humaines ou matérielles). Les relations entre ces concepts peuvent être de type « causer » (entre les concepts des caractéristiques d'une crise et de ceux des actions) ou de type « requiert » (entre les concepts des actions et de ceux des types de ressources). Bien qu'une approche d'aide à la décision à base de FCM permet de modéliser l'inférence causale intégrée dans les plans d'urgence et d'aider, ainsi, le gestionnaire de crise dans la génération d'un plan d'action d'urgence, elles ne permettent pas de capitaliser et d'exploiter les connaissances et les expériences acquises dans la réponse aux crises antérieures. En d'autres termes, le système proposé par les auteurs n'a pas de capacité d'apprentissage des expériences antérieures.
- *La logique non-axiomatique (Non-Axiomatic Logic)*. Issue du domaine de l'intelligence artificielle générale (General Artificial Intelligence), la logique non-axiomatique (NAL) a été proposée par (Wang, 2013) et a été utilisée pour concevoir principalement des systèmes

de raisonnement. (Slam *et al.*, 2015) ont proposé un Framework conceptuel d'un système d'aide à la décision pour la réponse aux crises doté d'une capacité de raisonnement et d'apprentissage, en utilisant la logique non axiomatique. Les auteurs ont utilisé la NAL afin de représenter les connaissances et raisonner sur elles afin de proposer un plan d'action d'urgence. Le mécanisme de raisonnement de leur système est basé sur les règles écrites suivant la syntaxe proposée par la NAL. Bien que le système proposé par (Slam *et al.*, 2015) permet de raisonner dans l'incertitude, la multiplicité et la nécessité de mise à jour des règles d'inférence constitue un point faible non négligeable.

- *La recherche d'information (Information retrieval)*. (Ni *et al.*, 2020) ont proposé une approche de génération d'un plan d'intervention d'urgence basée sur des mécanismes de recherche d'information. L'idée principale de leur travail est d'extraire les plans d'urgence les plus pertinents depuis une base de plans d'urgences afin de répondre à une crise donnée. Dans (Ni *et al.*, 2020), la description de la situation d'urgence ainsi que celle des plans d'intervention sont représentées dans un format textuel. Ainsi, des mesures de similarité textuelle ont été essentiellement employées. L'approche proposée dans ce travail comporte trois éléments clés : une base de plans d'urgences relatifs à des crises antérieures et représentés dans un format semi-structuré afin de faciliter la tâche de recherche d'information ; un moteur de recherche permettant d'extraire les sections de plans d'intervention les plus pertinentes depuis la base des plans en utilisant des mesures de similarité ; un composant permettant de combiner et d'organiser les sections de plans d'urgence récupérés afin de générer un nouveau plan de réponse. L'approche proposée par (Ni *et al.*, 2020) dépend fortement de la similarité calculée entre la description textuelle de l'évènement de crise et les informations textuelles intégrées dans les plans d'interventions. En outre, leur système proposé n'a pas de capacité d'apprentissage permettant d'exploiter les expériences acquises dans la réponse aux crises.

- *Le raisonnement à partir de cas (Case-based Reasoning)*. Le RàPC est une approche de résolution de problèmes et d'apprentissage basée sur les expériences passées. Une expérience passée est stockée sous forme de problèmes résolus ou « cas » dans la base de cas. Dans une telle approche, un nouveau problème est résolu en adaptant les solutions de problèmes similaires à ce nouveau problème (Althoff, 2001). Dans le contexte de réponse aux crises, plusieurs travaux existants ont utilisé cette méthodologie de résolution de problèmes afin de générer une solution de réponse adaptable à une situation de crise courante. Parmi ces travaux, nous citons la recherche conduite par (Amaïef et Lu, 2013) dans laquelle les auteurs ont proposé une approche d'aide à la décision à base de RàPC et d'ontologie afin de générer une solution de réponse aux crises de terrorisme. La première étape du processus de raisonnement consiste à la recherche de cas similaires au problème cible en utilisant des mesures de similarité. Plus spécifiquement, l'évaluation de la similarité consiste à comparer les attributs du nouveau cas avec ceux des cas historiques. Une fois le cas le plus similaire est récupéré, un algorithme d'adaptation est appliqué sur sa partie solution afin de générer une nouvelle solution adaptable à la situation de crise courante. La solution est ensuite révisée par le preneur de décisions d'urgence et retenue en permanence après validation.

1.4.3 Vers un choix

La réponse à une crise est une tâche complexe qui nécessite l'implication des efforts de plusieurs acteurs issues de différentes organisations (protection civile, police, SAMU, etc.). La collaboration entre ces parties-prenantes est nécessaires pour avoir une réponse effective à une situation de crise. Une des facettes de la tâche de réponse à une crise nécessitant une collaboration peut être figurée dans la collecte des données situationnelles de crise. La structuration de ces informations collectées (les connaissances contextuelles) nécessite donc un modèle robuste qui peut surmonter les problèmes d'interopérabilité sémantique qui peuvent être issues de la diversité et l'hétérogénéité du vocabulaire des différents acteurs impliqués. En outre, ce modèle doit être capable de représenter les connaissances formelles et les expériences cumulées qui se rapportent à l'opération de réponse à une crise. Dans notre cas, nous nous intéressons à la suggestion d'un plan stratégique de réponse à une crise. D'après les exigences mentionnées ci-avant, nous considérons que l'utilisation des *ontologies* convienne mieux pour la modélisation des situations de réponse à une crise.

Afin d'assister les preneurs de décisions dans la génération d'un plan stratégique de réponse à une situation de crise, une méthodologie de raisonnement sur les connaissances acquises s'impose. Plusieurs facteurs contribuent au choix de cette méthodologie, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Les tâches des gestionnaires de crise, en l'occurrence la proposition d'un plan de réponse à une situation de crise, sont généralement axées sur les connaissances et les expériences acquises depuis des situations d'urgence antérieures (Zhang *et al.*, 2002; Fogli et Guida, 2013). En d'autres termes, la capitalisation et l'exploitation des expériences acquises offrent un grand avantage pour la tâche de réponse à une crise. Ainsi, une méthodologie de raisonnement à base de connaissances semble une solution effective pour atteindre notre objectif.
- Une situation de crise est une situation unique caractérisée par ses propres attributs qui concernent les facettes de l'évènement majeur (ou plusieurs évènements) ainsi que les caractéristiques des dommages et les pertes engendrées (Eriksson, 2009). Il est ainsi très difficile voire impossible d'avoir une liste exhaustive de règles de raisonnement pour gérer une situation de crise avec succès. En d'autres termes, l'utilisation d'une méthodologie de raisonnement à base de règles n'est pas une solution prometteuse pour atteindre notre objectif.
- Dans une situation d'urgence, le problème de manque des informations situationnelles est souvent rencontré (Diniz *et al.*, 2005). Cela veut dire qu'il est possible de ne pas disposer de toutes les informations relatives à la situation d'urgence courante. Il convient donc d'adopter une méthodologie qui peut tolérer ce problème omniprésent dans les situations chaotiques d'urgence.

D'après les facteurs de choix mentionnés ci-dessus, nous adoptons dans ce présent travail de thèse le *raisonnement à partir de cas* (Kolodner, 1993) comme étant la méthodologie choisie pour la génération d'un plan de réponse à une situation de crise. Le RàPC est un paradigme de résolution de problèmes qui utilise les connaissances et les expériences acquises depuis des situations problématiques antérieures et les réutilise pour résoudre une nouvelle situation similaire. Dans un

contexte de RàPC, toute situation problématique ancienne résolue est considérée comme étant un cas. Un ensemble de cas stockés forment une base de cas. Dans notre contexte, un cas représente une ancienne situation de crise (problème) ainsi que le plan stratégique de réponse correspondant (la solution). Ici, les connaissances incluses dans un cas seront représentées à l'aide de l'ontologie créée pour la modélisation des situations de crise.

Afin de bien positionner notre thèse, nous soulignons les deux points suivants :

- Concernant la représentation des connaissances à l'aide des ontologies, nous nous intéressons dans notre thèse aux aspects clés du domaine de réponse à une crise que notre ontologie doit couvrir afin d'obtenir un modèle robuste sur lequel notre système envisagé d'aide à la décision à base de RàPC peut se baser. La question qui se pose ici est donc : *Quels sont les aspects clés du domaine de réponse à une crise que notre ontologie doit couvrir ?*
- Concernant le raisonnement à l'aide du RàPC, nous nous intéressons particulièrement dans nos travaux de thèse à l'étape de recherche de cas similaires et à la prise en compte du comportement psychologique durant le processus de raisonnement. Les questions qui peuvent être posées ici sont donc : *Comment améliorer l'étape de recherche de cas similaires et quelles sont les mesures de similarité à utiliser ? Comment modéliser le comportement psychologique du preneur de décision d'urgence et intégrer ce modèle dans le processus de raisonnement ?*

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons introduit en premier lieu la notion de crise, ses caractéristiques majeures ainsi que ses types (naturelle ou causée par l'Homme). Ceci a permis de tracer le cadre général de notre travail. Allant du général au spécifique, nous avons présenté en deuxième lieu la notion de gestion de crise d'une manière globale. Ensuite, nous avons énuméré ses quatre phases : prévention, préparation, réponse et rétablissement. Pour chacune des phases de gestion de crise, nous avons indiqué sa position par rapport à l'évènement de désastre dans le temps et les principales actions exécutées.

Étant donné que les présents travaux de thèse s'inscrivent dans la phase de réponse à une crise, nous avons consacré la troisième partie de ce chapitre à expliquer d'une manière minutieuse la phase de réponse à une crise. Nous avons commencé par la présentation des parties prenantes ou acteurs impliqués dans un scénario de réponse à une crise, en l'occurrence la cellule de crise et le personnel d'intervention (répondeurs). Nous avons vu que ces acteurs découlent de différents niveaux de gestion à savoir le niveau tactique pour la cellule de crise et le niveau opérationnel pour le personnel d'intervention. Par la suite, nous avons adressé d'une manière générale la notion de prise de décision puisque nous nous intéressons à l'aspect décisionnel de la tâche de réponse à une crise. Plus spécifiquement, nous nous intéressons aux décisions qui peuvent être prises par les gestionnaires de crise situés au niveau de la cellule de crise. Celles-ci constituent le dernier objet de cette partie. Précisément, nous avons expliqué les tâches des gestionnaires de crise suite au déclenchement d'un désastre ainsi que les types de connaissances qui peuvent être impliqués pour la réalisation de leurs tâches.

Enfin, nous avons présenté des enjeux qui peuvent être rencontrés dans la tâche de réponse à une crise vis à vis les gestionnaires de crise. Ceci nous a conduit à élaborer un état de l'art non exhaustif des approches existantes dans la littérature, ayant pour objectif d'assister les preneurs de décisions dans la proposition d'un plan de réponse à une situation de crise. Plus spécifiquement, nous avons focalisé sur les types de modèles utilisés pour la modélisation des situations de crise ainsi que les différentes méthodologies adoptées pour la génération d'un plan stratégique de réponse à une crise. L'objectif de cette première étude de la littérature est d'aboutir à un choix convenable des méthodologies que nous allons utiliser dans l'élaboration de notre approche d'aide la décision. En se basant sur l'analyse d'un ensemble de facteurs de choix, nous avons décidé d'utiliser les ontologies pour la représentation des connaissances relatives à une situation de crise et le raisonnement à partir de cas, accouplé avec l'ontologie développée, pour la génération d'un plan stratégique de réponse.

A la lumière des choix méthodologiques mentionnés ci-dessus, les deux chapitres suivants présentent une étude approfondie des concepts de base qui seront utilisés dans l'élaboration de notre approche d'aide à la décision (les ontologies et le RàPC). Le chapitre qui suit fournit une présentation détaillée du concept d'ontologie et expose un état de l'art des ontologies ayant pour objectif la représentation des situations de crise.

Les ontologies

Sommaire

2.1	Les ontologies	30
2.1.1	Généralités	30
2.1.2	Composantes d'une ontologie	32
2.1.3	Classifications des ontologies	33
2.1.4	Ingénierie d'ontologie	34
2.1.5	Similarité sémantique entre concepts	44
2.2	Ontologies pour la représentation des situations de crise	47
2.2.1	Travaux connexes	47
2.2.2	Synthèse de l'analyse bibliographique	50

Introduction

Étant un des piliers théoriques sur lesquels va être bâtie notre approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise, nous allons présenter dans ce chapitre le concept d'ontologie et les différents aspects qui y sont liés, ainsi qu'une étude de la littérature des modèles ontologiques proposés dans notre contexte d'étude. Plus spécifiquement, nous allons présenter dans la première partie de ce chapitre la notion d'ontologie, ses composantes, ses classes et les différents aspects liés à son ingénierie (critères de conception, méthodologies de construction, langages formels de représentation et outils de développement). Nous allons aussi étudier minutieusement les différentes approches de mesure de la similarité sémantique. La deuxième partie de ce chapitre va être consacrée à l'exposition des ontologies proposées dans la littérature ayant pour objectif la représentation des connaissances liées aux situations de crise. Une synthèse de l'étude bibliographique va être fournie à la fin de cette partie.

2.1 Les ontologies

Dans cette section, nous allons introduire la notion d'ontologie allant d'un contexte philosophique à celui de l'intelligence artificielle et présenter ses définitions, ses rôles, ses composants et ses catégories. En outre, nous allons aborder les différentes facettes de l'ingénierie d'ontologie telles que les critères de sa conception, les méthodologies de construction d'une ontologie, les langages formels utilisés pour sa représentation et les outils les plus connus pour sa construction. La fin de cette partie sera consacrée à une étude des mesures de similarité sémantique.

2.1.1 Généralités

Notion d'ontologie

Le terme « ontologie » est emprunté à la philosophie où une ontologie est un compte rendu systématique de l'existence (Gruber, 1993). Psyché et al. (Psyché et al., 2003) ajoutent que ce terme philosophique, issu du grec ancien, est composé de deux mots : *ontos*(être, existe) et *logos*(étude, science). Autrement dit, le terme « ontologie » signifie l'étude de ce qui existe, « la science ou la théorie de l'être » (Psyché et al., 2003). Selon (El Ghosh, 2018), ce terme a été introduit sous sa forme latine au début du 17^{ème} siècle par le philosophe allemand *Jacob Lorhard* et a été ensuite utilisé par le théologien et philosophe allemand *Johannes Clauberg* en 1646. Ce dernier considérait l'ontologie comme une branche de la métaphysique qui étudie les types et les structures des objets, des propriétés, des événements, des processus et des relations dans chaque domaine de la réalité ((Savini, 2011) cité dans (El Ghosh, 2018)).

Plus récemment en 1980, le scientifique américain *John McCathy* fut le premier scientifique à aborder l'ontologie en informatique et plus précisément dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) (Smith et Welty, 2001). Plus spécifiquement, il a été le premier à reconnaître le

chevauchement entre les travaux effectués dans le domaine de l'ontologie philosophique et l'activité de construction des théories logiques des systèmes d'IA. Selon lui, les constructeurs des systèmes intelligents basés sur la logique doivent tout d'abord « lister tout ce qui existe, construire une ontologie de notre monde » (McCarthy, 1980). Une décennie plus tard, l'utilisation du terme « ontologie » s'est répandue dans les sous domaines de l'IA tels que l'ingénierie de connaissances et le traitement automatique du langage naturel (Fensel, 2001). Ainsi, plusieurs définitions de l'ontologie ont été proposées dans la littérature. La première définition a été donnée par (Neches *et al.*, 1991) : « Une ontologie définit les termes et les relations de base constituant le vocabulaire d'un domaine ainsi que les règles qui combinent les termes et les relations pour définir des extensions du vocabulaire ». Selon (Pérez et Benjamins, 1999), cette définition a l'avantage de nous indiquer comment procéder pour construire une ontologie, mais en nous donnant des directives vagues : identifier les termes de base et les relations entre ces termes, identifier les règles pour les combiner et fournir des définitions de ces termes et relations. Deux ans plus tard, Thomas Gruber (Gruber, 1993) a proposé une autre définition qui est devenue, jusqu'à présent, la définition la plus populaire et la plus référencée dans la littérature : « Une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation ». Cette définition repose sur deux concepts essentiels :

- conceptualisation. Selon (Genesereth et Nilsson, 1987), une conceptualisation est « une vision abstraite et simplifiée du monde que nous souhaitons représenter afin d'atteindre un but bien précis ». Gruber (Gruber, 1993; Gruber, 1995) s'est référé à cette notion pour présenter la notion de conceptualisation. Cette dernière a été autrement définie par (Studer *et al.*, 1998) comme étant « un modèle abstrait d'un phénomène quelconque dans le monde, en ayant identifié les concepts pertinents de ce phénomène ».
- spécification. C'est la description formelle et non ambiguë d'une conceptualisation : ensemble de concepts, relations et axiomes pouvant être comprises par l'ordinateur (Aimé, 2011; El Ghosh, 2018).

Basées sur la définition de Gruber, plusieurs autres définitions ont été proposées dans la littérature. (Borst, 1997) a légèrement modifié la définition donnée par Gruber en déclarant que : « une ontologie est une spécification formelle d'une conceptualisation partagée ». A la lumière des définitions proposées par Gruber et Borst, Studer et ses co-auteurs (Studer *et al.*, 1998) ont combiné ces deux définitions et ont proposé la suivante : « une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée ». Les auteurs ont expliqué les concepts clés de cette définition comme suit :

- explicite : définition explicite, claire et précise des types de concepts utilisés et les contraintes liées à leur utilisation.
- formelle : l'ontologie doit être compréhensible par une machine.
- partagée : les connaissances captées par une ontologie ne doivent pas être réservées à quelques d'individus, mais plutôt acceptées et partagées par un groupe.

De leur côté, Swartout et ses co-auteurs (Swartout *et al.*, 1996) considèrent que l'ontologie est « un ensemble de termes structurés hiérarchiquement dans le but de décrire un domaine qui peut être utilisé en tant qu'une fondation squelettique pour une base de connaissances ». Guarino (Guarino, 1998), à son tour, avait une vision proche de celle de Swartout et al. mais plus précise : « une ontologie décrit une hiérarchie de concepts liés par des relations de subsomption. Dans des cas plus sophistiqués, des axiomes appropriés sont ajoutés afin d'exprimer d'autres relations entre les concepts et de contraindre leur interprétation prévue ».

À quoi sert une ontologie ?

D'une manière globale, une ontologie sert essentiellement à faciliter la construction d'un modèle de domaine tout en fournissant un vocabulaire composé de termes et de relations (Studer *et al.*, 1998; Fensel, 2001). Plus loin, les ontologies permettent de :

- construire des bases de connaissances cohérentes. (Chandrasekaran *et al.*, 1999) insistent qu'une analyse ontologique efficace d'un domaine particulier clarifie sa structure de connaissance et évite de produire une base de connaissances incohérente.
- partager une compréhension commune de la structure de l'information entre des personnes ayant des besoins et des points de vue différents (Uschold et Gruninger, 1996; Noy et McGuinness, 2001). Les ontologies, en fournissant un vocabulaire unifié au sein d'une organisation, permettent de réduire les confusions conceptuelles et terminologiques et facilitent ainsi la compréhension et la communication partagée entre les personnes ou les agents logiciels (Interopérabilité) (Uschold et Gruninger, 1996).
- réutiliser les connaissances d'un domaine particulier (Chandrasekaran *et al.*, 1999; Noy et McGuinness, 2001). Le partage des connaissances sur un domaine bien déterminé via les ontologies permet d'éliminer le besoin de reproduire le processus d'analyse des connaissances et fait augmenter ainsi le potentiel de réutilisation des connaissances.
- faciliter l'ingénierie des systèmes logiciels dans les côtés qui concernent spécification des besoins, fiabilité et réutilisabilité (Uschold et Gruninger, 1996). Quant à la spécification, l'ontologie fournit une compréhension commune du problème et de la tâche à accomplir. Concernant la fiabilité, l'utilisation des ontologies permet de réaliser un contrôle semi-automatique de la cohérence du logiciel vis à vis la spécification déclarative. Les ontologies peuvent aussi fournir un Framework permettant de déterminer quels aspects ontologiques sont réutilisables entre les domaines d'application des systèmes logiciels.

2.1.2 Composantes d'une ontologie

Selon (Gruber, 1993), les connaissances incluses dans les ontologies sont formalisées à l'aide de cinq types de composants : classes, relations, fonctions, axiomes et instances. Chacun de ces éléments a été énuméré dans (Pérez et Benjamins, 1999).

- Les concepts : appelés aussi classes de l'ontologie, font référence aux abstractions liées à une partie de la réalité (domaine du problème) (Psyché *et al.*, 2003). (Gómez-Pérez, 1999) de son côté, considère qu'un concept « *peut être n'importe quoi à propos duquel on dit quelque chose et, par conséquent, pourrait également être la description d'une tâche, d'une fonction, d'une action, d'une stratégie, d'un processus de raisonnement, etc.* ». L'auteur a ajouté que les concepts peuvent être abstraits ou concrets, élémentaires ou composés, réels ou fictifs.
- Les relations : correspondent aux connexions établies entre les concepts d'un domaine, reflétant ainsi les types d'interactions entre ces concepts. Par exemple, ces relations binaires peuvent exister entre deux concepts : « Sous-classe-de » pour spécifier une relation de généralisation - spécialisation, « Partie-de » pour indiquer une relation de composition - agrégation, etc.

- Les fonctions : constituent un cas particulier de relations. On dit qu'il s'agit d'une fonction lorsque le nième élément de la relation est unique pour les n-1 éléments précédents. Exemple de fonction : « Mère-de ».
- Les axiomes : représentent des affirmations (assertions) qui sont toujours vraies.
- Les instances : « sont utilisés pour représenter des éléments ». Une fois les instances de classes sont créés, l'ontologie constitue ainsi une base de connaissances (Noy et McGuinness, 2001).

2.1.3 Classifications des ontologies

Bien que le rôle principal de la plupart des ontologies est de capturer explicitement les connaissances statiques d'un domaine particulier, elles varient considérablement (Studer *et al.*, 1998). Plusieurs catégories d'ontologies ont été identifiées dans la littérature. Ces catégories sont obtenues suite à une classification selon des dimensions bien déterminées. Le tableau 2.1 présente quelques classifications d'ontologies identifiées dans la littérature. Il expose les dimensions de catégorisation adoptées par les auteurs pour faire la classification des ontologies, ainsi que les types d'ontologies produits.

(Van Heijst *et al.*, 1997) ont proposé une classification des ontologies selon deux dimensions : la quantité et le type de structure de la conceptualisation et l'objet de la conceptualisation. Selon la première dimension, les auteurs identifient trois types d'ontologies : les ontologies terminologiques telles que les lexiques, les ontologies de l'information telles que les schémas de bases de données, et les ontologies de modélisation des connaissances qui spécifient des conceptualisations des connaissances. Selon la deuxième dimension, ils distinguent quatre classes d'ontologies : ontologies de représentation des connaissances, génériques, de domaine et d'application (Gomez-Perez *et al.*, 2004).

(Guarino, 1997; Guarino, 1998) de son côté, a classifié les ontologies selon le niveau de dépendance à l'égard d'une tâche ou d'un point de vue particulier. Cette catégorisation a produit quatre types d'ontologies : de haut niveau, de domaine, de tâches et d'application.

Quant à (Lassila et McGuinness, 2001), elles ont proposé une catégorisation des ontologies selon deux dimensions : les informations que l'ontologie doit exprimer et la richesse de sa structure interne. Leur classification a produit les types d'ontologies suivants : les vocabulaires contrôlés, les glossaires, les thésaurus, les hiérarchies (est-un) informelles, les hiérarchies (est-un) formelles, les instances formelles, les cadres (frames), les ontologies exprimant une restriction de valeurs et les ontologies exprimant des contraintes logiques et générales.

Enfin, (Gomez-Perez *et al.*, 2004) ont récemment proposé une catégorisation des ontologies selon deux dimensions : la richesse de leur structure interne et l'objet de leur conceptualisation. La première dimension est celle qui a été proposée par (Lassila et McGuinness, 2001). La classification des ontologies selon cette dimension a donné les mêmes types d'ontologies (mentionnés ci-dessus). La deuxième dimension étend celle qui a été proposée par (Van Heijst *et al.*, 1997) à travers l'ajout d'autres types d'ontologies déjà identifiés dans la littérature : ontologies de haut niveau, de tâches, de domaine-tâches et de méthodes. Dans ce qui suit, nous allons présenter la

liste des types d'ontologies classifiées selon leur objet de conceptualisation comme indiqué dans (Gomez-Perez *et al.*, 2004; Pérez et Benjamins, 1999). Selon les auteurs, ces types d'ontologies sont considérés les plus couramment utilisés.

- Ontologies de représentation des connaissances (Van Heijst *et al.*, 1997) : saisissent les primitives de représentation utilisées pour formaliser les connaissances sous un paradigme de représentation des connaissances donné.
- Ontologies génériques (Van Heijst *et al.*, 1997) ou communes (Mizoguchi *et al.*, 1995) : sont utilisées pour représenter des connaissances de bon sens réutilisables dans d'autres domaines. Elles incluent le vocabulaire lié aux choses, événements, temps, l'espace, causalité, etc.
- Ontologies de haut niveau ou de niveau supérieur (Guarino, 1998) : elles décrivent des concepts très généraux et fournissent des notions générales, sous lesquelles tous les termes des ontologies existantes devraient être reliés.
- Ontologies de domaine (Mizoguchi *et al.*, 1995; Van Heijst *et al.*, 1997) : sont réutilisables dans un domaine spécifique donné (médical, pharmaceutique, ingénierie, droit, entreprise, automobile, etc.). Elles fournissent des vocabulaires sur les concepts d'un domaine et leurs relations, les activités qui se déroulent dans ce domaine et les théories et les principes élémentaires régissant ce domaine.
- Ontologies de tâches (Mizoguchi *et al.*, 1995; Guarino, 1998) : décrivent le vocabulaire lié à une tâche ou à une activité générique comme le diagnostic, la planification, la vente, etc. Ce type d'ontologies fournit un vocabulaire de termes utilisés pour résoudre des problèmes associés à des tâches qui peuvent appartenir ou non au même domaine.
- Ontologies de domaine-tâches : ce sont des ontologies de tâches réutilisables dans un domaine spécifique, mais pas dans d'autres domaines.
- Ontologies de méthodes : fournit les définitions des concepts et des relations pertinents appliqués pour préciser un processus de raisonnement afin de réaliser une tâche particulière (Tijerino et Mizoguchi, 1993).
- Ontologies d'application (Van Heijst *et al.*, 1997) : contiennent les connaissances nécessaires à la modélisation d'une application particulière. Ce type d'ontologie spécialise le vocabulaire des ontologies de domaine et de tâches pour un domaine bien particulier.

2.1.4 Ingénierie d'ontologie

(Gómez-Pérez, 1999) définit l'ingénierie d'ontologie en tant que « l'ensemble des activités qui concernent le processus de développement de l'ontologie, le cycle de vie de l'ontologie, et les méthodologies, outils et langages pour construire des ontologies ». Dans cette sous-section, nous allons présenter les principales facettes de l'ingénierie d'ontologie.

Critères de conception d'une ontologie

(Gruber, 1995) a affirmé qu'il y a un besoin d'avoir un nombre de critères objectifs afin de guider et évaluer la conception d'une ontologie. Il a ainsi proposé une liste de principes pour la

Auteurs	Dimensions de classification	Types d'ontologies
(Van Heijst <i>et al.</i> , 1997)	Quantité et type de structure de la conceptualisation	Terminologique, de l'information et de modélisation des connaissances
(Guarino, 1997; Guarino, 1998)	Objet de la conceptualisation	De représentation des connaissances, génériques, de domaine et d'application
(Lassila et McGuinness, 2001)	Niveau de dépendance à une tâche ou à un point de vue Informations devant être exploitées	De haut niveau, de domaine, de tâches et d'application Vocabulaires contrôlés, glossaires, thésaurus, hiérarchies informelles, hiérarchies formelles, instances formelles, cadres, ontologies exprimant une restriction de valeurs et ontologies exprimant des contraintes logiques générales
(Gomez-Perez <i>et al.</i> , 2004)	Richesse de la structure interne	Vocabulaires contrôlés, glossaires, thésaurus, hiérarchies informelles, hiérarchies formelles, instances formelles, cadres, ontologies exprimant une restriction de valeurs et ontologies exprimant des contraintes logiques et générales
	Richesse de la structure interne	
	Objet de la conceptualisation	De représentation des connaissances, génériques ou communes, de haut niveau ou de niveau supérieur, de domaine, de tâches, de domaine-tâches, de méthodes et d'application

TABLE 2.1 – Types d'ontologies (Gomez-Perez *et al.*, 2004)

conception d'ontologies, basés sur l'objectif du partage des connaissances et de l'interopérabilité entre les programmes. Selon (Casellas, 2011), cette liste a eu une large acceptation dans la littérature et a été prise en compte par la plupart des auteurs, en l'occurrence, (Ushold, 1996) et (Pérez et Benjamins, 1999). Dans ce qui suit, nous allons présenter une liste de critères de conception d'ontologies élaborée par (Pérez et Benjamins, 1999). Selon les auteurs, ces critères ont prouvé leur utilité dans le processus de développement des ontologies.

- Clarté et objectivité (Gruber, 1995) : l'ontologie doit fournir la signification intentionnelle et prévue des termes définis. Ceci peut être effectué en donnant des définitions objectives des termes ainsi que leur documentation en langage naturel.
- Complétude (Gruber, 1995) : une définition complète, traduite en termes de conditions nécessaires et suffisantes, est préférée à celle qui est exprimée seulement par une condition nécessaire et suffisante (définition partielle).
- cohérence (Gruber, 1995) : une ontologie doit permettre des inférences qui sont conformes aux définitions. En d'autres termes, si une phrase qui peut être déduite des axiomes contredit une définition ou un exemple donné de manière informelle (en langage naturel), alors l'ontologie est considérée incohérente.
- Extensibilité monotone maximale (Gruber, 1995) : de nouveaux termes doivent pouvoir être définis dans l'ontologie sans avoir le besoin de réviser les définitions qui existent déjà.
- Engagements ontologiques minimaux (Gruber, 1995) : afin de soutenir les activités prévues de partage des connaissances, une ontologie devrait exiger un engagement ontologique minimal et suffisant. En d'autres termes, une ontologie devrait faire le moins de revendications possible sur le monde modélisé, de façon à permettre aux parties engagées dans l'ontologie la liberté de spécialiser et d'instancier l'ontologie selon leurs besoins.
- Principe de distinction ontologique (Borgo *et al.*, 1996) : disjonction des classes d'une ontologie.
- Diversification des hiérarchies (Arpirez *et al.*, 1998) : ce critère sert à accroître la puissance du mécanisme d'héritage multiple. Dans un contexte où suffisamment de connaissances sont représentées dans une ontologie ainsi qu'autant de critères de classification différents sont utilisés, il sera plus abordable d'insérer de nouveaux concepts par des liens d'héritages multiples.
- Modularité (Bernaras, 1996; Arpirez *et al.*, 1998) : ce critère sert à minimiser le couplage entre les modules d'une ontologie pour permettre plus de flexibilité et de variété d'usages.
- Minimisation de la distance sémantique entre les concepts frères de mêmes parents (Arpirez *et al.*, 1998) : ceci peut être effectué via le regroupement des concepts similaires, leurs représentations en tant que des sous-classes d'une classe et leurs définitions en utilisant les mêmes primitives.
- Normalisation des noms (Arpirez *et al.*, 1998) : ce critère insiste sur la standardisation, autant que possible, des noms utilisés dans une ontologie, à savoir les noms des relations.

Approches de conception d'une ontologie

Selon (Holsapple et Joshi, 2002), il existe cinq approches de conception d'ontologie :

- Approche inspirante : basée sur des créativités individuelles et des opinions personnelles.
- Approche inductive : l'ontologie est créée par l'observation et l'analyse d'un cas particulier dans un domaine particulier.
- Approche déductive : elle applique des principes généraux relatives à un domaine et les adapte en fonction d'un cas particulier.
- Approche synthétique : elle identifie tout d'abord un ensemble d'ontologies, puis les synthétise avec d'autres concepts liés.
- Approche collaborative : elle implique des points de vue de plusieurs individus sur un domaine d'application, éventuellement couplés à une ontologie initiale considérée comme un point de départ.

Méthodologies de construction d'une ontologie

Les méthodologies de construction d'ontologies traitent les problèmes qui concernent comment fournir des lignes directrices et des conseils aux développeurs d'ontologies (Sure *et al.*, 2009). Plusieurs méthodologies de construction d'ontologies ont été identifiées dans la littérature et ont été synthétisées dans plusieurs travaux (Fernández-López, 1999; Pérez et Benjamins, 1999; Gomez-Perez *et al.*, 2004; Breitman *et al.*, 2007; Casellas, 2011). Nous présentons, dans ce qui suit, une liste non exhaustive des méthodologies d'ingénierie d'ontologies citées autant de fois dans la littérature.

La méthodologie proposée par Grüninger et Fox Sur la base de leurs expériences acquises depuis la construction des ontologies du projet « TOVE », (Grüninger et Fox, 1995) ont proposé une méthodologie de construction et d'évaluation des ontologies. Le projet « TOVE » se rapporte sur le domaine des entreprises (modélisation des processus et activités métiers). Comme indiqué dans la figure 2.1, la méthodologie proposée est constituée de six étapes :

1. Identifier des scénarios motivants liés au développement de l'ontologie et à son application.
2. Définir les exigences de l'ontologie à travers l'élaboration d'un ensemble de questions de compétence informelles auxquelles l'ontologie doit répondre.
3. Spécifier la terminologie de l'ontologie (concepts, attributs et relations) via le langage de la logique du premier ordre.
4. Élaborer les questions de compétence d'une manière formelle en utilisant le langage de la logique du premier ordre.
5. Spécifier les définitions des termes de l'ontologie et les contraintes sur la terminologie en utilisant les axiomes écrits en langage de la logique du premier ordre.
6. Vérifier la complétude de l'ontologie en établissant les conditions permettant de caractériser l'ontologie comme complète, sur la base des questions de compétence formelles.

La méthodologie proposée par Uschold et ses collègues En se basant sur l'expérience acquise dans la construction de l'ontologie « the Enterprise Ontology » dans le cadre du projet « the Enterprise Project » de l'université de Edinburgh, (Uschold et King, 1995) ont proposé

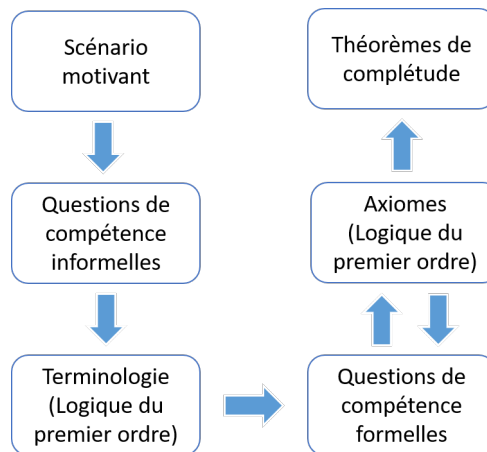


FIGURE 2.1 – Procédure de conception et d'évaluation d'ontologie (Grüninger et Fox, 1995)

une méthodologie « complète » pour le développement des ontologies. Cette méthodologie, étendue dans (Uchold et Gruninger, 1996), se compose de quatre étapes différentes comme le montre la figure 2.2 :

1. Identifier l'objectif et la portée de l'ontologie : déterminer les raisons pour lesquelles l'ontologie sera construite et la portée de ses utilisateurs prévus.
2. Construire l'ontologie : cette étape comporte elle-même trois sous-étapes.
 - (a) Capturer : identifier les concepts et les relations clés du domaine d'étude, produire leurs définitions textuelles d'une manière précise et non ambiguë et identifier les termes qui font référence à ces concepts et relations.
 - (b) Coder : formaliser les concepts et les relations.
 - (c) Intégrer des ontologies existantes : remettre en question la possibilité de réutiliser des ontologies existantes.
3. Évaluer l'ontologie : utiliser des critères techniques pour vérifier la spécification, en utilisant des questions de compétence et des validations du monde réel.
4. Documenter l'ontologie : établir des lignes directrices pour documenter l'ontologie. La documentation se diffère selon le type et l'objectif de l'ontologie.

La méthodologie METHONTOLOGY Cette méthodologie a été développée au sein du Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Université Polytechnique de Madrid. *Methontology* (Fernández-López *et al.*, 1997; Gómez-Pérez, 1998; Lopez *et al.*, 1999; Fernández-López, 1999) permet la construction d'ontologies à partir de zéro. Elle est principalement descriptive, étant donné qu'elle suggère les activités à accomplir lors de la construction d'ontologies, mais elle ne fournit pas d'indications sur la manière dont elles doivent être réalisées. *Methontology* inclut trois catégories d'activités comme l'indique la figure 2.3 :

- Activités de gestion de projet : comprennent la planification, le contrôle et l'assurance qualité des tâches à effectuer. Quant à la planification, elle permet d'identifier les tâches à

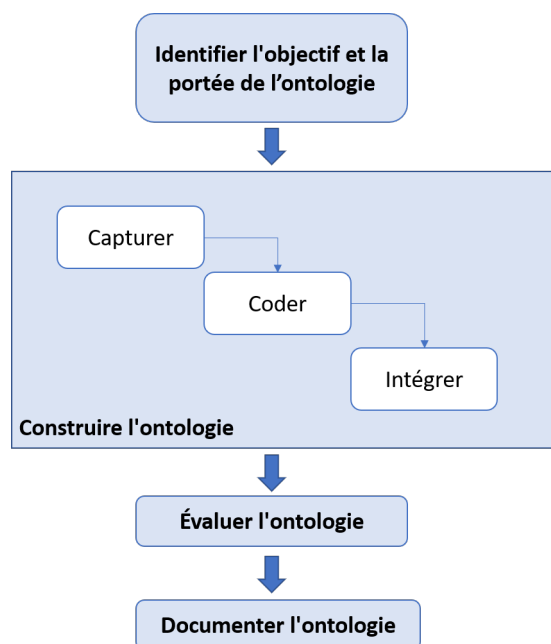


FIGURE 2.2 – Méthodologie de construction d’ontologies proposée par (Uschold et King, 1995; Uschold et Gruninger, 1996)

accomplir, la manière dont elles seront organisées, le temps et les ressources nécessaires à leur réalisation. La vérification de la manière dont les tâches prévues sont exécutées est incluse parmi les activités de contrôle. L’assurance qualité implique la vérification de la qualité des produits réalisés (ontologie, documentation, etc.).

- Activités axées sur le développement : incluent la spécification, la conceptualisation, la formalisation, l’implémentation et la maintenance. Quant à la spécification, elle implique la détermination des objectifs et la portée de l’ontologie. La conceptualisation implique l’obtention et l’organisation des concepts pertinents du domaine d’étude au sein de l’ontologie. Concernant la formalisation, elle transforme le modèle conceptuel, développé au cours de l’étape précédente, en un modèle formel ou semi-formel en utilisant la logique de description par exemple. L’écriture de l’ontologie dans un langage compréhensible par la machine constitue l’étape de l’implémentation. La maintenance quant à elle, met à jour et corrige l’ontologie afin d’éviter son obsolescence et assurer son évolution.
- Activités de soutien : incluent des activités réalisées simultanément avec les activités de développement. Elles comprennent l’acquisition de connaissances d’un domaine particulier, l’évaluation technique par rapport à un cadre de référence, l’intégration d’ontologies existantes, la documentation pour faciliter la maintenance et la réutilisation et la gestion de la configuration via l’enregistrement des versions de la documentation, codes d’ontologies, etc.

La méthodologie On-To-Knowledge (OTKM) Selon (Gomez-Perez *et al.*, 2004), la méthodologie *On-To-Knowledge*, proposée par (Staab *et al.*, 2001) et détaillée dans (Sure *et al.*,

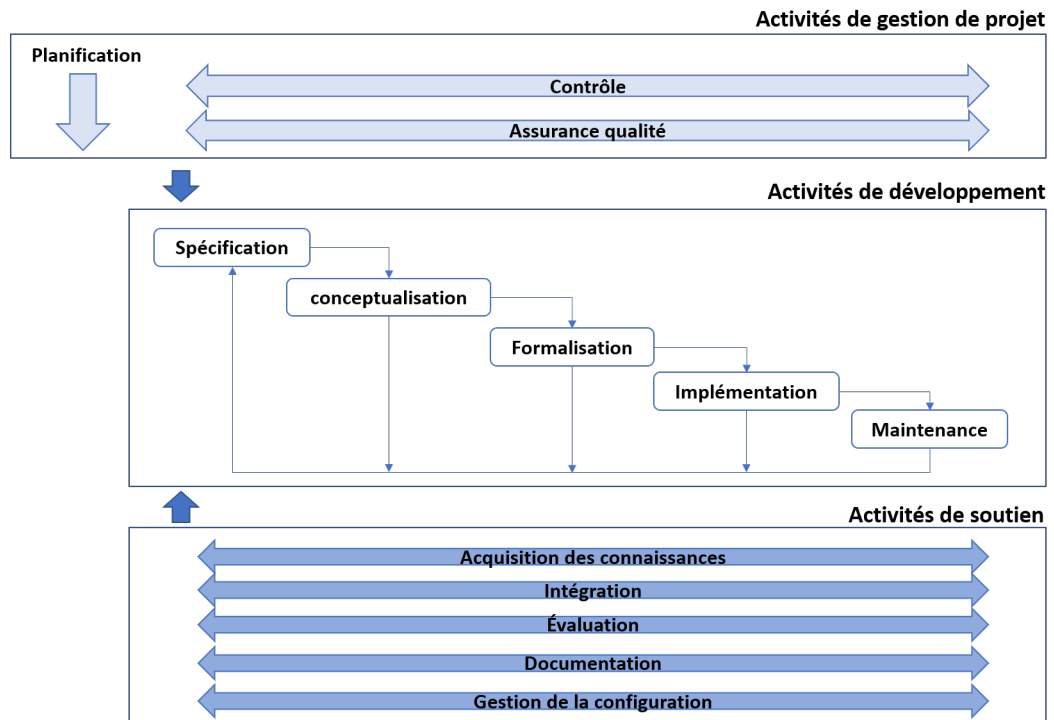


FIGURE 2.3 – La méthodologie de construction d'ontologies METHONTOLOGY (Fernández-López *et al.*, 1997; Gomez-Perez *et al.*, 2004)

2004), a été conçue pour construire des ontologies qui vont être utilisées par des applications de gestion de connaissances. Par conséquent, une ontologie développée via cette méthodologie est fortement dépendante de l'application qui va l'utiliser. Le processus méthodologique d'*On-To-Knowledge* inclut cinq étapes comme le montre la figure 2.4 :

1. **Étude de faisabilité** : cette étude est appliquée à toute l'application et doit donc être réalisée avant de développer les ontologies.
2. **Lancement** : cette étape aboutit à un document de spécification des exigences de l'ontologie. Ce document contient plusieurs informations : l'objectif, le domaine et la portée de l'ontologie, les directives de conception (les conventions d'appellation par exemple), les sources de connaissances (livres, interviews, etc.), les utilisateurs et les scénarios d'utilisation potentiels et les questions de compétence. En outre, une description semi-formelle de l'ontologie (sous forme d'une carte mentale par exemple) sera obtenu à la fin de processus.
3. **Raffinement** : cette étape consiste à l'acquisition des connaissances à l'aide des experts du domaine ainsi que et leur formalisation. Le but de cette étape est d'aboutir à une ontologie cible mature et orientée application selon la spécification donnée dans le processus de lancement.
4. **Évaluation** : vérifier si l'ontologie satisfait aux exigences et peuvent répondre aux questions de compétence, ainsi que tester l'ontologie dans son environnement d'application cible. L'étape d'évaluation est étroitement liée à l'étape de raffinement. Plusieurs cycles sont

nécessaires afin que l'ontologie cible atteigne le niveau envisagé.

5. Maintenance : les ontologies doivent être mises à jour afin de refléter les changements du monde réel.

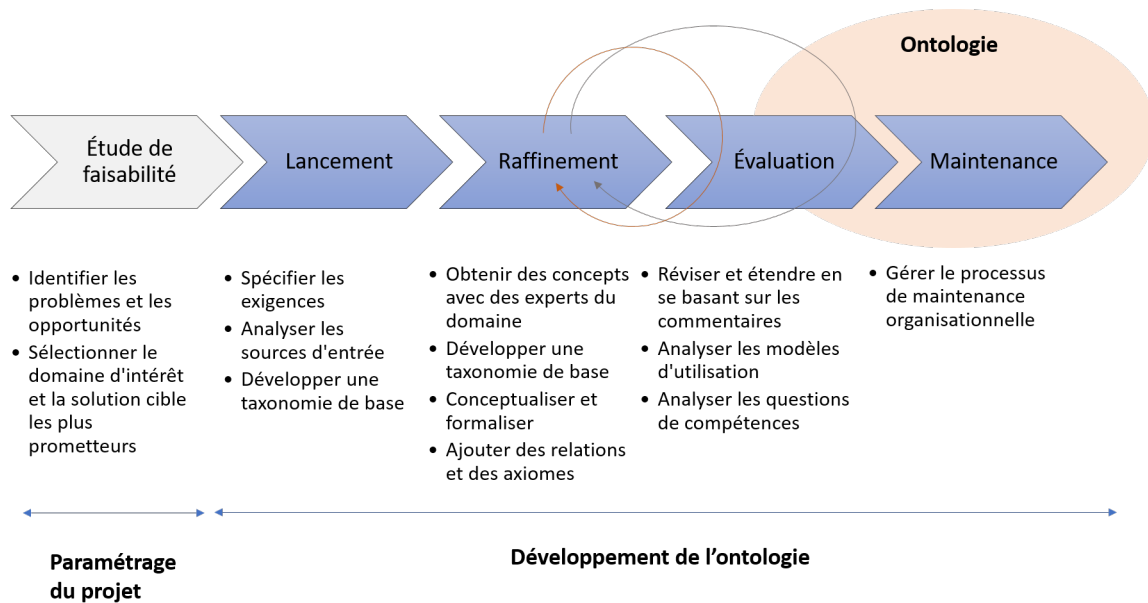


FIGURE 2.4 – La méthodologie de développement d'ontologies On-To-Knowledge (Staab *et al.*, 2001)

La méthodologie NeOn La méthodologie NeOn a été proposée dans le cadre du projet NeOn pour la construction d'ontologies et de réseaux d'ontologies. Il s'agit d'une méthodologie basée sur des scénarios qui permet les aspects collaboratifs du développement d'ontologies et l'évolution dynamique des réseaux d'ontologies. L'objectif de ce cadre est d'accélérer le processus de construction de l'ontologie en réutilisant les ressources de connaissances disponibles (ressources ontologiques et non ontologiques). La méthodologie NeOn inclut les composants suivants (Suárez-Figueroa *et al.*, 2012)

- Le glossaire NeOn : identifie et définit les processus et les activités potentiellement impliqués dans la construction du réseau d'ontologies.
- Un ensemble de neuf scénarios : Chacun de ces scénarios est décomposé en différents processus et activités tirés de ceux inclus dans le glossaire NeOn.
- Deux modèles de cycle de vie de réseau d'ontologies : spécifient comment organiser les processus et les activités du glossaire NeOn en phases.
- Un ensemble de directives méthodologiques pour les processus et les activités.

Langages formels pour la représentation des ontologies

Le choix du langage d'implémentation de l'ontologie est l'une des décisions clés à prendre dans le processus de développement de l'ontologie. Plusieurs langages d'implémentation d'ontologies ont été identifiés dans la littérature. Ces langages peuvent être classifiés en deux catégories : ceux qui sont basés sur l'intelligence artificielle et ceux qui sont basés sur le Web (Gomez-Perez *et al.*, 2004). Les langages d'ontologie basés sur l'intelligence artificielle ont vu le jour au début des années 90. Ces langages ont été bâtis sur plusieurs paradigmes de représentation des connaissances (Corcho *et al.*, 2003; Gomez-Perez *et al.*, 2004; Corcho *et al.*, 2006) :

- La logique du premier ordre. Exemple de langage : KIF (*Knowledge Interchange Format*) (Genesereth *et al.*, 1992).
- Les Frames combinés avec la logique du premier ordre. Exemples de langages : CycL (Lenat et Guha, 1989), Ontolingua (Gruber, 1992; Farquhar *et al.*, 1997), FLogic (Kifer *et al.*, 1995) et OCML (Motta, 1999).
- La logique de description. Exemple de langage : LOOM (MacGregor, 1991).

L'expansion du réseau Internet a conduit à la création des langages d'ontologie basés sur le Web (*Web-based ontology languages*), appelés aussi langages de balisage d'ontologie (*ontology markup languages*), afin d'exploiter les caractéristiques du Web (Corcho *et al.*, 2003). Leur syntaxe est basée sur des langages de balisage tels que HTML (*HyperText Markup Language*) (Raggett *et al.*, 1999) et XML (*Extensible Markup Language*) (Bray *et al.*, 1997). Selon (Corcho *et al.*, 2006), les langages de balisage d'ontologie les plus importants sont : SHOE (*Simple HTML Ontology Extension*) (Luke et Heflin, 2000), XOL (*Ontology Exchange Language*) (Karp *et al.*, 1999), RDF (*Resource Description Framework*) (Lassila *et al.*, 1998), RDF Schema (Brickley et Guha, 2004), OIL (*Ontology Inference Layer*) (Fensel *et al.*, 2000), DAML+OIL (*DARPA Agent Markup Language + Ontology Inference Layer*) (Horrocks *et al.*, 2002) et OWL (*Web Ontology Language*) (Dean *et al.*, 2004). La figure 2.5 illustre les relations entre ces langages. Dans ce qui suit, nous allons décrire les langages de balisage d'ontologie actuellement soutenus : RDF, RDF Schema et OWL (Corcho *et al.*, 2006).

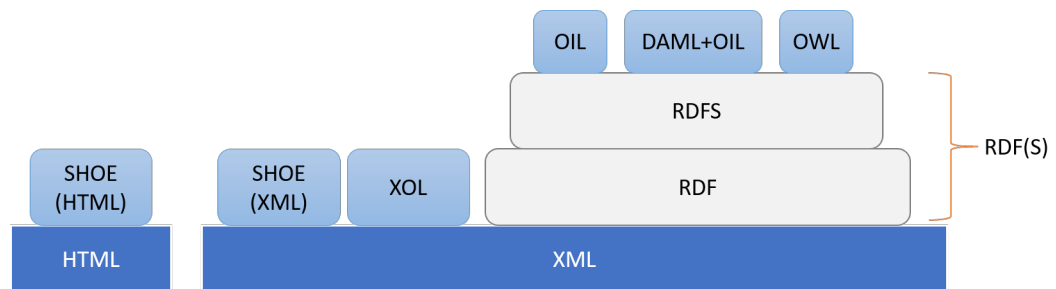


FIGURE 2.5 – Pile de langages de balisage d'ontologie, adapté de (Corcho *et al.*, 2003)

- **RDF** : développé par le W3C (*World Wide Web Consortium*)¹ en tant qu'un langage à base de réseaux sémantiques pour décrire les ressources du Web. Cette description est encodée

1. <https://www.w3.org/>

en ensembles de triplets : sujet (une ressource), prédicat (une propriété ou une relation), objet (une ressource ou une valeur) (Casellas, 2011).

- **RDF Schema** : développé par le W3C en tant qu’une extension de RDF avec des primitives basées sur les Frames. Contrairement à RDF, le langage RDF Schema (*RDF Vocabulary Description Language*) offre plus d’expressivité via des mécanismes de définition des relations entre les propriétés et les ressources (Gomez-Perez *et al.*, 2004). Le terme RDF(S) est couramment utilisé pour désigner la combinaison de RDF et RDF Schema comme indiqué dans la figure 2.5. Selon (Corcho *et al.*, 2003), RDF(S) a permis la représentation des concepts, des taxonomies des concepts et des relations binaires. Les auteurs ont ajouté que bien que RDF(S) n’est pas très expressif, il a établi les bases du Web sémantique (Berners-Lee *et al.*, 2001).
- **OWL** : est le fruit du travail réalisé par le groupe de travail *Web-Ontology (WebOnt) Working Group*² formé par le W3C en 2001 en vue de développer un nouveau langage de balisage d’ontologie pour le Web sémantique. En effet, ce langage, formellement recommandé par le W3C en 2004, offre plus d’expressivité pour décrire des ontologies structurées (disjonction de classes, union ou équivalence, etc.) pouvant être utilisées par différents systèmes en vue d’améliorer la précision des recherches sur le Web, partager des informations, définir des termes ou décrire et représenter un domaine (Casellas, 2011). OWL est divisé en trois couches :
 - OWL Lite : utilisé dans le contexte d’une simple modélisation. Il offre la possibilité de représenter des contraintes simples (contraintes de cardinalité) et des hiérarchies.
 - OWL DL : offre une expressivité supplémentaire par rapport à OWL Lite en utilisant la logique de description (Baader *et al.*, 2003), tout en conservant une garantie de calcul (toutes les conclusions vont être inférées par le raisonneur dans un intervalle de temps fini).
 - OWL Full : offre une expressivité maximale mais sans garantie de calcul (le raisonnement complet de toutes les fonctionnalités de OWL Full par un raisonneur n’est pas garantie).

Une révision du langage OWL, motivée par le manque de plusieurs constructions souvent nécessaires pour modéliser des domaines complexes, a abouti à la création du standard **OWL 2** (Grau *et al.*, 2008). OWL 2 a ajouté plusieurs fonctionnalités par rapport à OWL telles que les propriétés réflexives et disjointes, des capacités d’annotation améliorées, des types de données plus riches, etc.

Outils de développement d’ontologies

La construction des ontologies n’est aucunement une tâche simple à réaliser (Mizoguchi et Kozaki, 2009). A part les méthodologies de construction, les développeurs d’ontologies ont besoin d’environnements ou d’outils intégrés robustes qui peuvent leur donner un soutien technologique dans la plupart des activités du cycle de vie de l’ontologie. Différents outils et environnements de développement d’ontologies existent dans la littérature, prenant en charge le processus

2. <https://www.w3.org/2001/sw/WebOnt/>

de construction d'ontologies. Nous avons choisi de présenter brièvement quelques outils récents d'ingénierie d'ontologies :

- **Protégé** (Noy *et al.*, 2001; Gennari *et al.*, 2003) : plateforme open source développée par *Stanford Center for Biomedical Informatics Research* au sein de l'université de Stanford. Elle dote d'une bibliothèque de modules ou (*plugins*) qui peuvent ajouter plus de fonctionnalités à la plateforme. Protégé permet de réaliser plusieurs tâches telles que la création, le chargement, la visualisation, et la sauvegarde d'ontologies en plusieurs formats (par exemple RDF et OWL2). Cette plateforme, encore soutenu par l'université de Stanford, existe en plusieurs versions (par exemple la version 5.5.0 publiée en 2019).
- **Hozo** (Kozaki *et al.*, 2002; Mizoguchi *et al.*, 2007) : un outil pour construire des ontologies dans un environnement distribué développé par *Mizoguchi Lab* . Il se compose d'un éditeur d'ontologie pour la construction et l'utilisation d'ontologies, un serveur d'ontologie pour et un gestionnaire d'ontologie. L'éditeur sert à construire et utiliser les ontologies. Le gestionnaire gère des projets dans lesquels plusieurs ontologies sont construites en collaboration dans un environnement distribué. Le serveur sert à sauvegarder les ontologies et fournir des API aux clients.
- **NeOn Toolkit** (Haase *et al.*, 2008) : un environnement d'ingénierie d'ontologie extensible, développé dans le cadre du projet européen *NeOn*. Le but de ce projet était d'améliorer la capacité à gérer plusieurs ontologies en réseau qui ont été créées en collaboration et qui peuvent être très dynamiques et en évolution constante. Cet outil offre plusieurs plugins afin d'effectuer plusieurs activités d'ingénierie d'ontologie comme par exemple l'annotation et la documentation, le développement, l'évaluation, etc. La dernière version de NeOn Toolkit date depuis l'année 2011.

2.1.5 Similarité sémantique entre concepts

L'évaluation de la similarité sémantique entre concepts est une tâche importante et constitue un problème commun pour les applications issues de la « linguistique computationnelle » et de l'intelligence artificielle telles que le traitement automatique du langage naturel, l'acquisition des connaissances et notamment la recherche d'information (Jiang *et al.*, 2015). En effet, la similarité sémantique mesure le degré de proximité taxonomique entre les concepts (termes ou mots). Selon (Sánchez *et al.*, 2012), elle indique à quel point deux concepts sont taxonomiquement proches, car ils partagent certains aspects de leur signification. Une mesure appropriée de la similarité sémantique entre concepts peut améliorer la compréhension des ressources textuelles et augmenter la précision des applications à base de connaissances telles que les applications basées sur le raisonnement à partir de cas.

Les ontologies ont constitué le centre d'intérêt de la plupart des travaux de recherche traitant les mesures de similarité sémantique. C'est à cause de leurs structures qui peuvent être exploitées pour mesurer le degré de proximité sémantique entre les termes (Sánchez *et al.*, 2012). Ainsi, plusieurs méthodes de mesure de la similarité sémantique entre concepts d'une ontologie ont été identifiées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois familles (Petraakis *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2012; Gan *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2015) :

Mesures basées sur les arcs

Ces mesures permettent de calculer la longueur du chemin le plus court (*minimum path length*) reliant des concepts d'une ontologie via des liens de type *is-a* (est-un). La longueur du chemin est déterminé par le nombre d'arcs séparant deux concepts (Rada *et al.*, 1989). En d'autres termes, plus le chemin est long, plus les concepts ontologiques sont sémantiquement éloignés. Il existe plusieurs méthodes de mesure de similarité sémantique appartenant à cette catégorie. Nous présentons ci-dessous les méthodes les plus citées dans la littérature.

Soit $path(a, b) = l_1, l_2, \dots, l_k$ un ensemble de liens connectant deux termes a et b dans une taxonomie. Soit $|path(a, b)| = k$ la longueur de ce chemin. Puis, en considérant tous les chemins possibles ($path_i$) de a à b , leur distance sémantique comme définie par (Rada *et al.*, 1989) est :

$$dis_{Rad}(a, b) = \min_{\forall i} |path_i(a, b)|$$

(Wu et Palmer, 1994) ont apporté des améliorations sur la mesure de similarité définie par (Rada *et al.*, 1989). En effet, ils ont proposé une mesure de similarité sémantique qui tient compte de la profondeur des termes dans une taxonomie en plus de la distance absolue qui sépare ces deux termes. Plus spécifiquement, leur mesure de similarité compte (1) le nombre de liens de type *is-a* (N_1 et N_2) à partir du terme jusqu'à leur ancêtre commun le plus spécifique (*Least Common Subsumer* ou *LCS*) (l'ancêtre taxonomique le plus concret qui subsume les deux termes) et (2) le nombre de liens de type *is-a* du *LCS* jusqu'à la racine de l'ontologie (N_3).

$$sim_{W\&P} = \frac{2 \times N_3}{N_1 + N_2 + 2 \times N_3}$$

Bien que les mesures de similarité basées sur les arcs sont simples à mettre en œuvre et ne nécessitent pas un coût de calcul élevé, elles présentent un nombre d'inconvénients. Parmi ces limites, nous mentionnons que ces méthodes tiennent seulement en compte du chemin le plus court entre une paire de concepts. Par conséquent, la performance de ces méthodes peut être réduite dans le cas où elles sont appliquées dans des ontologies détaillées qui peuvent intégrer plusieurs héritages taxonomiques. Ainsi, plusieurs chemins taxonomiques risquent de ne pas être pris en compte (Sánchez *et al.*, 2012). En outre, les mesures basées sur les arcs admettent que tous les liens dans une taxonomie représentent une distance uniforme. Or, en pratique, ce n'est pas toujours le cas car les relations de généralisation/spécialisation dans une ontologie dépendent du degré de granularité implémenté par l'ingénieur de connaissances (Sánchez *et al.*, 2012).

Mesures basées sur le contenu informationnel

Visant à combler les insuffisances des méthodes basées sur les arcs, (Resnik, 1995) a proposé de compléter la structure taxonomique d'une ontologie par la distribution d'information des concepts évalués dans des corpus. Il a exploité la notion du contenu informationnel (*Information Content* ou *IC*) (quantité d'information partagée par deux concepts) en associant à chaque concept de la taxonomie, des probabilités d'apparition calculées à partir de leurs occurrences dans un corpus donné. Selon cet auteur, le contenu informationnel d'un concept a est égal à au log négatif de

sa probabilité d'occurrence : $IC(a) = -\log P(a)$. Ceci signifie que les concepts les moins fréquents sont les plus informatifs. Selon (Resnik, 1995), la similarité sémantique entre deux concepts dépend de la quantité d'information partagée entre deux concepts. En d'autres termes, elle dépend de la quantité d'information de leur ancêtre commun le plus spécifique. Ainsi, la similarité entre deux concepts a et b est égale à :

$$sim_{Res}(a, b) = IC(LCS(a, b))$$

(Lin, 1998) a proposé des améliorations de la mesure de similarité proposée par (Resnik, 1995) par la prise en compte du contenu informationnel des concepts à évaluer, en plus de celui de leur ancêtre commun le plus spécifique :

$$sim_{Lin}(a, b) = \frac{2 \times sim_{Res}(a, b)}{IC(a) + IC(b)}$$

Selon (Sánchez *et al.*, 2012), l'inconvénient majeur des approches de calcul de similarité sémantique basées sur le contenu informationnel est la nécessité d'avoir de grandes ontologies ayant une structure taxonomique détaillée pour pouvoir différencier les contenus informationnels des concepts.

Mesures basées sur les caractéristiques

Ces mesures tiennent en compte du degré de chevauchement entre les ensembles des caractéristiques ontologiques. Selon (Jiang *et al.*, 2015), ces caractéristiques incluent, généralement, les informations taxonomiques et non taxonomiques modélisées dans une ontologie, en plus des descriptions de concepts (par exemple les glossaires) extraites des dictionnaires. Plus spécifiquement, les mesures de similarité basées sur les caractéristiques évaluent la similarité entre les concepts en fonction de leurs propriétés (leurs caractéristiques communes et non communes) (Sánchez *et al.*, 2012). Basée sur le modèle de (Tversky, 1977), la similarité basée sur les caractéristiques entre concepts tend à être augmentée par les caractéristiques communes tandis qu'elle tend à être diminuée par les caractéristiques non communes. Formellement, soient $\psi(a)$ et $\psi(b)$ les caractéristiques des deux termes a et b respectivement, $\psi(a) \cap \psi(b)$ l'intersection de ces deux ensembles de caractéristiques, et $\psi(a) \setminus \psi(b)$ l'ensemble obtenu après avoir éliminé les éléments de $\psi(b)$ de l'ensemble des caractéristiques du concepts a , $\psi(a)$. La similarité entre les concepts a et b , selon (Tversky, 1977), est :

$$sim_{Tve}(a, b) = \alpha \cdot F(\psi(a) \cap \psi(b)) - \beta \cdot F(\psi(a) \setminus \psi(b)) - \gamma \cdot F(\psi(b) \setminus \psi(a))$$

où F est une fonction qui reflète la saillance d'un ensemble de caractéristiques, α , β et γ sont des paramètres qui pondèrent la contribution de chaque composant.

(Sánchez *et al.*, 2012) affirment que les mesures de similarité sémantique basées sur les caractéristiques exploitent mieux les connaissances sémantiques que celles basées sur les arcs, et ce en évaluant les caractéristiques communes et non communes des concepts évalués. Cependant, en plus des relations taxonomiques, ces mesures reposent sur des caractéristiques telles que les glossaires (*glosses*) et les synonymes (*synsets*) rarement modélisés dans des ontologies de domaine

(Ding *et al.*, 2004). Ceci limite donc l'applicabilité de ces méthodes qu'aux ontologies possédant ce genre d'information. Il est à noter que les méthodes basées sur les caractéristiques peuvent être utilisées dans des ontologies qui ont seulement modélisé des relations taxonomiques (Sánchez *et al.*, 2012).

Notons qu'il existe des méthodes hybrides pour la mesure de la similarité sémantique. Ces méthodes combinent les différentes approches de mesure de similarité mentionnées ci-dessus. Elles considèrent à la fois la structure de l'ontologie, le contenu informationnel des concepts et le profondeur de l'ancêtre commun le plus spécialisé (Petrakis *et al.*, 2006; Gan *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2015).

2.2 Ontologies pour la représentation des situations de crise

L'utilisation des ontologies s'est développée dans le domaine de la gestion des crises car elles permettent principalement de relever les défis de l'interopérabilité et du partage des informations entre les différentes parties prenantes impliquées dans un scénario de gestion de crise (Liu *et al.*, 2013). Dans cette section, nous allons décrire un nombre d'ontologies proposées dans la littérature ayant pour objectif la représentation des situations de crise. Ensuite, nous allons synthétiser et comparer ces travaux pour pouvoir les positionner et recenser d'éventuels limites.

2.2.1 Travaux connexes

Nous avons identifié plusieurs modèles ontologiques proposés dans la littérature pour la représentation des situations de crise. Nous avons distingué deux familles d'ontologies selon l'objectif principal envisagé. La première famille inclut des ontologies qui servent essentiellement à assurer une interopérabilité sémantique et un échange d'informations entre les parties prenantes via leurs vocabulaires. La deuxième famille englobe des ontologies qui servent comme bases de connaissances de systèmes d'aide à la décision pour la génération d'une solution de réponse à une crise. Dans cette section, nous allons décrire les travaux identifiés dans la littérature tout en focalisant sur les éléments représentés dans chaque ontologie. Nous allons commencer par présenter les modèles ontologiques de la première famille.

Afin de soutenir l'interopérabilité entre les répondants à une crise, (Elmhadhbi *et al.*, 2019) ont développé une ontologie modulaire de domaine, appelée *POLARISCO*, qui s'inscrit dans le cadre du projet français *POLARISC*. Ce projet vise à la création d'une solution logicielle interopérable et permettant un échange fiable et efficace d'informations entre les intervenants dans un contexte de réponse à une crise. Le développement de l'ontologie *POLARISCO* s'est basé principalement sur deux ontologies de haut niveau : *Basic Formal Ontology (BFO)* et *Common Core Ontology (CCO)*. L'ontologie proposée représente essentiellement le personnel intervenant dans la réponse à une crise, y compris la police, la protection civile, la gendarmerie, les autorités publiques et les services médicaux. Selon les auteurs, chacun de ces éléments est représenté dans un module

à part afin d'assurer leur réutilisation dans le futur. Néanmoins, l'ontologie *POLARISCO* n'a pas modélisé les dommages qui peuvent être causés par une crise.

Dans le but de soutenir la coordination des différentes agences et services dans la réponse à une crise, (Santos *et al.*, 2019) ont proposé une ontologie qui permet de représenter les connaissances sur les types des événements majeurs, les actions à entreprendre et les ressources nécessaires pour la réponse. Selon les auteurs, leur ontologie peut être considérée comme une extension du méta-modèle *BFiaO* (*Basic Formal infrastructure incident assessment Ontology*). Toutefois, bien que cette ontologie s'inscrive dans le domaine de réponse à une crise, elle ne spécifie pas suffisamment les caractéristiques d'une situation d'urgence et les acteurs impliqués dans l'opération de réponse, ainsi qu'elle ne représente pas les impacts causés par un désastre.

(Barros *et al.*, 2015) ont développé l'ontologie *EDXL-RESCUER* en tant que le modèle conceptuel du projet *RESCUER*³ qui vise à soutenir les forces de sécurité dans les situations d'urgence. Leur ontologie a été développée pour résoudre les problèmes d'interopérabilité entre les systèmes existants et le projet *RESCUER*.

MOAC (*Management Of a Crisis Vocabulary*) (Ortmann *et al.*, 2011) est un vocabulaire léger et pertinent qui fournit des termes permettant aux praticiens et aux professionnels de relier les activités de gestion de crise sous forme de données liées. Le vocabulaire *MOAC* a été créé pour publier les données des agences humanitaires en tant que source ouverte au lieu de les conserver dans des feuilles de calcul, des PDF ou des documents Word. Pour réaliser ce travail, de nombreuses contributions ont été apportées par différentes parties prenantes : le *Global Shelter Cluster*⁴, le Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires (*UN OCHA*)⁵ et la plateforme *Ushahidi*⁶.

Afin d'effectuer un échange efficace des informations entre les organisations impliquées dans la gestion des crises ayant chacun un vocabulaire différent, (Babitski *et al.*, 2009) ont développé un ensemble d'ontologies qui couvrent la description des dommages, des ressources et les liens établis entre eux. Leur ontologie constitue une partie d'un prototype qui vise à intégrer les informations provenant de différentes parties prenantes.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les ontologies de la deuxième famille.

(Liu *et al.*, 2021) ont proposé un modèle conceptuel de connaissances pour la réponse aux urgences liées aux risques géologiques. Leur modèle, basé sur une ontologie, permet de fournir au gestionnaire de crise des connaissances utiles pour la réponse à une crise. Les auteurs ont proposé trois types de connaissances pour créer leur modèle ontologique : les entités de réponse à une urgence, les processus de réponse à une urgence et les règles de gestion. Selon les auteurs, les entités de réponse à une urgence sont des objets impliqués dans la réponse à un risque géologique. Elles incluent notamment des événements d'urgence, des environnements d'urgence, des organisations d'urgence et des ressources d'urgence. Concernant le processus de réponse à une urgence, il est représenté principalement par des tâches d'urgence (actions). Concernant les règles de gestion, elles

3. <http://www.rescuer-project.org/> (dernier accès le 01/06/2021)

4. <https://www.sheltercluster.org/> (dernier accès le 01/06/2021)

5. <https://www.unocha.org/> (dernier accès le 01/06/2021)

6. <https://www.usahidi.com/> (dernier accès le 01/06/2021)

peuvent être utilisées pour analyser et déduire les mesures d'urgence à prendre en fonction de la situation de crise actuelle. Cependant, l'ontologie proposée n'a pas représenté les dommages et les entités vulnérables et n'a pas spécifié une taxonomie des ressources et du personnel d'intervention.

Dans (Yu *et al.*, 2020a), les auteurs ont proposé une méthode de modélisation des risques à l'aide des ontologies et le raisonnement à partir de cas. Leur modèle est utilisé pour préparer les mesures appropriées aux risques engendrés par des désastres en cascade (un désastre qui déclenche une autre). Une fois un scénario de désastre, représenté par une ontologie, est récupéré à l'aide du RàPC, le preneur de décisions adapte le modèle ontologique à la situation de risque actuelle afin de générer un plan approprié de préparation. Le modèle ontologique proposé est basé essentiellement sur une ontologie de domaine et une ontologie de tâche. L'ontologie de domaine sert à représenter les connaissances liées aux risques, porteurs de risque et environnements urbains à risque. L'ontologie de tâche représente les éléments constituant un plan de réponse aux risques de désastres en cascade à savoir les organisations d'urgence, les ressources d'urgence, les répondants aux risques et les actions de réponse aux risques.

Dans (Yu *et al.*, 2018), les auteurs ont proposé une approche à base du raisonnement à partir de cas et des ontologies pour répondre aux risques liés aux réseaux urbains d'approvisionnement en eau suite à une crise. L'ontologie proposée a été utilisée essentiellement pour la représentation des cas. Plus spécifiquement, les auteurs ont modélisé les caractéristiques d'un scénario de désastre et les risques liés au réseau urbain d'approvisionnement en eau via une ontologie de domaine. En utilisant une ontologie de tâche, ils ont modélisé les stratégies de réponse aux risques.

(Kontopoulos *et al.*, 2018) ont proposé une ontologie pour la gestion des crises climatiques permettant de faciliter l'aide à la décision suite à un désastre climatique. Leur ontologie constitue la base de connaissances de leur système d'aide à la décision développé dans le cadre du projet *beAWARE*⁷ financé par l'union européenne. L'ontologie proposée couvre principalement les aspects suivants : représentation des caractéristiques de la crise, ses impacts, analyse des capteurs et allocation des unités des premiers intervenants. Cependant, elle n'a pas représenté les ressources physiques nécessaires à l'exécution d'une mission. En outre, elle ne couvre que les types de catastrophes naturelles.

L'ontologie *EmergencyFire* proposée par (Bitencourt *et al.*, 2018) représente les protocoles d'intervention d'urgence liés aux incendies dans les bâtiments. L'objectif de leur travail est de contribuer à la planification tactique et stratégique des organisations concernées. Avec l'aide d'un certain nombre d'experts du département militaire des pompiers de l'État de Bahia au Brésil, les auteurs ont inclus divers concepts spécifiques au domaine de l'incendie tels que les classes d'incendie et les éléments de combustion.

(Haghighi *et al.*, 2013) ont proposé une ontologie de domaine pour les rassemblements de masse désignée par *DO4MG* (*Domain Ontology for Mass Gatherings*). Elle constitue la base de connaissances de leur système intelligent d'aide à la décision pour les urgences médicales causées par les rassemblements de masse. L'ontologie *DO4MG* vise à résoudre les incohérences et à accroître l'efficacité de la communication entre le personnel médical d'urgence. Ce modèle ontologique contient des concepts particuliers liés au domaine des rassemblements de masse, tels que le type de rassemblement, les facteurs environnementaux et la planification de la gestion des

7. <https://beaware-project.eu/> (dernier accès le 01/06/2021)

urgences.

(Amaïef et Lu, 2013) ont utilisé les ontologies pour le développement d'un système de réponse à une urgence basé sur le raisonnement à partir de cas. Plus spécifiquement, leur ontologie proposée a été utilisée pour améliorer le processus d'extraction d'information à partir d'un SMS, définir la structure des cas et définir le vocabulaire de la requête (cas cible). Le système proposé a pour objectif de répondre aux crises liées aux attaques terroristes. Les auteurs ont modélisé ainsi, via les ontologies, les situations de crises liées au terrorisme. Leur modèle ontologique couvre les caractéristiques de l'évènement terroriste (type, localisation et l'état de la situation de crise), les armes utilisées, les groupes terroristes et les bâtiments ciblés par l'attaque terroriste. Toutefois, l'ontologie proposée n'a pas modélisé les connaissances liées à la réponse à une crise, y compris les intervenants, les actions et les ressources nécessaires.

(Bénaben *et al.*, 2008) ont proposé un méta-modèle qui représente les situations de crise. Ce modèle, créé dans le cadre du projet français ISyCri, vise à soutenir l'interopérabilité entre les systèmes d'information des acteurs de la réponse aux crises et à coordonner leurs activités à travers un processus collaboratif. Le méta-modèle qu'ils ont construit est composé de 3 paquets : la caractérisation de la crise qui décrit une crise, le système étudié qui fait référence aux objets affectés par une crise et le système de traitement qui représente les procédures de réponse à la crise et décrit les processus collaboratifs. Ce méta-modèle a été ensuite traduit en une ontologie décrite en OWL-DL (*OWL-Description Language*).

2.2.2 Synthèse de l'analyse bibliographique

Le tableau 2.2 résume tous les travaux examinés dans la sous-section précédente ayant pour objectif de modéliser les situations de crise à l'aide des ontologies. Ce tableau permet de comparer les ontologies proposées selon :

- leurs types : ontologie de domaine ou de tâche ;
- les connaissances qu'elles représentent : caractéristiques du désastre, dommages engendrés par un désastre, entités vulnérables pouvant être affectées par un désastre, répondeurs, ressources et actions nécessaires dans les opérations de réponse à une situation d'urgence ; et
- la dépendance du domaine d'application : ontologie dédiée pour un type spécifique de désastre ou non.

Nos investigations montrent que toutes les ontologies proposées dans le cadre de la gestion des crises sont des ontologies de domaine. La plupart des auteurs ont directement modélisé des ontologies de domaine. D'autres ont passé tout d'abord par des ontologies de haut niveau avant de les spécifier ensuite en ontologies de domaines (Elmhadhbi *et al.*, 2019; Babitski *et al.*, 2009). Les travaux de Yu et al. utilisent les ontologies de tâche, en plus des ontologies de domaine, afin de spécifier le processus de réponse à une crise (Yu *et al.*, 2020a; Yu *et al.*, 2018).

Dans notre synthèse, nous avons particulièrement focalisé sur le degré de représentation des concepts pertinents à une situation de réponse à une crise. Dans le cas où un concept reflétant une entité du monde réel (désastre par exemple) est représenté avec détails dans une ontologie

Référence	Type		Connaissances représentées						Dépendance du domaine	
	Domaine	Tâche	Désastre	Domages	Entités vulnérables	Répondeurs	Ressources	Actions	Oui	Non
(Liu <i>et al.</i> , 2021)	X		+	+	+	+	+	++	X	
(Yu <i>et al.</i> , 2020a)	X	X	+	+	++	++	++	+		X
(Elmhadhi <i>et al.</i> , 2019)	X		+	-	+	++	+	+		X
(Santos <i>et al.</i> , 2019)	X		+	-	-	+	++	-		X
(Yu <i>et al.</i> , 2018)	X	X	++	++	++	+	+	+	X	
(Kontopoulos <i>et al.</i> , 2018)	X		+	+	++	+	-	+		X
(Bitencourt <i>et al.</i> , 2018)	X		++	-	+	++	-	++	X	
(Barros <i>et al.</i> , 2015)	X		+	-	-	-	+	-		X
(Haghghi <i>et al.</i> , 2013)	X		++	-	-	+	+	+	X	
(Amailef et Lu, 2013)	X		++	+	++	-	-	-	X	
(Ortmann <i>et al.</i> , 2011)	X		+	++	++	-	+	+		X
(Babitski <i>et al.</i> , 2009)	X		++	++	-	-	++	-		X
(Bénaben <i>et al.</i> , 2008)	X		++	+	++	+	+	++		X

TABLE 2.2 – Ontologies pour la représentation des situations de crise

(détaillé via une taxonomie par exemple), nous lui attribuons le symbole (++). Sinon, s'il n'est pas détaillé, nous lui attribuons le symbole (+). S'il est complètement absent de l'ontologie, nous lui affectons le symbole (-). D'après notre étude, nous constatons que la majorité des ontologies proposées focalisent sur des concepts plus que d'autres. En d'autres termes, elles peuvent spécifier des concepts avec un degré de granularité élevé tandis que d'autres avec un degré de granularité bas. Par exemple, l'ontologie proposée par (Babitski *et al.*, 2009) a représenté, via une taxonomie, les types de dommages générés par un désastre ainsi que les types des ressources nécessaires à la réponse à une crise. Toutefois, elle n'a pas modélisé les entités vulnérables, les répondeurs et les actions de réponse.

Concernant la dépendance du domaine d'application, nous constatons d'après le tableau 2.2 que la plupart des ontologies ont été modélisées indépendamment du type de désastre permettant ainsi une représentation générique des connaissances liées à une situation de crise. D'autres ontologies ont été créées pour modéliser des situations d'urgence engendrées par un type spécifique de désastre tels que les incendies (Bitencourt *et al.*, 2018) et le terrorisme (Amailef et Lu, 2013).

Conclusion

Nous avons consacré la première partie de ce chapitre à la présentation des ontologies et l'étude des différents aspects qui y sont liés. Après avoir introduit la notion d'ontologie et présenté ses principaux objectifs, nous avons décrit ses composantes et exposé ses différentes catégories. Par la suite, nous avons présenté les différentes facettes de l'ingénierie d'ontologie, notamment, les méthodologies pour sa construction. Puis, nous avons présenté les différentes approches de mesure de similarité sémantique entre deux concepts d'une ontologie.

Nous avons consacré la deuxième partie de ce chapitre à une étude d'un nombre d'ontologies proposées dans la littérature ayant représenté les situations de crise. Nous avons constaté que la plupart d'entre elles ont été modélisées pour faciliter le partage des informations et surmonter les problèmes d'interopérabilité entre les différents acteurs impliqués dans la réponse à une crise. Nous avons aussi noté que les ontologies peuvent être exploitées dans un processus de raisonnement, notamment, le raisonnement à partir de cas (Yu *et al.*, 2018; Amailef et Lu, 2013).

A la lumière des études effectuées dans ce chapitre, nous sommes convenus à créer une *ontologie de domaine* qui va représenter les connaissances liées aux situations de crise (caractéristiques de désastre, dommages et entités vulnérables) indépendamment d'un type spécifique de désastre, et une *ontologie de tâche* qui va représenter les stratégies de réponse à une crise (répondeurs, ressources et actions). Nous soulignons, ici, que notre ontologie envisagée va être indépendante de tout type spécifique de désastre, contrairement aux travaux de (Yu *et al.*, 2018) qui traitent les risques liés aux réseaux urbains d'approvisionnement en eau suite à une crise. Étant donné que la modélisation des situations de crise nécessite des efforts conjoints de personnes expérimentées ayant des points de vue différents, nous avons convenus d'adopter une *approche collaborative* de conception d'ontologie. De plus, visant à soutenir les gestionnaires de crise dans le processus de prise de décision, nous allons nous appuyer sur notre imagination et notre créativité personnelles, suivant ainsi une *approche inspirante* de conception d'ontologie. Concernant la méthodologie de

développement, nous avons choisi la méthodologie proposée par (Haghighi *et al.*, 2013) pour la construction de notre ontologie vu qu'elle inclut les étapes communes des méthodologies de développement des ontologies les plus connues dans la littérature (Uschold et Gruninger, 1996; Fernández-López *et al.*, 1997; Noy et McGuinness, 2001).

Notre ontologie sert à, non seulement surmonter les défis de l'interopérabilité et du partage des informations entre les différents intervenants impliqués dans la réponse à une crise, mais aussi à fournir un support pour notre approche basée sur le RàPC. En effet, notre ontologie sera utilisée, entre autres, à la recherche de cas similaires moyennant une mesure de similarité sémantique. Dans ce cadre, compte tenu des limites de l'approche basée sur les arcs et de la non convenance de l'approche basée sur le contenu informationnel, nous avons choisi d'utiliser les *mesures de similarité basées sur les caractéristiques*.

Chapitre 3

Le raisonnement à partir de cas

Sommaire

3.1	Le raisonnement à partir de cas	55
3.1.1	Généralités	55
3.1.2	Composantes du RàPC	58
3.1.3	Représentation de cas	60
3.1.4	Cycle du RàPC	60
3.1.5	Mesures de similarité	64
3.1.6	Rôles des ontologies dans un processus de RàPC	66
3.2	Approches à base de RàPC pour la réponse à une crise	66
3.2.1	Méthode de recherche	66
3.2.2	Travaux connexes	67
3.2.3	Synthèse	69
3.2.4	Limites des travaux examinés	71

Introduction

L'application du raisonnement à partir de cas dans le domaine de la gestion des crises n'est pas nouvelle et date depuis plus de deux décennies (Leake *et al.*, 1996; Avesani *et al.*, 2000). En effet, cette méthodologie de résolution de problèmes a été utilisée pour fournir l'aide à la décision dans la plupart des phases de gestion de crise, notamment, la phase de réponse.

Dans ce présent travail de thèse, nous proposons une approche d'aide à la décision basée sur le RàPC permettant d'assister les preneurs de décisions à la génération d'un plan stratégique de réponse d'urgence à une crise. La présentation du RàPC et les aspects qui y sont liés constitue le sujet de la première partie de ce chapitre. Nous allons tout d'abord présenter ce paradigme de résolution de problème et indiquer les catégories d'applications dans lesquelles il peut être utilisé. Ensuite, nous allons exposer ses principales composantes : processus et contenus de connaissances. Puis, nous allons focaliser sur la notion de représentation de cas et décrire par la suite les différentes étapes du cycle de raisonnement. Nous allons aussi focaliser sur les mesures de similarité pouvant être utilisées dans la phase de recherche de cas similaires. La dernière partie de cette section sera consacrée à la présentation des avantages de l'intégration des ontologies dans un processus de RàPC.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons effectuer une étude de la littérature des approches à base de RàPC proposées pour la réponse à une crise. Plus spécifiquement, nous allons tout d'abord présenter la méthodologie de recherche bibliographique adoptée, puis nous allons analyser les travaux identifiés. Enfin, nous allons présenter une synthèse de notre étude de la littérature, ainsi qu'énumérer quelques limites identifiées.

3.1 Le raisonnement à partir de cas

Dans cette section, nous allons introduire le RàPC ainsi que ses différents aspects, en particulier, ceux que nous abordons dans notre travail. Particulièrement, nous allons présenter tout d'abord quelques généralités à propos de ce paradigme de résolution de problèmes ainsi que ses composantes principales. Puis, la notion de représentation de cas va être introduite et les phases du cycle du raisonnement vont être décrites en détail. Par la suite, une étude des différentes mesures de similarité pouvant être utilisée dans l'étape de recherche de cas similaires va être établie. Enfin, nous allons présenter les rôles qu'une ontologie peut jouer dans un processus de RàPC.

3.1.1 Généralités

Nous introduisons dans cette sous-section le principe général du raisonnement à partir de cas, les approches qui peuvent être y adoptées pour son implémentation et les types d'applications dans lesquels il peut servir.

Présentation

Dérivé de l'intelligence artificielle, le raisonnement à partir de cas (Kolodner, 1993; Aamodt et Plaza, 1994) est un paradigme de résolution de problèmes qui imite la façon dont les humains pensent pour résoudre des problèmes. Selon (Breslow et Aha, 1998), les humains prennent généralement des décisions en comparant leur situation problématique actuelle à des situations similaires du passé. En RàPC, un nouveau problème est résolu en se souvenant d'un ancien cas similaire et en le réutilisant dans la nouvelle situation problématique (Aamodt et Plaza, 1994). Un cas signifie une situation problématique antérieure ou, selon (Richter et Weber, 2016), une expérience d'un problème résolu. Un cas est souvent subdivisé en deux parties : une description du problème et une description de la solution correspondante. Un ensemble de cas organisés et stockés constitue une « base de cas ».

Selon (Aamodt et Plaza, 1994), le raisonnement à partir de cas trouve ses racines dans les travaux menés par Roger Schank en sciences cognitives sur la mémoire dynamique ainsi que sur le rôle fondamental qu'un rappel de situations antérieures ou de modèles de situations joue dans la résolution de problèmes et l'apprentissage (Schank, 1983). D'autres racines du RàPC proviennent de l'étude du raisonnement par analogie (Gentner, 1983).

Le raisonnement à partir de cas offre, entre autres, plusieurs avantages (Kolodner, 1992) :

- Il permet au raisonneur de proposer rapidement des solutions aux problèmes car ces dernières ne sont pas générées à partir de zéro.
- Même si le raisonneur ne possède pas de connaissances suffisantes sur un domaine donné, le RàPC lui permet de proposer des solutions dans ces domaines là.
- Il offre au raisonneur des moyens pour évaluer les solutions proposées même s'il n'existe pas de méthodes algorithmiques pour accomplir cette tâche.
- Le RàPC, grâce à son mécanisme de rappel des expériences antérieures, permet d'avertir le raisonneur sur les problèmes rencontrés dans le passé et de prendre les actions convenables pour ne pas les répéter.

Approches du RàPC

Selon (Bergmann *et al.*, 2003), il existe trois principales approches pour implémenter le processus du RàPC dans les systèmes informatiques :

- Approche textuelle. Dans cette approche, les cas sont stockés sous forme de texte. Ici, (Lamontagne et Lapalme, 2002) précisent que ces cas peuvent être décrits en texte libre (*free text*) d'un côté. Dans ce cas, ils sont considérés non-structurés. De l'autre côté, la description des cas peut être découpée en portions étiquetées par des descripteurs à savoir « problème » et « solution ». Dans ce cas, les cas sont considérés semi-structurés.
- Approche conversationnelle. Le principe de cette approche est de capturer les connaissances contenues dans les conversations entre l'utilisateur et le système. Cette interaction permet une description progressive du problème à résoudre ainsi qu'une sélection de solutions convenables. Dans l'approche conversationnelle, un cas est représenté par une liste

de questions qui peuvent varier d'un cas à l'autre. Selon (Bergmann *et al.*, 2003), ces questions sont parfois organisées en structures arborescentes contenant des groupes de questions utilisés pour décrire un certain sous-ensemble de la base de cas.

- Approche structurelle. Le principe de cette approche est de représenter les cas selon une structure commune appelée « modèle de domaine » (*domain model*). Ce modèle spécifie un ensemble d'attributs (ou caractéristiques) permettant de décrire un cas et qui, selon (Lamontagne et Lapalme, 2002), sont déterminées à l'avance par le concepteur du système. L'ensemble de ces descripteurs est structuré selon le modèle de domaine d'application.

Catégories d'applications du RàPC

Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont proposé de différentes classifications des applications ou des tâches pouvant être réalisées par le RàPC (Kolodner, 1992; Bichindaritz, 1994; Althoff, 1995; Althoff, 2001; Richter et Weber, 2016). Dans ce paragraphe, nous allons présenter les types d'applications du RàPC proposés par (Richter et Weber, 2016). Les auteurs distinguent principalement deux catégories de tâches de RàPC :

- Tâches analytiques : la classification, le diagnostic et la prédiction sont les tâches analytiques les plus courantes. Elles tentent d'associer une instance à une classe. La tâche de classification réalise cette association dans sa forme la plus pure, tandis que le diagnostic et la prédiction sont considérés comme variantes (Richter et Weber, 2016).
 - Classification : son objectif est d'attribuer à chaque objet la ou les classes auxquelles il appartient.
 - Diagnostic : associe une instance à une classe qui implique un défaut (panne), un problème ou une maladie. Cette association est principalement fournie par les symptômes qui peuvent concerner une maladie dans le domaine médical ou des défaillances dans le domaine de diagnostic des machines.
 - Prédiction : associe une instance à une classe représentant un événement qui ne s'est pas encore produit (se produira ou pourrait se produire dans le futur). Selon (Richter et Weber, 2016), les prédictions peuvent souvent être réduites à des classifications. Ceci peut être expliqué par le fait que les cas similaires peuvent partager des prédictions similaires.
- Tâches synthétiques : la configuration, la planification et la conception sont les types majeurs des tâches synthétiques. Selon (Richter et Weber, 2016), le point commun de ces tâches est la création d'un objet complexe à partir d'objets simples à cause d'un nombre de restrictions imposées.
 - Configuration : choisir ou sélectionner des paramètres bien déterminés pour spécifier un ensemble de composants systèmes.
 - Conception : le but de la tâche de conception est d'obtenir un objet ayant une certaine fonction tel qu'un système de conception de logiciels (Smyth et Cunningham, 1992).
 - Planification : consiste à générer un plan adaptable à une situation problématique bien déterminée. Un plan est une suite d'actions (étapes d'action) qui modifient un « état initial » afin d'atteindre un « état objectif ». (Richter et Weber, 2016) affirment

que le RàPC est particulièrement convenable pour les problèmes de planification car, souvent, les plans ne sont pas créés à partir de zéro, mais plutôt sont construits sur la base de plans antérieurs. La description d'un problème de planification détermine l'état initial. En d'autres termes, les attributs décrivant la partie problème d'un cas et leurs valeurs déterminent l'état initial. Le plan constitue la partie solution du cas. Ce plan, une fois exécuté, va changer les valeurs d'un ensemble d'attributs du cas, modifiant ainsi l'état.

3.1.2 Composantes du RàPC

Le raisonnement à partir de cas est le résultat de combinaison d'un processus et d'un ensemble de conteneurs de connaissances (Lamontagne et Lapalme, 2002). Dans cette section, nous allons décrire brièvement ces deux composantes.

Processus

Le processus du RàPC est l'ensemble des principales tâches implémentées par cette méthodologie (Richter et Weber, 2016). Ce processus commence par l'élaboration du problème par l'utilisateur pour lequel on cherche une solution. Une fois la formulation du problème est achevée, on obtient ainsi un « nouveau cas » ou un « cas cible ». Ensuite, la description du problème du cas cible est comparée avec celles des cas stockés dans la base de cas (« cas sources » ou « cas historiques »). Suite à cette comparaison, le ou les cas sources les plus similaires sont sélectionnées en tant que cas candidats pour résoudre le problème actuel. Plus spécifiquement, la ou les solutions des cas sélectionnés sont susceptibles d'être réutilisées pour résoudre le nouveau problème (étape de recherche). Dans le cas où une solution ne peut pas être directement réutilisée, elle doit être adaptée pour correspondre à la nouvelle situation (étape de réutilisation ou d'adaptation). La nouvelle solution proposée doit être, par la suite, révisée (testée et corrigée si nécessaire) (étape de révision). Une fois la solution est confirmée, elle peut être stockée dans la base de cas pour résoudre de futurs problèmes (étape d'apprentissage) (Richter et Weber, 2016). Une description plus détaillée de chaque étape du processus du RàPC est donnée dans la sous-section 3.1.4.

Conteneurs de connaissances

L'approche de raisonnement à partir de cas, comme d'autres approches qui servent à construire des systèmes à base de connaissances, s'appuie sur des connaissances spécifiques au domaine d'application afin de générer des solutions raisonnables. Toutefois, l'utilisation des connaissances incluses dans les cas est souvent insuffisante pour bâtir des applications robustes à base de RàPC. Par conséquent, d'autres connaissances générales supplémentaires peuvent être utilisées au cours des différentes phases du processus de raisonnement (Stahl, 2003). (Richter et Weber, 2016) distinguent quatre conteneurs de connaissances (*knowledge containers*) qui contiennent des connaissances du domaine d'application ainsi que des connaissances de résolution de problèmes. Ces conteneurs, illustrés dans la figure 3.1, sont les suivants : le vocabulaire, la base de cas, les mesures

de similarité et les connaissances d'adaptation. Selon (Wilke *et al.*, 1997; Stahl, 2003; Richter et Weber, 2016), les conteneurs de connaissances ne sont pas totalement indépendants car il est possible de transférer des connaissances entre les différents conteneurs afin d'adapter les systèmes à base de RàPC aux conditions spécifiques du domaine d'application en question.

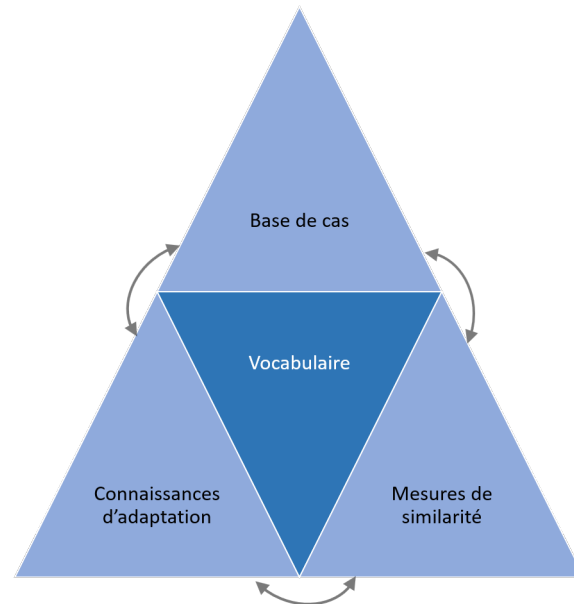


FIGURE 3.1 – Conteneurs de connaissances, adapté de (Richter et Weber, 2016; Stahl, 2003)

- Vocabulaire : constitue le conteneur de base pour les autres conteneurs. Il définit quelles sont les informations du domaine d'application considérées comme importantes et comment elles peuvent être exprimées. Plus spécifiquement, ce conteneur présente les entités d'informations ainsi que les structures nécessaires pour représenter les connaissances du domaine (Stahl, 2003). Le conteneur de vocabulaire peut être considéré comme étant le « langage » utilisé pour parler du domaine. Plusieurs formalismes peuvent être utilisés pour représenter le vocabulaire, en l'occurrence, les ontologies.
- Base de cas : ensemble d'expériences acquises depuis des situations problématiques antérieures.
- Mesures de similarité : des fonctions qui servent à évaluer la similarité entre un cas cible et un cas source. Elles sont utilisées dans l'étape de recherche de cas pour récupérer des cas similaires.
- Connaissances d'adaptation : connaissances spécifiques au domaine d'application qui sont utilisées pour adapter une solution d'un cas similaire récupéré afin de résoudre un nouveau problème. Elles sont généralement représentées sous forme de règles (Richter et Weber, 2016).

3.1.3 Représentation de cas

Selon (Kolodner, 1993), un cas est « une portion de connaissance contextualisée représentant une expérience ». Cette expérience peut être structurée selon différentes manières. Le plus souvent, un cas est seulement subdivisé en deux parties : une partie pour la description du problème et une autre pour la description de la solution correspondante. (Kolodner, 1993), de son côté, propose une structure plus exhaustive d'un cas qui comprend principalement trois parties :

- Problème (*Problem*) : contient des informations qui caractérisent la situation problématique survenue.
- Solution (*Solution*) : décrit la solution dérivée du problème qui a été spécifié dans la partie problème.
- Résultat (*Outcome*) : décrit ce qui s'est passé à la suite de l'application de la solution ou comment la solution a fonctionné. En d'autres termes, cette partie contient les rétroactions du monde réel et leurs interprétations.

Les cas peuvent être représentés sous une variété de formes en utilisant des formalismes de représentation de connaissances issus de l'intelligence artificielle à savoir les *Frames*, les objets, les règles, les prédicats et les réseaux sémantiques (Watson et Marir, 1994). (Bergmann *et al.*, 2005) distinguent trois principaux types ou approches de représentation de cas :

- Représentation à base de vecteur d'attributs : un cas est représenté en tant que vecteur de paires attribut-valeur.
- Représentation structurée : un cas est représenté en utilisant plusieurs formalismes de représentation de connaissances comme les *Frames* qui sont issus de la logique du premier ordre et les ontologies.
- Représentation textuelle : impose une structure faible sur les cas permettant une exploitation facile de l'expérience capturée dans les documents. Ce type de représentation décompose le texte qui constitue un cas en entités d'information pouvant être des mots ou des phrases.

3.1.4 Cycle du RàPC

Selon (Aamodt et Plaza, 1994), le raisonnement à partir de cas peut être décrit comme étant un cycle composé de quatre phases comme le montre la figure 3.2 :

1. Rechercher le ou les cas les plus similaires.
2. Réutiliser les connaissances incluses dans le cas récupéré pour résoudre le problème.
3. Réviser la solution proposée.
4. Apprendre l'expérience créée qui peut être utile pour la résolution de futurs problèmes.

Le processus de raisonnement à partir de cas commence dès qu'on a un problème pour lequel une solution est requise. Ce problème est considéré comme étant un nouveau cas pour lequel la partie solution est encore inconnue. Afin de résoudre ce cas cible, celui-ci doit passer par un traitement composé de quatre étapes consécutives comme indiqué dans la figure 3.2.

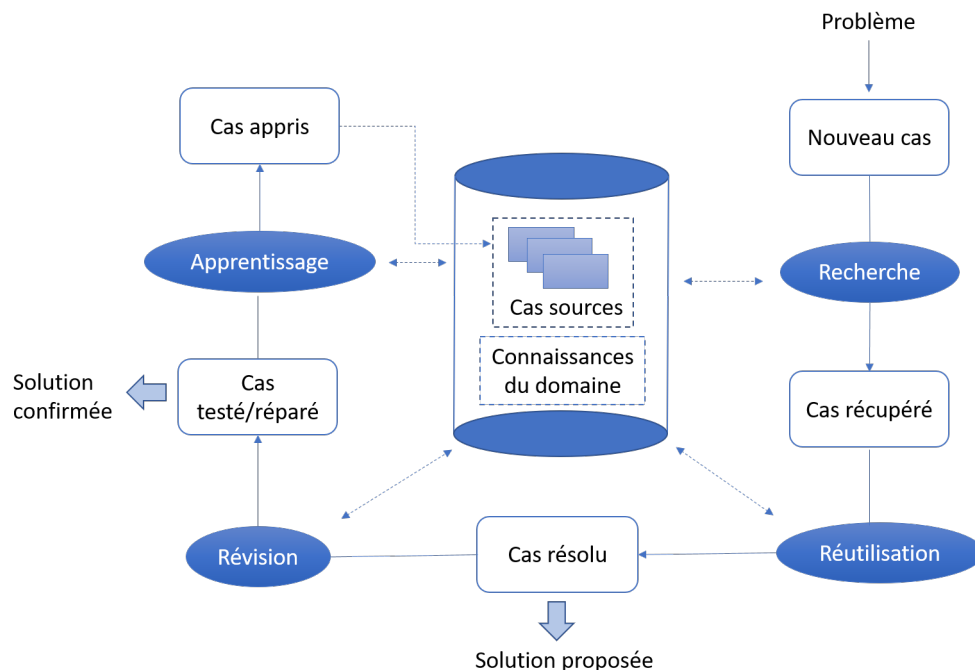


FIGURE 3.2 – Cycle du raisonnement à partir de cas, adapté de (Aamodt et Plaza, 1994)

Recherche

L'objectif de cette première phase est de récupérer le ou les cas les plus susceptibles d'être utiles pour trouver une solution adéquate au problème actuel. En d'autres termes, cette étape vise à sélectionner les cas sources les plus similaires au nouveau cas. Ici, la mesure de similarité entre le cas cible et les cas historiques situés dans la base de cas joue un rôle clé dans cette phase. Dans ce contexte, (Liao *et al.*, 1998) distinguent principalement deux approches pour déterminer la similarité entre un cas cible et un cas historique :

- Approche à base de distance ou de calcul : se base sur le calcul de la distance qui sépare deux cas et ce à partir des attributs qui caractérisent ces cas. Dans cette approche, la sélection du cas le plus similaire est effectuée à travers une évaluation d'une mesure de similarité (fonction de similarité).
- Approche d'indexation ou de représentation : les cas sources sont organisés et reliés par des structures d'indexation au sein de la base de cas (par exemple un arbre). Afin de rechercher le cas le plus similaire, il suffit de parcourir la structure d'indexation.

En plus des approches de recherche de cas purement basées sur la mesure de similarité, il existe d'autres approches combinant la similarité avec d'autres critères pour guider le processus de recherche comme par exemple le critère d'adaptabilité ou d'utilité du cas récupéré (Bergmann *et al.*, 2001; Lopez De Mantaras *et al.*, 2005). En effet, l'hypothèse que le cas le plus similaire est celui qui est le plus facile à adapter a été remise en question par (Smyth et Keane, 1993). Ils ont

introduit la notion de recherche guidée par l'adaptabilité dans laquelle les exigences d'adaptation sont évaluées lors de la phase de recherche moyennant les connaissances d'adaptation spécifiques au domaine d'application. La figure 3.3 résume les approches de recherche de cas. Dans notre étude, nous nous intéressons à l'approche à base de distance pour récupérer le ou les cas les plus similaires vu que cette dernière est la plus répandue dans les applications du RàPC (Watson, 1999; Liao *et al.*, 1998). La sous section 3.1.5 détaille les mesures de similarité pouvant être utilisées dans la phase de recherche de cas.

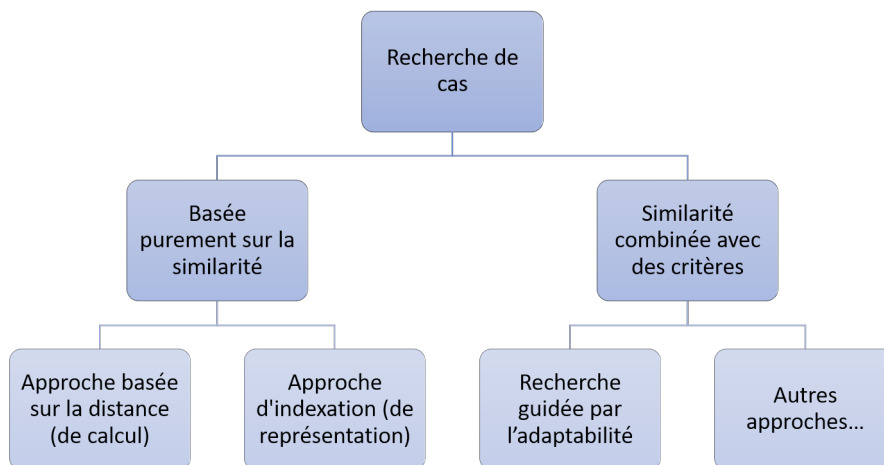


FIGURE 3.3 – Approches de recherche de cas

Réutilisation/Adaptation

Une fois le ou les cas les plus similaires sont sélectionnés, leurs solutions peuvent être réutilisées afin de proposer une solution au problème cible. Cette étape peut être simple si la solution récupérée va être directement réutilisée pour résoudre le nouveau problème sans y apporter des modifications. Ce genre de réutilisation est souvent approprié pour les tâches de classification (Lopez De Mantaras *et al.*, 2005). Cependant, cette phase pourrait être plus complexe dans le cas où il existe des différences significatives entre le problème cible et le problème du cas récupéré. À ce moment-là, la solution récupérée doit être adaptée aux spécificités du nouveau problème pour combler ces différences.

L'adaptation demeure essentielle et pertinente lorsque le RàPC est utilisé pour des tâches constructives de résolution de problèmes telles que la conception, la configuration et la planification (Lopez De Mantaras *et al.*, 2005). Généralement, nous pouvons distinguer deux approches basiques pour l'adaptation d'un cas comme le montre la figure 3.4 (Aamodt et Plaza, 1994; Wilke et Bergmann, 1998; Chang *et al.*, 2004) :

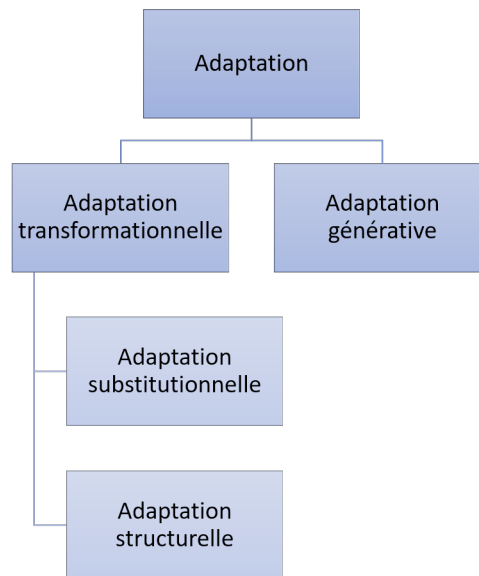


FIGURE 3.4 – Vu d’ensemble sur les approches basiques d’adaptation, adapté de (Aamodt et Plaza, 1994; Wilke et Bergmann, 1998)

- L’adaptation transformationnelle : signifie que la solution du cas récupéré doit être transformée en une nouvelle solution adéquate à la situation problématique actuelle. Ceci peut être effectué via l’ajout, la modification ou la suppression des éléments de la solution récupérée. Selon le degré de modification, deux types d’adaptation transformationnelle peuvent se distinguer (Wilke et Bergmann, 1998) :
 - L’adaptation substitutionnelle : s’intéresse à la modification des valeurs des attributs de la solution récupérée.
 - L’adaptation structurelle : s’intéresse à la modification de la structure de la solution. Autrement dit, ce type permet la réorganisation des éléments de solution, l’ajout et la suppression de ces éléments sous certaines conditions.
- L’adaptation générative (dérivationnelle) : cette approche consiste à prendre le processus par lequel la solution récupérée a été générée dans le passé et le réutilise pour générer une solution adéquate dans une situation similaire. Ainsi, un solveur de problèmes génératif, étroitement intégré dans le raisonneur à base de cas, doit être mis en place pour essayer de rejouer autant que possible les étapes de la solution connue. Dans le cas où certaines étapes de la solution ne peuvent pas être rejouées, d’autres étapes alternatives doivent être générées à partir de zéro (Stahl, 2003).

Révision

Vu que l’exactitude de la solution proposée ne peut pas être garantie immédiatement, il devient alors nécessaire de réviser le cas résolu. La révision de la solution proposée peut être effectuée à travers son application dans le monde réel. Toutefois, l’application directe de la solution suggérée

dans un environnement réel peut rencontrer des obstacles et des risques. Par exemple, pour un système d'aide à la décision médicale, la confirmation du succès ou de l'échec d'un traitement médical peut durer de plusieurs heures à plusieurs mois. Ainsi, la révision de la solution proposée via son application dans le monde réel pourrait être difficile voire impossible (Aamodt et Plaza, 1994; Stahl, 2003). Afin de franchir cet obstacle, la révision du cas résolu pourrait être effectuée à travers un programme de simulation (Aamodt et Plaza, 1994; Richter et Weber, 2016). Dans le cas où la révision échoue, le cas résolu doit être réparé. Si la réparation échoue, une nouvelle tentative de génération d'une solution valide doit être effectuée. Ceci peut être réalisé à travers l'application d'une autre méthode d'adaptation ou l'exécution d'une nouvelle recherche de cas similaire (Stahl, 2003).

Apprentissage

Un fois le cas résolu est passé à un cas confirmé, ce dernier va être sauvegardé dans la base de cas pour une future utilisation. L'étape d'apprentissage enrichie la base de cas par des nouvelles expériences. Dans ce contexte, plusieurs approches visant la réorganisation des cas dans la base de cas, suite à un ajout d'un cas confirmé, ont été proposées dans la littérature (Stahl, 2003).

3.1.5 Mesures de similarité

D'après (Lesot *et al.*, 2009), les mesures de similarité sont « des fonctions qui quantifient l'ampleur dans laquelle les objets se ressemblent ». Dans notre contexte, ces mesures permettent d'évaluer le degré de ressemblance entre un nouveau cas et un cas historique (Liao *et al.*, 1998). On rappelle qu'un cas puisse être représenté par plusieurs attributs de différents types (numérique, symbolique, etc.). Ceci rend la mesure de similarité entre cas une tâche plus complexe. La décomposition de la totalité du calcul de similarité en similarité locale et similarité globale simplifie la modélisation des mesures de similarité (Stahl, 2003). En effet, selon ce principe, la similarité locale se calcule entre les attributs de deux cas et la similarité globale se calcule en agrégeant les similarités locales déjà calculées tout en tenant en compte l'importance (le poids) de chaque attribut. Il est à noter que la similarité est généralement représentée par un nombre réel dans l'intervalle $[0,1]$.

Les similarités locales sont généralement calculées selon le type de l'attribut et sont à base de distance (Rifqi, 1996; Stahl, 2003) :

— Type numérique :

$$Sim(a, b) = \frac{|a - b|}{range}$$

où *range* représente la valeur absolue de la différence entre la valeur minimale et la valeur maximale de l'ensemble des valeurs.

— Type symbolique :

$$Sim(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } a = b \\ 0 & \text{si } a \neq b \end{cases}$$

— Type taxonomique :

$$Sim(a, b) = \frac{h(\text{commonnode}(a, b))}{\min(h(a), h(b))}$$

où h représente le nombre de niveaux dans une hiérarchie (arbre taxonomique) (Yang *et al.*, 2005).

(Le Bozec *et al.*, 1998; Lopez De Mantaras *et al.*, 2005) distinguent entre la similarité de surface qui ne prend en compte que les descripteurs de cas et la similarité structurelle qui prend en considération les relations entre ces descripteurs si les cas sont représentés par des structures plus complexes (des graphiques ou des objets par exemple). (Aamodt et Plaza, 1994), de leur côté, ajoutent que la recherche de cas similaires peut se baser sur des similarités superficielles ou « syntaxiques » (*syntactic similarity*) entre les attributs du problème ou bien sur des similarités plus profondes ou « sémantiques » (*semantic similarity*). La différence entre les deux approches est que la première peut être utilisée lorsque l'acquisition des connaissances du domaine d'application est difficile (approche pauvre en connaissances), tandis que la deuxième peut être utilisée lorsque les connaissances du domaine sont autant disponibles (approche à forte intensité de connaissances).

Concernant les similarités globales, plusieurs d'entre elles peuvent être utilisées pour obtenir la valeur finale de la similarité entre une requête et un cas source. Parmi ces mesures, on peut citer (Rifqi, 1996; Stahl, 2003) :

— *Weighted Average Aggregation* :

$$Sim(A, B) = \sum_{i=1}^n w_i sim_i(a_i, b_i)$$

— Agrégation de Minkowski :

$$Sim(A, B) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i sim_i(a_i, b_i)^r \right]^{\frac{1}{r}}$$

— Agrégation euclidienne :

$$Sim(A, B) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i sim_i(a_i, b_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

où n est le nombre d'attributs, w_i est le degré d'importance (poids) de l'attribut i et sim_i représente la similarité locale de l'attribut i .

Parmi plusieurs méthodes de recherche de cas mentionnés dans la littérature (Watson, 1999; Main *et al.*, 2001), l'algorithme des K plus proches voisins (*K-Nearest Neighbors algorithm*) ou *K-NN* (Cover et Hart, 1967) demeure la méthode de recherche la plus répandue (Watson, 1999). Dans cette méthode, les k cas les plus similaires au problème cible sont les cas dont la somme pondérée de leurs attributs est supérieure à celles des autres cas de la base de cas. Autrement, les cas récupérés peuvent être ceux dont la similarité avec le problème cible dépasse un seuil prédéfini (Lopez De Mantaras *et al.*, 2005). Dans notre étude, nous nous intéressons à cette méthode dans la phase de recherche des cas.

3.1.6 Rôles des ontologies dans un processus de RàPC

Dans une approche à base de RàPC, lorsque les cas sont enrichis par des connaissances générales et explicites du domaine d'application, il s'agit plutôt d'une approche à forte intensité de connaissances ou *knowledge-intensive* (Aamodt, 2004). En d'autres termes, ce type d'approche est basée sur une utilisation intensive des connaissances du domaine pour la résolution des problèmes et l'apprentissage (Aamodt, 1991). Dans les approches à base de RàPC de type *knowledge-intensive*, les connaissances peuvent être représentées avec les Frames comme dans le cas du système *CREEK* proposé par (Aamodt, 1991), ou bien via les ontologies.

(Recio-Garúa et Díaz-Agudo, 2007) considèrent que les ontologies sont très utiles dans la conception des systèmes à base de RàPC de type *knowledge-intensive*. Elles permettent à l'ingénieur des connaissances d'utiliser des connaissances déjà acquises, conceptualisées et implémentées, réduisant ainsi énormément les efforts d'acquisition des connaissances dans les différentes phases du cycle du RàPC. En outre, selon les mêmes auteurs, les ontologies peuvent être utilisées dans les approches à base de RàPC comme étant :

- une structure de connaissances permettant de stocker et d'indexer les cas historiques en utilisant des instances ou des concepts de l'ontologie elle-même.
- un vocabulaire permettant de définir la structure d'un cas, quel que soit si les cas sont stockés dans l'ontologie elle-même ou bien dans un autre support de stockage comme les bases de données par exemple.
- une terminologie pour définir le vocabulaire de la requête (problème cible). En effet, l'ontologie fournit un vocabulaire plus riche permettant à l'utilisateur de mieux exprimer ses besoins. De plus, l'ontologie permet de combler l'écart entre la terminologie de la requête et celle de la base de cas pendant le calcul de la similarité.
- une source de connaissances permettant de fournir des méthodes de raisonnement sémantique pour le calcul de la similarité et l'adaptation de cas.

3.2 Approches à base de RàPC pour la réponse à une crise

Dans cette section, nous allons tout d'abord décrire brièvement la méthodologie de revue de la littérature adoptée pour l'identification des travaux connexes. Ensuite, nous allons exposer les approches à base de RàPC récemment proposées dans la littérature pour la réponse à une crise. Puis, nous allons présenter une synthèse de notre analyse bibliographique des travaux liés à notre travail. Enfin, nous allons énumérer les limites identifiées des travaux examinés.

3.2.1 Méthode de recherche

Nous nous sommes basés sur la méthodologie de l'analyse de contenu (*content analysis*) décrite dans (Krippendorff, 2018) pour réaliser notre étude bibliographique. Cette méthode permet

à la fois une analyse qualitative et quantitative des données collectées. Notons ici que nous allons nous contenter de la présentation de l'analyse qualitative des travaux liés. Afin de mener une analyse de contenu, deux principales étapes doivent être réalisées (Chan Albert P. C. *et al.*, 2009) :

1. Collecte des données à analyser : notre recherche bibliographique s'est basée sur les articles publiés dans les journaux évalués par les paires et les actes de la Conférence internationale sur le raisonnement à base de cas (ICCBR) depuis 2013 jusqu'à présent. Nous avons collecté ces articles depuis les bases de données académiques les plus connues comme par exemple *ScienceDirect*, *Springer* et *IEEE Digital Library*. Une requête a été lancée dans chaque base de données en utilisant les mots-clés suivants : "case-based reasoning" AND ("disaster management" OR "disaster response" OR "emergency management" OR "emergency response" OR "crisis management" OR "crisis response").
2. Détermination des formes d'analyse de contenu : cette étude bibliographique s'intéresse essentiellement à une analyse qualitative des travaux connexes. Dans cette analyse, un nombre de propriétés distinctives des systèmes à base de RàPC ont été identifiées. Nous nous sommes inspirés des travaux de (Nilsson et Sollenborn, 2004) et (S. Begum *et al.*, 2011) pour recenser ces propriétés et établir par la suite une comparaison entre les systèmes RàPC identifiés dans la littérature. Les propriétés déterminées peuvent être regroupées en deux classes :
 - Propriétés orientées objectif : décrivent la ou les tâches réalisées par le système telles que la planification et la prédiction.
 - Propriétés orientées construction : représentent les facettes de développement du système telles que les méthodes et les techniques utilisées pour la représentation des cas, la recherche des cas similaires et l'adaptation d'un cas récupéré.

3.2.2 Travaux connexes

Notre recherche bibliographique a abouti à plusieurs travaux récents qui ont proposé des approches d'aide à la décision à base de RàPC pour la réponse à une crise. Dans ce qui suit, nous allons décrire un nombre de ces travaux ayant contribué à la phase de réponse à une crise.

(Shao *et al.*, 2021) ont proposé un Framework de processus de prise de décision basé sur une approche de RàPC pour la prévision de la demande de matériel de secours. Le but de cette étude est d'améliorer la précision de la prévision de la demande dans un contexte mis en évidence par des informations incertaines et incomplètes. Pour ce faire, les auteurs ont représenté les cas sous la forme d'un vecteur d'attribut-valeur et ont utilisé la théorie de la logique floue intuitionniste (*Intuitionistic Fuzzy Theory*) (Atanassov, 1986) dans l'étape de recherche des cas. Afin de tester la validité de la méthode proposée, une expérience d'évaluation empirique a été utilisée. Selon les auteurs, le Framework de prise de décision d'urgence proposé est capable d'améliorer la précision des prévisions de la demande de secours.

(Wang *et al.*, 2020) ont introduit un modèle de prise de décision d'urgence pour les crises environnementales basé sur l'approche du RàPC. La particularité de ce travail est que le processus d'évolution dynamique d'une urgence environnementale est analysé avec la méthode spatiale multidimensionnelle. Selon les auteurs, cette méthode a permis d'identifier les facteurs clés d'un

scénario d'urgence. En ce qui concerne la recherche de cas, différentes fonctions de mesure de similarité ont été utilisées en fonction du type de donnée de l'attribut. L'algorithme du plus proche voisin a été utilisé pour la correspondance des cas (*case matching*). Le processus d'adaptation a été effectué manuellement selon un certain nombre de principes de correction des plans de réponse récupérés (adaptation par transformation et substitution).

(Yu *et al.*, 2020b) ont proposé une approche à base de RàPC pour aider les gestionnaires de crise à générer un plan approprié de réponse à une crise. Dans leur travail, les cas sont représentés sous forme d'un vecteur d'attribut-valeur. Un cas est divisé en deux parties : la partie liée au problème décrit les caractéristiques d'une crise et la partie liée à la solution décrit le nombre des équipes de secours et les quantités de fournitures de secours nécessaires. Pour la recherche des cas similaires, les auteurs ont utilisé des mesures de similarité syntaxiques selon la nature de valeur de l'attribut. L'adaptation de cas est basée sur un algorithme d'évolution différentielle (*Differential Evolution Algorithm*) (Storn et Price, 1997) améliorée. Plus spécifiquement, les auteurs ont utilisé un opérateur de mutation hybride dans le but d'améliorer les performances de l'algorithme d'optimisation utilisé. Cela a été prouvé en comparant les performances de la méthode proposée avec trois algorithmes heuristiques classiques.

(Keke *et al.*, 2020) ont proposé une approche basée RàPC qui peut servir à la prédiction des pertes économiques et sociales suite à désastre. Plus spécifiquement, les auteurs ont proposé une méthode de recherche de cas qui prend en compte les informations spatio-temporelles. Leur méthode comprend trois étapes principales : (1) récupération d'une trajectoire spatio-temporelle similaire à l'aide d'un algorithme proposé par les auteurs ; (2) détermination des poids des attributs à l'aide des algorithmes génétiques ; et (3) calcul de la similarité globale à l'aide de l'algorithme des plus proches voisins.

Dans (Liu *et al.*, 2019), les auteurs ont intégré l'approche à base de RàPC avec celle à base de modèle afin de générer un plan d'évacuation dans le contexte d'une crise de typhon. L'approche RàPC a été utilisée pour récupérer des scénarios historiques et similaires de typhon ainsi que leurs plans d'évacuation correspondants. Dans ce travail, les cas sont structurés en trois parties : les caractéristiques du typhon, les actions de réponse au typhon (évacuation) et l'efficacité du plan d'évacuation. Ces cas sont représentés via un vecteur d'attribut-valeur. La distance Euclidienne a été utilisée pour la recherche des cas similaires.

(Yu *et al.*, 2018) ont suggéré l'utilisation de la méthodologie RàPC afin de répondre aux risques des réseaux urbains d'approvisionnement en eau lors des désastres naturelles. Tout d'abord, les auteurs ont utilisé des ontologies pour représenter les cas historiques. Plus précisément, une ontologie de domaine a été conçue pour représenter les caractéristiques du scénario de catastrophe et les risques liés aux réseaux urbains d'approvisionnement en eau. Une ontologie de tâche a été utilisée pour représenter les stratégies de réponse. Ensuite, une méthode de recherche composée de deux étapes a été adoptée pour déterminer les cas similaires. En effet, la première étape consiste à mettre les en correspondance sur la base des caractéristiques du désastre (en comparant les caractéristiques du scénario de désastre du cas cible avec celles des cas sources). Pour ce faire, les auteurs ont utilisé des mesures de similarité syntaxiques selon le type de valeur d'attribut. La deuxième étape consiste à mettre les en correspondance sur la base des risques générés par l'évènement de désastre. Ici, la théorie de Dempster-Shafer (Shafer, 1976) a été utilisée pour gérer l'incertitude. Concernant la phase d'adaptation, les auteurs ont utilisé des stratégies transforma-

tionnelles et dérivationnelles d'adaptation. L'adaptation des cas est mise en œuvre par le preneur de décision.

Dans (Zhang *et al.*, 2015a), les auteurs ont développé un système à base de RàPC dont l'objectif est de générer un plan d'intervention d'urgence suite à une crise liée au réseau électrique causée par une tempête. Afin de tenir compte de la complexité, de l'incertitude et de l'incomplétude des informations dans de telles situations d'urgence, les auteurs ont représenté les cas à l'aide des Frames et la théorie de Dempster-Shafer. Pour la recherche des cas similaires, ils ont utilisé l'algorithme des plus proches voisins. La particularité de leur travail réside dans l'emploi des algorithmes génétiques multi-objectifs (Konak *et al.*, 2006) avec le modèle *grey relational analysis* (Kuo *et al.*, 2008) pour la phase d'adaptation de cas. Selon les auteurs, la méthode d'adaptation proposée peut garantir une grande précision même si la base de cas ne contient pas beaucoup de cas sources.

(Auslander *et al.*, 2014) ont proposé un algorithme de sélection des paramètres basé sur le RàPC. Cet algorithme permet de sélectionner les paramètres appropriés pour les plans de coordination entre les véhicules automatisés dans les opérations de secours et de sauvetage. Dans ce travail, les cas sont représentés à l'aide d'un vecteur d'attribut-valeur. La recherche des cas similaires est effectuée via l'algorithme des plus proches voisins. Concernant l'adaptation de cas, un algorithme a été mis en œuvre pour ajuster les réglages des paramètres.

(Amailef et Lu, 2013) ont développé un système à base de RàPC et d'ontologie dans le but d'aider les décideurs à répondre aux urgences. Une fois leur système reçoit un SMS d'urgence, par exemple une attaque terroriste, il l'analyse en se basant sur des techniques de traitement du langage naturel et recommande ensuite une solution pour surmonter la situation d'urgence en utilisant l'approche RàPC. Pour ce faire, les auteurs ont créé une ontologie de domaine pour la représentation des cas. Cette ontologie a servi à la structuration des cas et à la définition du vocabulaire du cas cible. Dans leur travail, un cas est composé de trois parties qui reflètent respectivement le problème (spécification de la situation d'urgence), la solution (tâches de réponse à la situation d'urgence) et le résultat (avantages et risques déduits suite à l'application de la solution). L'évaluation de la similarité entre un cas cible et un cas source a été effectuée via un calcul de la similarité locale (selon le type de valeur du descripteur) et de la similarité globale (somme pondérée des similarités locales) (Virkki-Hatakka et Reniers, 2009). Un algorithme de recherche de cas a été mis en œuvre pour récupérer le ou les cas similaires dont la valeur de leur similarité a dépassé un certain seuil. Concernant la phase de réutilisation, les auteurs ont choisi la substitution comme stratégie d'adaptation. Un algorithme a été ainsi proposé pour cette tâche.

3.2.3 Synthèse

Suite à l'analyse des travaux liés et identifiés dans la littérature, nous avons constaté une multiplicité et une diversité des approches d'aide à la décision à base de RàPC pour la réponse à une crise. Afin de pouvoir comprendre les tendances de développement des systèmes RàPC de réponse à une crise, nous avons comparé les travaux identifiés. Cette comparaison a été effectuée sur la base d'un ensemble de critères y compris les propriétés orientées objectif et les propriétés orientées construction du système, spécifiées dans la section 3.2.1. Pour ce faire, nous avons dressé

Référence	Objectif		Contexte d'application
	Planification	Prédiction	
(Shao <i>et al.</i> , 2021)		X	Tremblement de terre
(Wang <i>et al.</i> , 2020)	X		Urgences environnementales
(Yu <i>et al.</i> , 2020b)	X		Typhon et explosion de gaz
(Keke <i>et al.</i> , 2020)		X	Typhon
(Liu <i>et al.</i> , 2019)	X		Typhon
(Yu <i>et al.</i> , 2018)	X		Typhon
(Zhang <i>et al.</i> , 2015a)	X		Tempête tropicale
(Auslander <i>et al.</i> , 2014)	X		Mission de secours en cas de désastre
(Amailef et Lu, 2013)	X		Terrorisme

TABLE 3.1 – Objectifs et contextes d'application des systèmes à base de RàPC pour la réponse à une crise

deux tableaux comparatifs.

Le tableau 3.1 présente les objectifs des systèmes RàPC de réponse à une crise analysés ainsi que leurs contextes d'application. Nos investigations indiquent que la majorité de ces systèmes ont objectif de planifier un plan de réponse approprié à une situation de crise. Ce plan peut être exprimé en matière d'actions à entreprendre pendant la réponse à une crise (Wang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018; Amailef et Lu, 2013), d'éléments de secours nécessaires dans les opérations d'intervention (personnel d'intervention et fournitures) (Yu *et al.*, 2020b; Zhang *et al.*, 2015a) ou de paramètres de plans de coordination entre les véhicules automatisés utilisés dans les opérations de secours et de sauvetage (Auslander *et al.*, 2014). En résumé, la multitude des approches à base de RàPC pour la planification d'une réponse à une crise montre que l'utilisation de cette méthodologie de résolution de problèmes peut aboutir à des résultats prometteurs. Concernant les systèmes RàPC de prédiction, ils sont essentiellement utilisés pour la prévision des demandes de ressources de secours (Shao *et al.*, 2021; Keke *et al.*, 2020). En outre, nous pouvons constater que tous les systèmes identifiés ont été conçus pour résoudre des problèmes liés à la réponse à une crise dans différents contextes, à savoir les désastres naturels (par exemple les typhons et les tremblements de terre) et les désastres causés par l'homme (par exemple le terrorisme).

Le tableau 3.2 résume les différentes méthodes et techniques utilisées dans les phases de représentation de cas, de recherche de cas et d'adaptation de cas. Nous avons ajouté dans ce tableau

un autre critère de comparaison indiquant si l’approche proposée tient en compte de la psychologie du preneur de décision lors du raisonnement.

Nos investigations montrent que la majorité des cas sont simplement représentés par un vecteur d’attribut-valeur, tandis que d’autres cas sont représentés avec une structure plus complexe en utilisant des formalismes tels que les ontologies (Yu *et al.*, 2018; Amaïef et Lu, 2013) et les Frames (Zhang *et al.*, 2015a). Nos enquêtes sur les techniques utilisées pour effectuer la recherche de cas révèlent que la majorité des systèmes RàPC conçus utilisent des mesures de similarité syntaxique (selon la valeur du type du descripteur) pour calculer les similarités locales et l’algorithme des plus proches voisins pour calculer les similarités globales entre un cas cible et un cas historique. Afin d’augmenter la précision de la correspondance des cas, plusieurs techniques intelligentes ont été employées, telles que la théorie de Dempster-Shafer ou la logique floue (L. A. Zadeh, 1988) pour gérer l’incertitude (Shao *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2015a; Amaïef et Lu, 2013).

En ce qui concerne les méthodes utilisées dans la phase d’adaptation des cas, nos investigations indiquent que la plupart des travaux ont adopté une approche transformationnelle d’adaptation (adaptation par substitution ou par structuration). Plus spécifiquement, notre étude montre que l’adaptation a été effectuée d’une façon automatique en utilisant des algorithmes d’optimisation tels que les algorithmes génétiques (AG) (Zhang *et al.*, 2015a) et les algorithmes d’évolution différentielle (AED) (Yu *et al.*, 2020b), semi-automatique en utilisant des algorithmes d’adaptation créés par les auteurs (Auslander *et al.*, 2014; Amaïef et Lu, 2013) ou manuelle à l’aide d’un expert (Shao *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2018). Notons que (Keke *et al.*, 2020) n’ont pas implémenté la phase d’adaptation. Le processus de raisonnement de leur système s’est arrêté à l’étape de la recherche des cas similaires. Une absence d’adaptation est représentée dans le tableau 3.2 par le signe (-).

3.2.4 Limites des travaux examinés

Bien que les approches à base de RàPC examinés ont présenté des apports indéniables pour la littérature, nous avons détecté certaines limites :

- Manque de considération de la partie du résultat dans la structure d’un cas. Dans la plupart des travaux étudiés, les cas sont généralement divisés en seulement deux parties : une partie qui décrit le problème et une autre qui décrit la solution, mais rarement une partie qui décrit le résultat de l’application de la solution. En effet, le stockage du retour d’expérience du monde réel ou (*feedback*) (avantages de l’application de la solution et les problèmes rencontrés lors de son application dans le monde réel) est d’une grande utilité pour les futures situations de crise similaires (Kolodner, 1993). Exploiter ce genre de connaissances dans le domaine de gestion de crise pourrait faire gagner de l’argent, des efforts et surtout du temps pour sauver plus de victimes.
- L’absence de la prise en compte du comportement psychologique du preneur de décisions d’urgence. Dans un contexte d’urgence, le gestionnaire de crise est souvent submergé par le stress, la pression du temps et l’incertitude. De plus, dans de telles circonstances, il est fortement possible qu’il soit d’une rationalité limitée et puisse avoir le sentiment d’aver-

Référence	Représentation			Recherche			Adaptation		Technique
	Attribut-valeur	Ontologie	Frame	Syntaxique	Sémantique	Transformationnelle	Générative		
(Shao <i>et al.</i> , 2021)	X			X		X			Manuelle
(Wang <i>et al.</i> , 2020)	X			X		X			Manuelle
(Yu <i>et al.</i> , 2020b)	X			X		X			AED
(Keke <i>et al.</i> , 2020)	X			X		-		-	-
(Liu <i>et al.</i> , 2019)	X			X		-		-	-
(Yu <i>et al.</i> , 2018)		X		X	X	X		X	Manuelle
(Zhang <i>et al.</i> , 2015a)			X	X		X			AG
(Auslander <i>et al.</i> , 2014)	X			X		X			Algorithme d'adaptation
(Amaief et Lu, 2013)		X		X		X			Algorithme d'adaptation

TABLE 3.2 – Méthodes et techniques utilisées dans les phases de représentation, de recherche et d'adaptation des cas

sion aux pertes et de dépendance de référence (Wang *et al.*, 2017). Cela peut affecter ses décisions. Selon le tableau 3.2, aucune des approches identifiées n’a pris en compte du comportement psychologique du preneur de décision d’urgence. La tenue en considération de ce trait, lors de la génération d’un plan approprié de réponse à une crise, peut être très utile (Wang *et al.*, 2015).

- Manque d’intégration des ontologies dans le processus du RàPC. Malgré les avantages d’incorporation des ontologies dans le cycle du RàPC, nous avons constaté une insuffisance d’approches à base de RàPC pour la réponse à une crise intégrant ce formalisme de représentation des connaissances, comme le montre le tableau 3.2.

Conclusion

Nous avons consacré la première partie du chapitre à la présentation du raisonnement à partir de cas sur lequel est basé notre travail. Tout d’abord, nous avons décrit le principe de ce paradigme de résolution de problèmes, ses origines et ses avantages. Ensuite, nous avons présenté les approches ou les modèles du RàPC. Dans notre cas, les caractéristiques importantes qui servent à décrire le problème à résoudre sont définies à l’avance. Autrement dit, elles ne sont pas progressivement déterminées. Ainsi, l’*approche structurelle* du RàPC convient mieux à nos besoins. Selon cette approche, les cas sont structurés et sont décrits via un ensemble de descripteurs et leurs valeurs (paires d’attribut-valeur). Nous avons énuméré, par la suite, les types d’applications du RàPC. Ici, nous indiquons que la tâche de notre système est *synthétique* et s’inscrit dans la catégorie de la *planification*. En effet, l’objectif de notre système est d’assister le preneur de décision dans la génération d’un plan de réponse à une crise.

Après avoir présenté les composantes principales du RàPC (processus et conteneurs de connaissances), nous avons décrit la notion de représentation de cas. Cette notion s’intéresse principalement à la structure d’un cas ainsi qu’à la forme de sa représentation. Notons ici que nous avons convenu à une *représentation structurée* des cas, en utilisant *les ontologies* comme formalisme de représentation des connaissances. Par la suite, nous avons décrit le cycle du RàPC et nous avons particulièrement focalisé sur la phase de recherche de cas. Cette dernière repose sur le principe d’évaluation de la similarité entre un cas cible et un cas historique à travers l’utilisation de mesures de similarité. De différentes mesures syntaxiques ont été ainsi présentées. Enfin, puisque notre approche à base de RàPC utilise les ontologies, nous avons exposé les rôles qu’une ontologie peut jouer dans un processus de RàPC. Dans notre travail, les ontologies sont utilisées pour le stockage et l’indexation des cas sources, la représentation des cas structurés, la spécification de la terminologie utilisée pour la définition de la requête, la mesure de la similarité sémantique entre un cas cible et un cas source et l’adaptation d’un cas récupéré.

La deuxième partie du chapitre a été consacrée à une étude de la littérature des travaux qui ont proposé des approches à base du RàPC pour la réponse à une crise. Pour ce faire, nous avons tout d’abord présenté la méthodologie analyse de contenu adoptée pour la recherche bibliographique. Ensuite, nous avons décrit les travaux récents liés à notre contexte d’étude. Puis, nous avons synthétisé notre étude de la littérature et dressé deux tableaux récapitulatifs permettant de comparer les approches connexes. Cette comparaison nous a permis d’identifier quelques lacunes que nous

allons combler dans notre approche proposée.

Pour récapituler, à la lumière de notre étude exhaustive de la littérature, les cas vont être représentés à l'aide de notre ontologie proposée. En outre, les cas les plus similaires seront récupérés en utilisant des mesures de similarité syntaxique et sémantique lors de la phase de recherche. De plus, la psychologie du preneur de décision va être tenue en compte dans cette phase critique du cycle du RàPC. Concernant la phase d'adaptation, une approche transformationnelle d'adaptation va être appliquée en exploitant des connaissances sémantiques prédéfinies dans notre ontologie proposée.

La deuxième partie de ce manuscrit inclut une description détaillée de notre approche proposée ainsi que son expérimentation et son évaluation. Le chapitre suivant présente l'architecture globale de notre approche, décrit notre modèle ontologique proposé et détaille le processus adopté de raisonnement à partir de cas.

Deuxième partie

Approche proposée

Chapitre 4

Une approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise

Sommaire

4.1	Architecture globale de l'approche proposée	78
4.1.1	Collecte collaborative des données situationnelles de crise	79
4.1.2	Élaboration du cas cible	79
4.1.3	Raisonnement	81
4.2	Modélisation ontologique des situations de réponse à une crise	82
4.2.1	Présentation	82
4.2.2	Processus de développement de l'ontologie	82
4.3	Raisonnement à partir de cas pour la réponse à une crise	94
4.3.1	Représentation de cas de réponse à une crise	95
4.3.2	Recherche de cas	97
4.3.3	Adaptation de cas	104
4.3.4	Révision et apprentissage	106

Introduction

Dans la partie précédente de notre thèse, nous avons élaboré un état de l'art assez exhaustif concernant le domaine de gestion de crise et les concepts de base impliqués dans notre étude. En particulier, nous avons présenté, entre autres, dans le premier chapitre la notion de crise, ses caractéristiques et les phases de gestion de crise. Étant donné qu'elle constitue le cadre spécifique de notre travail, nous avons focalisé sur la phase de réponse à une crise en exposant ses différentes facettes à savoir les parties prenantes impliquées dans la réponse à une crise et les tâches de réponse au niveau de la cellule de crise. Parmi ces tâches, nous avons souligné les enjeux liés à la tâche de proposition d'un plan d'urgence adaptable à une situation particulière d'une crise. A ce stade, nous avons présenté des approches d'aide à la décision proposées dans littérature ayant pour objectif l'assistance du preneur de décisions dans la proposition d'un plan d'urgence de réponse à une crise. Suite à cette étude bibliographique, nous avons choisi d'utiliser les ontologies pour la modélisation des situations de crises et le Raisonnement à Partir de Cas pour la génération d'un plan stratégique de réponse à une crise. Par conséquent, nous avons consacré les deux chapitres restants de la première partie de cette thèse à l'étude des concepts de base de notre approche proposée : les ontologies et le RàPC. Plus spécifiquement, dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le concept d'ontologie et les différents aspects qui y sont liés, ainsi qu'une étude de la littérature des modèles ontologiques proposés pour la modélisation des situations de crise. Suite à une étude comparative des travaux réalisés, nous avons pu identifier certaines lacunes et établir nos choix méthodologiques. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la méthodologie RàPC et les différents aspects qui y sont liés, à savoir ses composants, les différentes phases du cycle du raisonnement et notamment les rôles des ontologies dans un tel processus de raisonnement. Nous avons aussi réalisé une étude bibliographique exhaustive des approches à base de RàPC pour la réponse à une crise. Cette étude nous a permis d'identifier certaines limites de recherche et de justifier par la suite nos choix méthodologiques.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter notre approche d'aide à la décision. Plus spécifiquement, nous allons décrire ses principales composantes allant de la collecte collaborative des données situationnelles de crise jusqu'au raisonnement. Ceci permet de donner une vue globale sur l'ensemble des éléments de notre approche. Étant un des piliers sur lequel repose notre approche à base de RàPC, nous allons exposer par la suite notre modèle ontologique représentant les situations de réponse à une crise et décrire le processus à travers lequel ce modèle a été créé. Enfin, nous allons focaliser sur le cycle du RàPC et détailler chacune de ses phases. Plus spécifiquement, nous allons présenter les méthodes et les techniques utilisées dans le cycle de raisonnement.

4.1 Architecture globale de l'approche proposée

Rappelons que l'objectif de cette thèse est de proposer une approche d'aide à la décision permettant d'assister le preneur de décision à la réponse à une crise. Plus spécifiquement, notre approche proposée vise à aider le gestionnaire de crise à la génération d'un plan stratégique de réponse adaptable à une situation de crise. Elle est fondée sur deux volets :

- L’acquisition et la capitalisation des connaissances liées à une situation de réponse à crise. Dans notre cas, nous avons utilisé les ontologies pour la modélisation des connaissances liées aux situations de réponse à une crise.
- L’exploitation des connaissances capitalisées en vue de suggérer une réponse. Dans notre cas, nous avons utilisé le RàPC pour exploiter les connaissances déjà représentées par les ontologies et raisonner sur elles afin de générer un plan stratégique de réponse approprié à une situation de crise.

Notre approche d’aide à la décision s’étale sur trois étapes, comme illustrée dans la figure 4.1 : collecte collaborative des données situationnelles de crise, élaboration du problème cible et raisonnement.

4.1.1 Collecte collaborative des données situationnelles de crise

Suite au déclenchement d’un désastre (inondation par exemple), les premiers intervenants issus de différentes organisations comme la protection civile, la police et les services médicaux d’urgence, sont expédiés au champ de la crise afin d’évaluer la situation d’urgence et ensuite la communiquer à la cellule de crise. Ces réponders collectent d’une manière collaborative les connaissances contextuelles de la situation de crise qui incluent les caractéristiques spécifiques de l’évènement catastrophique (par exemple les caractéristiques d’écoulement de l’eau) et les dommages et les pertes engendrés par la crise. Plus spécifiquement, les services médicaux s’occupent de la collecte des informations qui concernent l’état sanitaire des blessés et le nombre des morts. Les agents de police examinent de leur part la situation sécuritaire du champ de désastre. Les pompiers collectent les données liées aux destructions de l’infrastructure, aux risques émergents, aux victimes nécessitant un sauvetage, etc.

Les gestionnaires des évènements catastrophiques (Fogli et Guida, 2013), qui sont issus des divers organisations de réponse et qui appartiennent au niveau opérationnel de la réponse à une crise, sont ceux qui interagissent avec notre système d’aide à la décision. Plus spécifiquement, ils sont responsables de l’alimentation de la base de données par les données situationnelles de crise. L’interaction avec le système peut être effectuée à l’aide d’appareils mobiles. Quant à la qualité des informations collectées et envoyées au centre de commandement et de contrôle (cellule de crise), nous supposons qu’elles sont fiables et loin d’être erronées, étant donné qu’elles proviennent de sources compétentes (Kapucu et Garayev, 2011).

4.1.2 Élaboration du cas cible

Dans cette étape, le gestionnaire de crise (preneur de décisions) élabore le problème cible pour déclencher ensuite le processus du raisonnement à partir de cas. Plus spécifiquement, il extrait les données situationnelles de crise déjà collectées et enregistrées dans la base de données et instancie l’ontologie de domaine par les caractéristiques de la crise courante et les différents dommages qui y sont engendrés. Pour accomplir cette tâche, il sélectionne les concepts d’ontologie qui représentent la partie problème du cas cible et crée les instances correspondantes. La sous-section 4.3.1 détaille

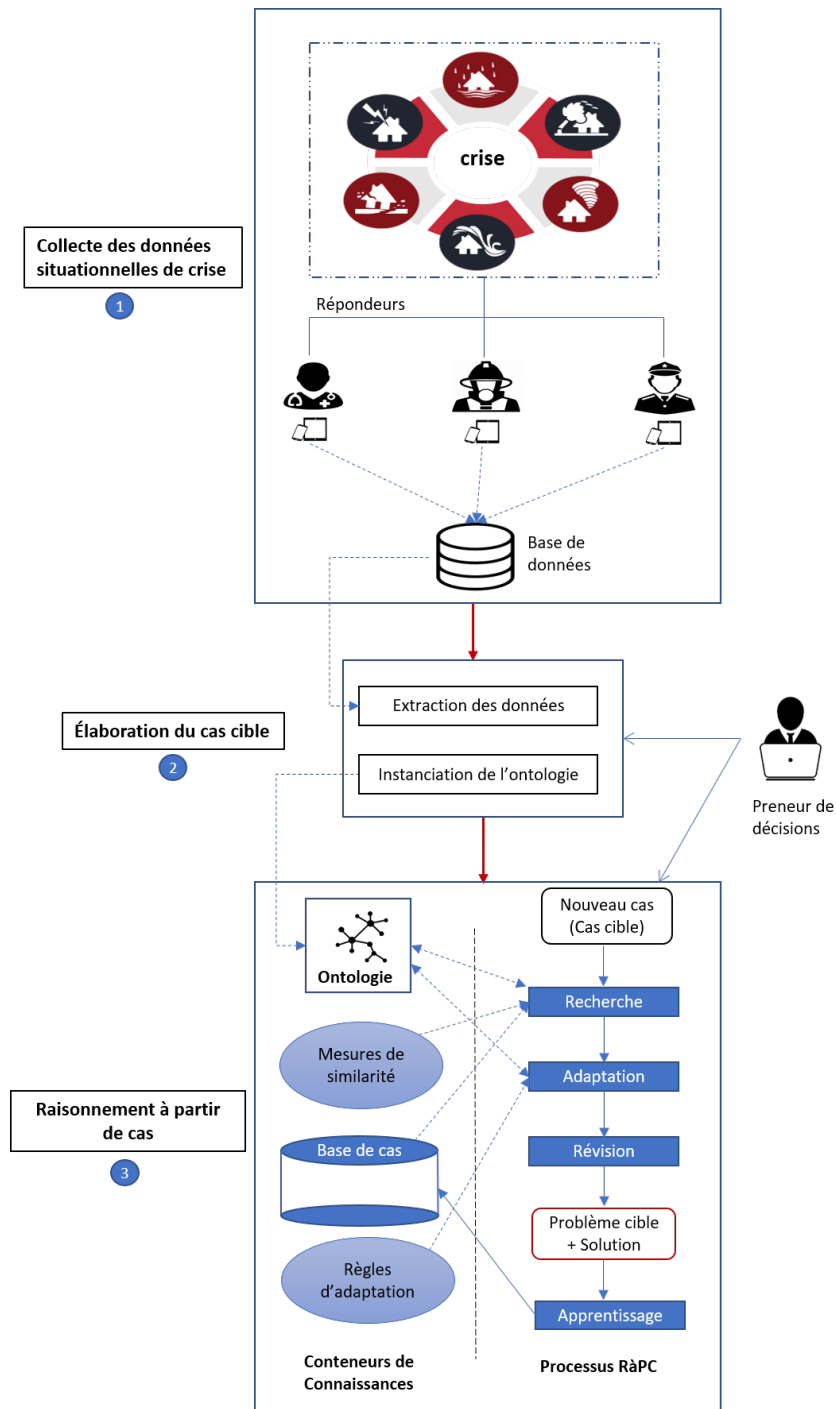


FIGURE 4.1 – Architecture globale de notre approche à base de RàPC et d'ontologie

la structure d'un cas et les concepts d'ontologie représentant chaque partie du cas. A la fin de cette étape, un nouveau cas est ainsi créé pour être ensuite utilisé dans le processus de raisonnement.

4.1.3 Raisonnement

Le nouveau cas élaboré constitue le point de départ de l’étape du raisonnement à partir de cas qui va aboutir à la génération d’un plan d’action stratégique de réponse à la crise courante. Le RàPC est constitué essentiellement de deux parties : les conteneurs de connaissances et le processus de raisonnement.

Les conteneurs de connaissances

Les mesures de similarité, les connaissances d’adaptation, la base de cas et le vocabulaire constituent les connaissances de notre système à base de RàPC. Les mesures de similarité qui incluent les mesures syntaxiques et sémantiques sont utilisées pour l’évaluation de la similarité entre un cas cible et les cas historiques. Les connaissances d’adaptation sont exploitées pour la construction d’une nouvelle solution en utilisant les solutions des cas sources récupérés. Le vocabulaire qui représente les connaissances du domaine est décrit à travers une ontologie. Celle-ci constitue ainsi le modèle de domaine. Les cas sont représentés par une autre ontologie qui incorpore le modèle de domaine. Cette ontologie constitue la base de cas et les cas sont stockés sous forme d’instances. Selon (Díaz-Agudo et González-Calero, 2000), ceci permet une meilleure communication entre le modèle de domaine et le modèle de cas.

Le processus de raisonnement

Il correspond au cycle de raisonnement à partir de cas qui est constitué de quatre phases : la recherche, l’adaptation, la révision et l’apprentissage. La phase de **recherche** de cas similaires est basée sur un calcul de la similarité entre un cas cible et un cas source en utilisant une combinaison de mesures de similarité syntaxique et sémantique. Une fois un ou plusieurs cas les plus similaires sont récupérés, leurs solutions correspondantes sont donc réutilisées et **adaptées** pour générer une nouvelle solution adéquate au nouveau cas. Cette phase d’adaptation utilise préalablement les connaissances sémantiques représentées par notre ontologie. La nouvelle solution générée est sauvegardée temporairement dans la base de cas pour être **révisée**. En effet, le gestionnaire de crise le test pour vérifier sa conformité au nouveau problème. Si la solution proposée est jugée acceptable, elle est **retenue** en permanence dans la base de cas avec le problème cible et les résultats d’évaluation correspondants. Une nouvelle expérience est ainsi ajoutée dans la base de cas afin d’être prochainement utilisée pour la résolution de futurs problèmes. Sinon, si la solution révisée est jugée invalide, l’utilisateur applique des ajustements jusqu’à ce qu’elle soit acceptable.

4.2 Modélisation ontologique des situations de réponse à une crise

Dans cette section, nous allons tout d'abord présenter les objectifs et les principaux aspects de notre modèle ontologique, ainsi que la méthodologie adoptée pour sa construction. Ensuite, nous allons décrire, étape par étape, le processus à travers lequel notre ontologie a été développée.

4.2.1 Présentation

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser les ontologies pour la représentation des connaissances liées aux situations de réponse à une crise. En effet, elles fournissent un vocabulaire commun et unifié, lisible par une machine et capable de surmonter les problèmes d'interopérabilité et de partage d'informations entre les parties prenantes impliquées dans la réponse à une crise (SAMU, protection civile, etc.). De plus, elles peuvent ensuite être employées comme une base de connaissances unifiée pour notre système d'aide à la décision basé sur le RàPC.

Dans cette section, nous allons présenter notre ontologie proposée pour la modélisation des situations de réponse à une crise ainsi que le processus de son développement. Cette ontologie, appelée *CROnto* (*Crisis Response Ontology*), couvre les principaux aspects suivants :

1. Les caractéristiques d'une crise qui représentent les attributs d'une crise.
2. Les effets d'une crise qui décrivent les différents impacts qu'un désastre pourrait engendrer sur des différents objets vulnérables.
3. La réponse à une crise qui représente les plans stratégiques de réponse, les tâches qui y incluent, les intervenants, leurs actions et les ressources nécessaires pour accomplir ces actions.

Rappelons que nous avons représenté les connaissances des caractéristiques et des effets d'une crise par une ontologie de domaine, tandis que nous avons décrit les stratégies de réponse à une crise à l'aide d'une ontologie de tâche. En outre, nous rappelons que nous avons adopté le processus de développement d'ontologie proposé dans (Haghighi *et al.*, 2013). Ce processus, illustré dans la figure 4.2, se compose de quatre étapes consécutives : spécification de la portée et des objectifs de l'ontologie, acquisition des connaissances, conception et implémentation, et évaluation et validation.

4.2.2 Processus de développement de l'ontologie

Dans cette sous-section, nous allons détailler chacune des phases du processus de développement de l'ontologie *CROnto*.

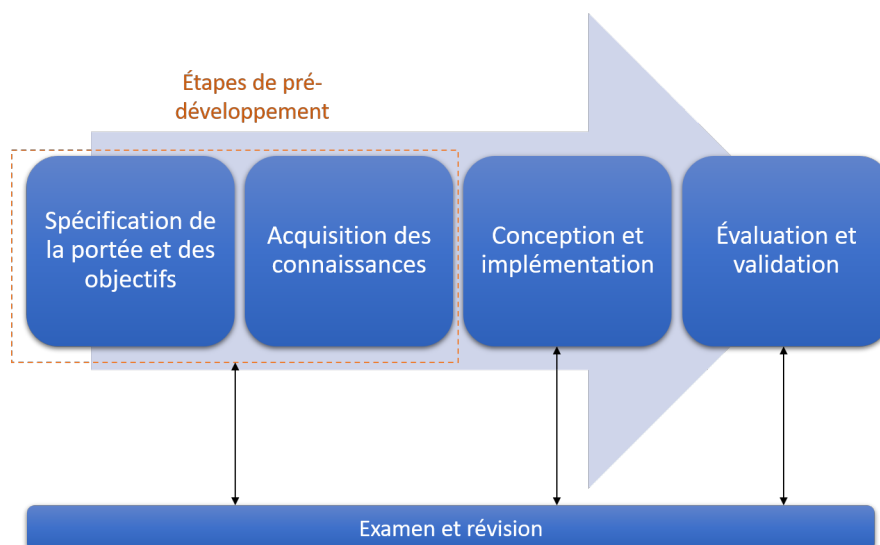


FIGURE 4.2 – Processus de développement et d'évaluation d'ontologies, adapté de (Haghighi *et al.*, 2013)

Étapes de pré-développement

Comme indiqué dans la figure 4.2, les étapes de pré-développement incluent les activités liées à la spécification de la portée et des objectifs attendus de l'ontologie, ainsi qu'à l'acquisition des connaissances.

Spécification de la portée et des objectifs de l'ontologie La portée de notre ontologie est le domaine de la réponse aux crises. Par conséquent, les principaux utilisateurs de notre ontologie sont la cellule de crise et les organisations d'intervention d'urgence telles que les services de protection civile (pompiers), les services médicaux d'urgence (SAMU), la police et d'autres équipes d'intervention en cas de crise.

Les principaux objectifs de notre ontologie sont :

- Spécification d'un vocabulaire commun entre les différentes parties prenantes. Du fait que chaque organisation d'intervention a son propre vocabulaire, l'ontologie *CROnto* constitue une base de connaissances unifiée qui vise à surmonter les problèmes d'interopérabilité et à améliorer l'interaction et la communication entre ces différentes organisations.
- Améliorer la qualité de la prise de décision des gestionnaires de crise pendant la phase de réponse à une crise. En effet, l'ontologie *CROnto* constitue le modèle de connaissances sur lequel raisonne notre système d'aide à la décision basé sur le RàPC. L'intégration de cette ontologie dans notre système peut aider à surmonter les incohérences terminologiques entre les différents utilisateurs du système.

Source	Concepts
(Bénaben <i>et al.</i> , 2008)	Risk, Good, Natural site
(Kontopoulos <i>et al.</i> , 2018)	Asset, Living being, Educational facility
(Babitski <i>et al.</i> , 2009)	Accessory, Clothing, Device, Weapon, Material, Pharmaceutical product
(Othman <i>et al.</i> , 2014)	Exposure

TABLE 4.1 – Liste des concepts extraits d'ontologies et de méta-modèles existants

Acquisition des connaissances Cette étape comprend l'exploration, l'extraction et la dérivation des connaissances du domaine d'intérêt. De nombreuses ressources ont été utilisées pour l'acquisition des connaissances du domaine d'application, qui est dans notre cas le domaine de la réponse aux crises. En effet, dans le but de dégager les concepts de notre ontologie, nous avons utilisé des terminologies d'ontologies existantes et éminentes dans la littérature (Babitski *et al.*, 2009; Kontopoulos *et al.*, 2018) et aussi des méta-modèles (Bénaben *et al.*, 2008; Othman *et al.*, 2014). Le tableau 4.1 comprend la liste des concepts extraits depuis des ontologies et de méta-modèles existants dans la littérature. En ce qui concerne les taxonomies, nous nous sommes inspirés de l'ontologie *SoKNOS* (Babitski *et al.*, 2009) pour catégoriser les ressources, des modèles de (Bénaben *et al.*, 2008; Kontopoulos *et al.*, 2018) pour classer les objets vulnérables et de la terminologie MOAC (*Management Of A Crisis*) (Limbu *et al.*, 2012) pour la classification des dommages.

Plus loin, afin d'acquérir la terminologie du domaine, nous nous sommes aussi référés à plusieurs rapports publics tels que le rapport de l'Assemblée générale des Nations Unies relatif à la réduction des risques des catastrophes¹, le glossaire de termes humanitaires de l'Organisation Mondiale de la Santé² et le manuel gouvernemental des États-Unis de gestion des urgences appartenant au *Federal Emergency Management Agency (FEMA)* (Blanchard, 2008).

Outre les ressources mentionnées ci-dessus, nous avons recueilli des connaissances du domaine auprès d'experts qui travaillent dans le domaine de la gestion de crise. Particulièrement, nous avons réalisé un entretien avec trois experts travaillant au sein de la caserne régionale des pompiers de Mahdia.

1. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction : <https://reliefweb.int/report/world/report-open-ended-intergovernmental-expert-working-group-indicators-and-terminology> (dernier accès le 24/09/2021)

2. ReliefWeb Glossary of Humanitarian Terms : <https://reliefweb.int/report/world/reliefweb-glossary-humanitarian-terms-enko> (dernier accès le 24/09/2021)

Relation	Domain	Range
Has_Crisis_Impacts	Crisis_Event	Crisis_Impacts
Leads_To	Crisis_Event	Crisis_Event
Triggers_Emergency_Response_Plan	Impacts	Emergency_Response_Plan
Reduces_Impacts	Emergency_Response_Plan	Impacts

TABLE 4.2 – Un extrait de relations entre concepts de l’ontologie CROnto

Conception et implémentation

L’ontologie *CROnto* est implémentée avec l’éditeur d’ontologie *Protégé* version 5.5.0 (Genari *et al.*, 2003) et enregistrée sous forme d’un fichier *OWL* (Dean *et al.*, 2004). *OWL* est un langage d’ontologie commun qui définit et décrit des classes, des sous-classes et des propriétés, c’est-à-dire des propriétés d’objet, des propriétés de type de données et des propriétés d’annotation.

Notre modèle ontologique représente trois aspects clés du domaine de la réponse à une crise : caractéristiques d’une crise, impacts d’une crise et réponse à une crise. Ces aspects sont respectivement modélisés dans l’ontologie *CROnto* par trois concepts de base : *Crisis_Event*, *Crisis_Impacts* et *Crisis_Response*. Chacun de ces concepts contient des sous-concepts qui sont éventuellement divisés en sous-concepts. Afin de donner plus de sémantique à notre modèle, nous avons ajouté des relations (propriétés d’objets) entre concepts de notre ontologie comme le montre le tableau 4.2. En effet, une crise peut mener à une autre. Ceci est modélisé par la relation *Leads_To*. De plus, chaque crise a bien évidemment des impacts. Ceci est représenté par la relation *Has_Crisis_Impacts*. En outre, les dommages et les pertes engendrés par une crise déclenchent l’exécution de plans de réponse d’urgence. Nous avons modélisé ceci par la relation *Triggers_Emergency_Response_Plan* qui lie le concept *Impacts* (un sous-concept du concept *Crisis_Impacts*) et le concept *Emergency_Response_Plan* (un sous-concept du concept *Crisis_Response*). Enfin, l’exécution des plans de réponse d’urgence peut réduire les effets engendrés par une crise. Ceci est représenté par la relation *Reduces_Impacts*.

La présentation des concepts clés de notre ontologie ainsi que les relations entre eux peut donner une idée globale sur la structure de notre modèle. Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes facettes de notre modèle de domaine.

Représentation des caractéristiques d’une crise Un évènement de crise est représenté par le concept *Crisis_Event*. Cette classe inclut plusieurs sous-classes qui représentent les caractéristiques d’une crise, comme le montre la figure 4.3 :

- *Disaster_Type* : représente le type de désastre qui a déclenché une crise. Étant donné qu’un désastre puisse être de type naturelle ou bien causé par l’Homme, nous avons subdivisé



FIGURE 4.3 – Représentation des caractéristiques d'une crise

cette classe en deux sous-classes : *Natural* et *Manmade*. Chacune d'entre elles inclut aussi d'autres sous-classes. Pour les désastres naturels, elles peuvent être de type biologique, climatologique, géologique, hydrologique, météorologique ou extra-terrestre. Par exemple, les inondations appartiennent à la classe *Hydrological*. Pour les désastres causés par l'Homme, nous les avons classés en accidents industrielles (par exemple les explosions nucléaires, les déversements de produits chimiques, etc.) et terrorisme.

- *Disaster_Specific_Features* : cette classe représente les caractéristiques spécifiques d'un désastre. Par exemple, un désastre d'inondation est caractérisé par un degré de sévérité (*Flood_Severity*), une source (*Flood_Source*) et des caractéristiques d'écoulement (*Flood_Characteristics*). Par exemple, une inondation peut avoir un degré élevé de sévérité, une source pluviale et un fort débit d'écoulement.

Data property	Domain	Range
Has_Flood_Severity_Val	Flood_Severity	string
Has_Flooding_Characteristics_Val	Flood_Characteristics	string
Has_Flooding_Source_Val	Flood_Source	string
Has_Location_Name	Location	string
Has_Occurrence_Date_Time	Date_Time	dateTime
Has_Rainfall_Depth_Val	Rainfall_Depth	int
Has_Disaster_Name	Disaster_Type	string
Has_Risk_Val	Risk	string

TABLE 4.3 – Un extrait des propriétés de données

- *Spatiotemporal_Features* : représente les caractéristiques spatiotemporelles d'une crise. Elle est subdivisée en deux sous-classes, modélisant la localisation (*Location*) et la date/temps de déclenchement d'une crise (*Date_Time*).
- *Weather_Conditions* : représente les paramètres météorologiques d'une localisation. Elle est subdivisée en trois sous-classes représentant la profondeur des précipitations (*Rainfall_Depth*), la température (*Temperature*) et la vitesse du vent (*Wind_Speed*).
- *Risk* : ce concept représente les risques pouvant être engendrés suite au déclenchement d'un désastre. Une contamination, une explosion ou une grande panique peuvent être des exemples de risques.

Nous avons aussi créé des propriétés de données (*Data properties*) associées à un nombre de classes de notre ontologie. Un extrait de ces propriétés est présenté dans le tableau 4.3.

Dans la figure 4.4, nous avons illustré un exemple simplifié de représentation des caractéristiques d'une crise. Nous avons choisi l'exemple de la crise d'inondation qui a frappé la région du « Cap Bon » en septembre 2018. Pour ce faire, nous avons instancié notre ontologie par la création d'instances (individus) et des valeurs de données. Dans cet exemple, la crise (*Crisis_1*) admet plusieurs caractéristiques telles que le degré de sévérité de l'inondation (*Flood_Severity_1*), la source d'inondation (*Flood_Source_1*), les caractéristiques d'écoulement de l'eau (*Flood_Charac_1*) et la profondeur de précipitation (*Rainfall_Depth_1*). Chacune de ces instances admet une assertion de propriété de données. Dans notre exemple, la crise d'inondation admet un haut degré de sévérité. Pour exprimer ceci, nous avons associé la valeur de données *High* à l'instance *Flood_Severity_1* via la propriété de données *Has_Flood_Severity_Val*. Le même principe est appliqué pour les autres instances.

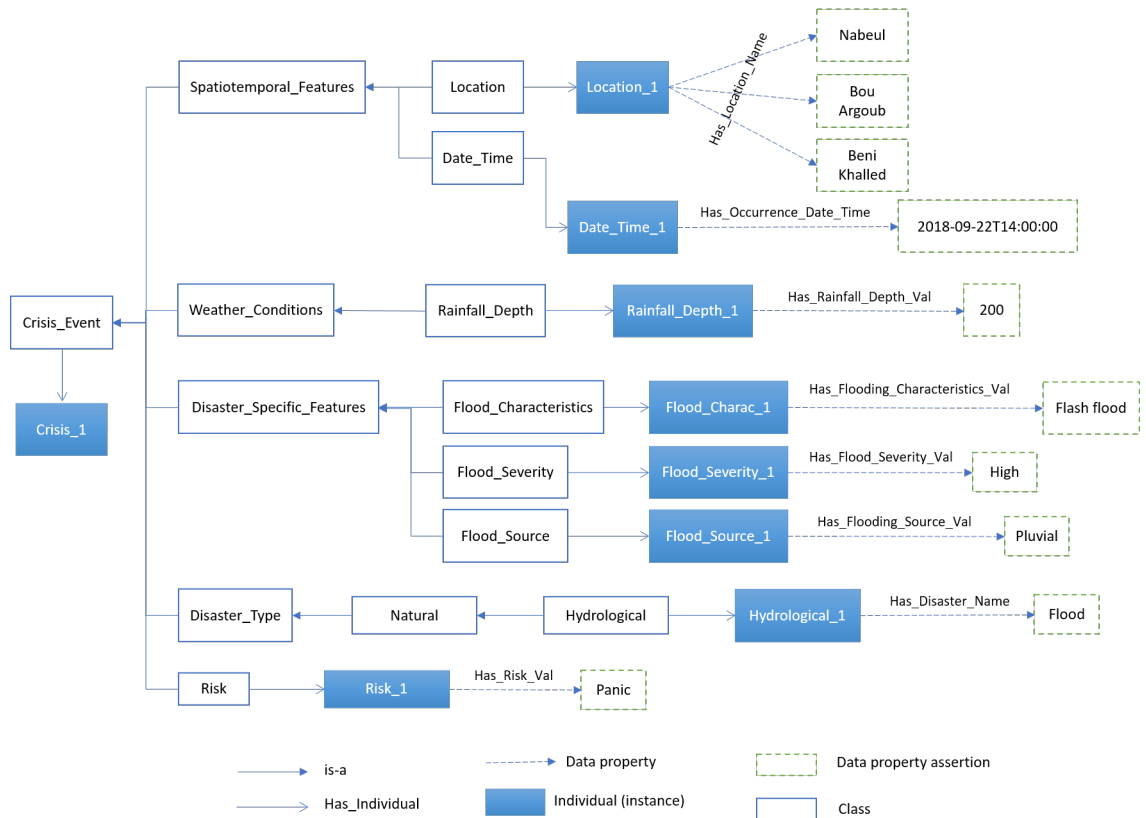


FIGURE 4.4 – Exemple de représentation des caractéristiques d'une crise

Représentation des impacts d'une crise Le concept *Crisis_Impacts* représente les effets qu'une crise puisse engendrer. Nous avons subdivisé ce concept en deux sous-concepts représentant les types d'impacts pouvant être générés (*Impacts*) et les objets vulnérables pouvant être affectés par ces impacts (*Exposure*). Chacun de ces concepts contient des sous-concepts permettant de bien décrire cette partie de notre modèle de domaine, comme le montre la figure 4.5.

Les sous-classes de la classe *Impacts* sont :

- *Casualties* : représente tout type d'impact pouvant être engendré sur des victimes de type humain ou animal. Ces victimes peuvent être morts (*Dead*), blessés (*Injured*), perdus (*Missing*) ou coincés (*Stuck*).
- *Damage* : représente tout type de dommage physique pouvant être produit sur des organismes non vivants tels qu'un blocage de route (*Blocked*), une structure effondrée (*Collapsed*), inondée (*Flooded*) ou brûlée (*Burned*).
- *Vital_Necessities_Shortage* : représente les pénuries de produits de première nécessité tels que la pénurie de l'eau (*Water_Shortage*), de la nourriture (*Food_Shortage*), de l'électricité (*Power_Outage*), du carburant (*Fuel_Shortage*) et des lignes de communication (*Communication_Lines_Down*).

Les sous-classes de la classe *Exposure* sont :

- *Asset* : décrit des organismes non vivants qui peuvent être des biens (*Good*) tels que les routes et les ponts ou des sites naturelles (*Natural_Site*) tels que les forêts et les mers.
- *Living_Being* : décrit des organismes vivants qui peuvent être des personnes (*Person*) ou des animaux (*Animal*).

Nous avons enrichi cette partie de notre modèle ontologique par la création de relations entre concepts (*Object properties*). En effet, nous avons modélisé la relation *Is_Impact_On* pour lier les classes *Impact* (Domain) avec *Exposure* (Range). Puisque nous avons catégoriser les impacts et les objets vulnérables, nous avons subdivisé cette relation en deux sous-relations : la relation *Is_Casualty_Impact_On* qui relie les classes *Casualties* et *Living_Being* et la relation *Is_Damage_Impact_On* qui relie les classes *Damage* et *Asset*. Afin d’avoir une vision plus claire sur la représentation des impacts d’une crise, nous avons élaboré, dans la figure 4.6, un exemple simplifié permettant de décrire les impacts de la crise d’inondation qui s’est déroulée dans la région de Nabeul.

Représentation de la réponse à une crise Nous avons modélisé les stratégies de réponse à une crise par une ontologie de tâche (Mizoguchi *et al.*, 1995) étant donné qu’elle décrit la structure de résolution des problèmes et peut être partagée. Dans CROnto, la réponse à une crise est représentée par la classe *Crisis_Response*. Cette dernière inclut des sous-classes permettant de décrire les connaissances liées aux opérations de réponse à une crise, comme le montre la figure 4.7 :

- *Emergency_Response_Plan* : représente un plan stratégique de réponse d’urgence à une crise. Autrement dit, cette classe représente l’ensemble des tâches ou des procédures à réaliser afin de réduire les impacts d’une crise.
- *Task_of_Plan* : décrit une étape d’un plan de réponse à une crise.
- *Responder* : réfère à un organisme de réponse à une crise. Cette classe est subdivisée en plusieurs sous-classes, chacune d’elles décrit un organisme de réponse bien déterminé tels que la protection civile (*Civil_Protection*), la police (*Police*) et les services médicaux (*Medical_Services*).
- *Action* : représente une action effectuée par un répondeur.
- *Resource* : réfère à tout objet physique requis pour effectuer une action. Ces ressources peuvent être de différents types : appareil pouvant être manipulé par l’Homme (*Device*), matériel (*Material*), accessoires (*Accessory*), vêtements (*Clothing*), produits pharmaceutique (*Pharmaceutical_Product*) ou armes (*Weapon*).

Le tableau 4.4 présente les différentes relations non taxonomiques qui existent entre les classes représentant les stratégies de réponse à une crise. Un plan de réponse à une crise a un ensemble de tâches de réponse. Chaque tâche de réponse implique au moins un répondeur, une action et une ressource. Nous avons créé les relations *Has_Part* et *Part_Of* pour exprimer ces relations de composition. Dans une tâche de réponse, un répondeur effectue des actions de réponse qui nécessitent des ressources. Ceci est exprimé via les relations (*Performs_Action*) et (*Requires_Resource*) respectivement. La figure 4.8 illustre un exemple simplifié de représentation de la réponse à une crise.

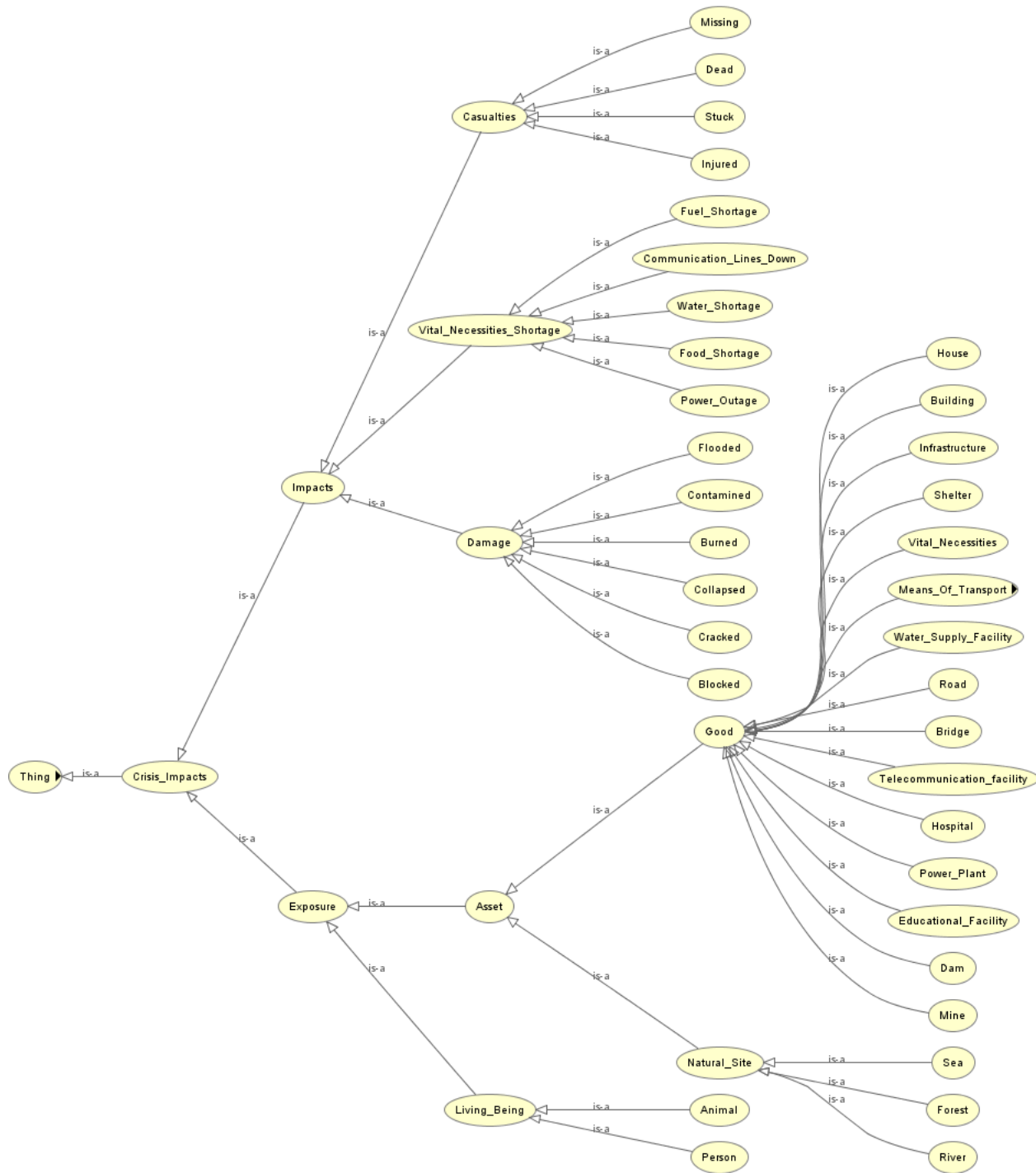


FIGURE 4.5 – Représentation des impacts d'une crise

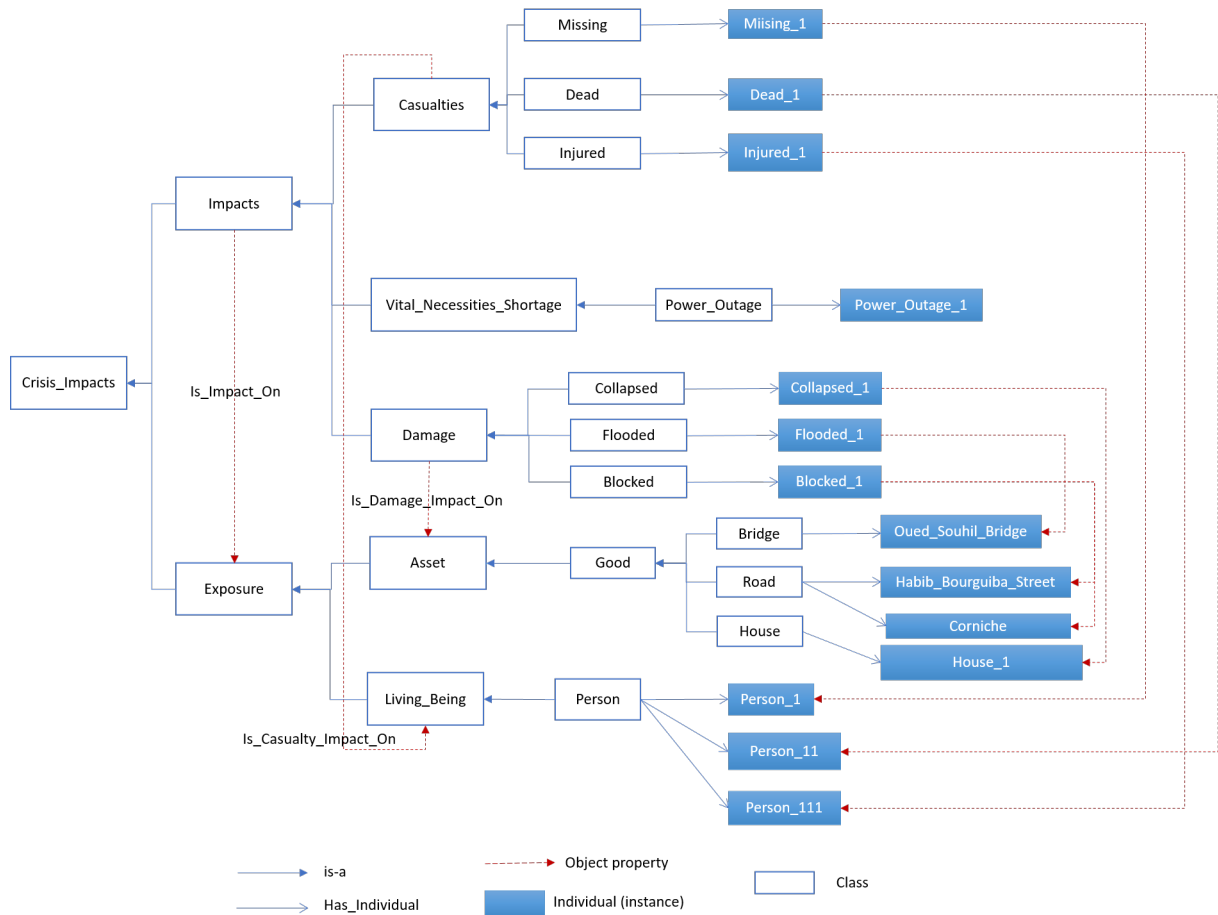


FIGURE 4.6 – Exemple de représentation des impacts d’une crise

Évaluation et validation

Plusieurs approches d’évaluation d’ontologies ont été proposées dans la littérature pour évaluer si l’ontologie a correctement représenté un certain domaine de connaissances. L’étude de ces approches d’évaluation nous a conduit à choisir l’approche d’évaluation par critères (Gruber, 1995; Gómez-Pérez, 1996; Yu *et al.*, 2005). Cette approche utilise un ensemble de critères pour vérifier la conception et le contenu de l’ontologie. Nous avons sélectionné une liste de critères parmi ceux qui sont décrits dans les travaux de (Yu *et al.*, 2005). Ces critères, illustrés dans la figure 4.9, sont : clarté, cohérence, concision et exactitude. Dans ce qui suit, nous allons détailler chaque critère d’évaluation.

Clarté (*clarity*) (Gruber, 1995) a déclaré que les termes d’ontologie définis « devraient communiquer efficacement le sens voulu », en éliminant tout aspect de subjectivité ou d’ambiguïté. L’auteur a ajouté que tous les termes définis dans l’ontologie devraient être formellement définis et que ces définitions devraient être documentées en langage naturel. Dans notre étude, les retours des



FIGURE 4.7 – Représentation de la réponse à une crise

experts du domaine interrogés nous ont permis de vérifier la clarté de l'ontologie. Leurs conseils et suggestions nous ont conduit à supprimer et/ou remplacer tout terme ambigu. Par exemple, nous avons créé le concept *Actor* pour représenter les organisations d'intervention d'urgence. Cependant, au cours d'un entretien avec des agents de la protection civile, ils ont convenu que ce terme ne donne pas le sens voulu et qu'il devrait être remplacé par le terme *Responder*. En ce qui concerne la définition formelle des termes ontologiques, la plupart des termes de l'ontologie de *CROnto* ont leurs définitions formelles puisqu'ils ont été extraits de la littérature et des manuels gouvernementaux. Par exemple, le terme *Meteorological* qui représente les désastres météorologiques est défini dans notre ontologie comme suit : « Danger causé par des conditions météorologiques et atmosphériques extrêmes de courte durée, à l'échelle micro ou méso, qui durent de quelques minutes à quelques jours »³.

Cohérence (*consistency*) Selon (Gruber, 1995), la cohérence signifie que les concepts d'ontologie doivent avoir une cohérence logique. En d'autres termes, ceci signifie que toute contradiction entre les axiomes explicites ou inférés et leurs définitions rend l'ontologie incohérente. À titre d'exemple, la classe *Shelter*, qui est définie comme tout bâtiment public pouvant être temporairement converti en refuge lors d'une crise, était une sous-classe des classes *Asset* et *Resource* en même temps. Cependant, les inférences étaient incohérentes car les ressources sont définies comme des éléments propres aux répondants afin de les utiliser pour effectuer des actions de ré-

3. Disaster Classification : <https://www.emdat.be/classification> (dernier accès le 28/09/2021)

Relation	Domain	Range
Has_Part	Emergency_Response_Plan	Task_of_Plan
	Task_of_Plan	Action
	Task_of_Plan	Resource
	Task_of_Plan	Responder
Part_Of	Task_of_Plan	Emergency_Response_Plan
	Action	Task_of_Plan
	Resource	Task_of_Plan
Performs_Action	Responder	Task_of_Plan
	Responder	Action
Requires_Resource	Action	Resource

TABLE 4.4 – Les relations entre les classes relatives à la représentation de la réponse à une crise

ponse. Néanmoins, ce n'est pas le cas pour le concept *Shelter*. Nous l'avons donc supprimé des sous-classes de la classe *Resource*.

Concision (*conciseness*) Selon (Gómez-Pérez, 1996), une ontologie est concise si elle n'inclut pas de définitions inutiles ou superflues en plus des redondances explicites entre les définitions. Par exemple, l'ontologie *CROnto* comprenait les classes *Earthquake_Specific_Features*, *Flood_Specific_Features*, *Terrorism_Specific_Features* et *Fire_Specific_Features* comme étant des sous-classes de la classe *Disaster_Specific_Features*. Ces sous-classes représentent respectivement les caractéristiques spécifiques d'un désastre de tremblement de terre, d'inondation, de terrorisme et d'incendie. Pendant la conception de notre ontologie, nous nous sommes rendus compte que la catégorisation des caractéristiques spécifiques des désastres est inutile. Par conséquent, nous avons supprimé ces catégories et nous avons fusionné les caractéristiques spécifiques des différents désastres sous la classe *Disaster_Specific_Features*.

Exactitude (*correctness*) L'exactitude réfère à la correspondance des entités et des propriétés du monde réel avec les concepts et les propriétés de l'ontologie (Yu *et al.*, 2005). Ce critère a été soigneusement pris en compte dans le développement et la validation de l'ontologie *CROnto*. A titre d'exemple, le retour d'expérience des experts du domaine nous a conduit à ajouter le concept

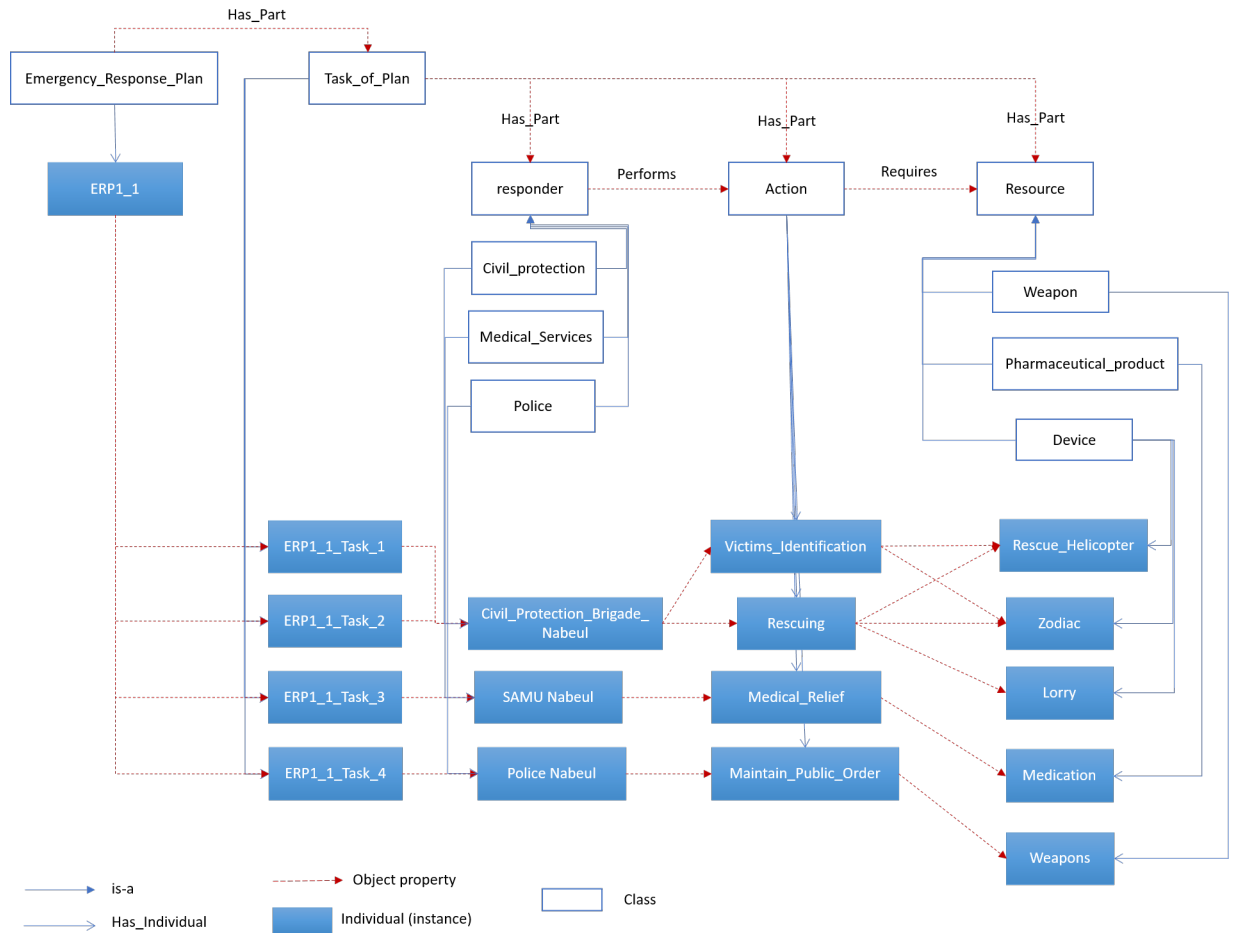
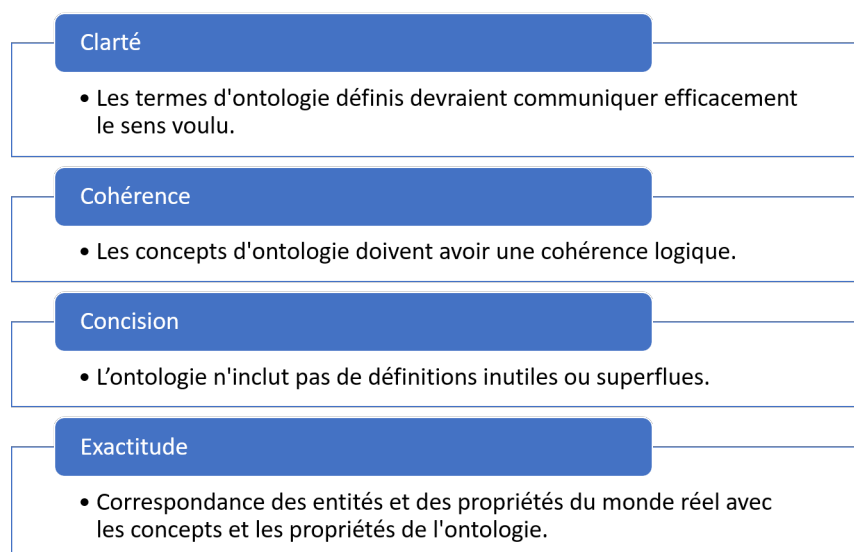


FIGURE 4.8 – Exemple de représentation de la réponse à une crise

Weather_Conditions car il constitue un élément clé dans les opérations de réponse aux crises. En effet, la complexité des tâches de réponse dépend des paramètres météorologiques. Particulièrement, dans le cas où ces paramètres ont des valeurs extrêmes, la complexité d'une crise peut accroître. Ceci augmente donc la complexité des tâches de réponse.

4.3 Raisonnement à partir de cas pour la réponse à une crise

Nous avons choisi la méthodologie du RàPC pour exploiter les connaissances déjà représentées par notre ontologie et raisonner sur elles afin de générer un plan stratégique de réponse à une crise. Puisque le raisonneur à partir de cas dépend fortement de la structure et du contenu des cas (Aamodt et Plaza, 1994), nous allons tout d'abord introduire dans cette section la représentation

FIGURE 4.9 – Critères d'évaluation de l'ontologie *CROnto*

des cas de réponse à une crise. Ensuite, nous allons détailler chacune des phases du cycle de RàPC retenu pour notre approche proposée (cf. figure 4.10).

4.3.1 Représentation de cas de réponse à une crise

En RàPC, la représentation des cas s'intéresse principalement à la définition de la structure d'un cas et à la spécification de la forme de sa représentation. Dans cette sous-section, nous allons présenter la structure d'un cas de réponse à une crise et décrire le modèle ontologique utilisé pour sa représentation.

Structure d'un cas

Dans notre étude, un cas de réponse à une crise stocké dans la base de cas comprend trois parties : la description du problème, la solution correspondante et le résultat de l'application de la solution sur le monde réel. Chaque partie d'un cas est définie par un ensemble d'attributs. Formellement, un cas de réponse à une crise est représenté en tant qu'un triplet (3-uplet) : Cas = { Problème, Solution, Résultat } tel que :

- Tuple 1 (Problème) : un problème est une description d'une situation de crise. Plus spécifiquement, une situation de crise est décrite par les caractéristiques d'un événement de crise (par exemple une crise d'inondation ou une crise de tremblement de terre) et les impacts de crise pouvant être engendrés sur divers objets vulnérables du monde réel.
- Tuple 2 (Solution) : la solution peut inclure un ou plusieurs plans stratégiques d'intervention d'urgence, exécutés afin d'atténuer les impacts de la crise déclenchée.

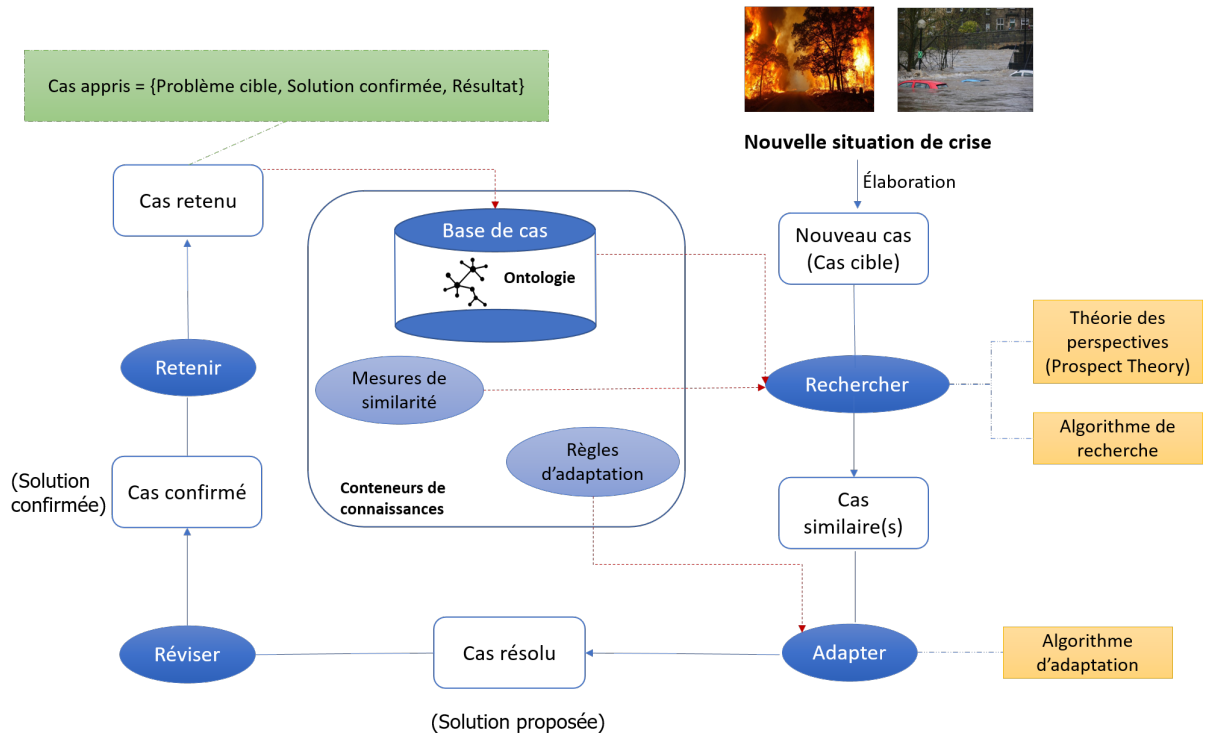


FIGURE 4.10 – Le cycle RàPC de notre approche proposée

- Tuple 3 (Résultat) : inclut les points forts et les points faibles de la solution appliquée. Les points forts incluent les résultats positifs et les bonnes pratiques. Les points faibles comprennent les difficultés et les obstacles rencontrés lors de l'application de la solution. Le stockage de telles informations dans un cas de réponse à une crise peut améliorer le retour d'expérience chez les gestionnaires de crise. Particulièrement, cela peut les faire gagner beaucoup de temps, d'argent et d'efforts.

Ontologie de la base de cas

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser les ontologies, non seulement pour représenter les cas de réponse à une crise, mais aussi pour les stocker, jouant ainsi le rôle d'une base de cas. Pour créer l'ontologie de la base de cas, nous avons personnalisé notre ontologie « CROnto » conformément à l'ontologie standard « CBROnto » (Díaz-Agudo et González-Calero, 2000). La figure 4.11 présente un extrait de l'ontologie de la base de cas (« CROnto » après personnalisation). La procédure de personnalisation inclut :

- L'ajout des concepts racines « CBR_CASE », « CBR_COMPONENT » et « CBR_FEATURES ». Le concept « CBR_CASE » subsume les instances des cas de réponse à une crise. Le concept « CBR_COMPONENT » subsume les différentes parties d'un cas : « Case_Problem », « Case_Solution » et « Case_Outcome ». Le concept « CBR_FEATURES » inclut tous les attributs d'un cas.

- La suppression d'un certain nombre de concepts qui ne sont pas pertinents pour notre approche à base de RàPC. Ceci nous permet de simplifier autant que possible la hiérarchie de la base de cas. Par exemple, nous avons supprimé le concept « Exposure » et nous avons utilisé plusieurs de ses sous-concepts pour représenter les dommages engendrés par une crise.
- L'ajout de nouveaux concepts tel que le concept « Feedback » qui représente le résultat de l'application d'une solution. Ce concept est divisé en deux sous-concepts : le concept « Strengths » qui permet de représenter les résultats positifs et les bonnes pratiques de réponse à une crise et le concept « Difficulties » qui permet de représenter les difficultés rencontrés dans les opérations d'intervention d'urgence. En outre, nous avons ajouté le concept « Response_Knowledge » qui permet de modéliser les connaissances liées aux procédures de réponse aux crises. Il inclut les concepts « Emergency_Response_Plan », « Task_of_Plan », « Responder », « Action » et « Resource ».

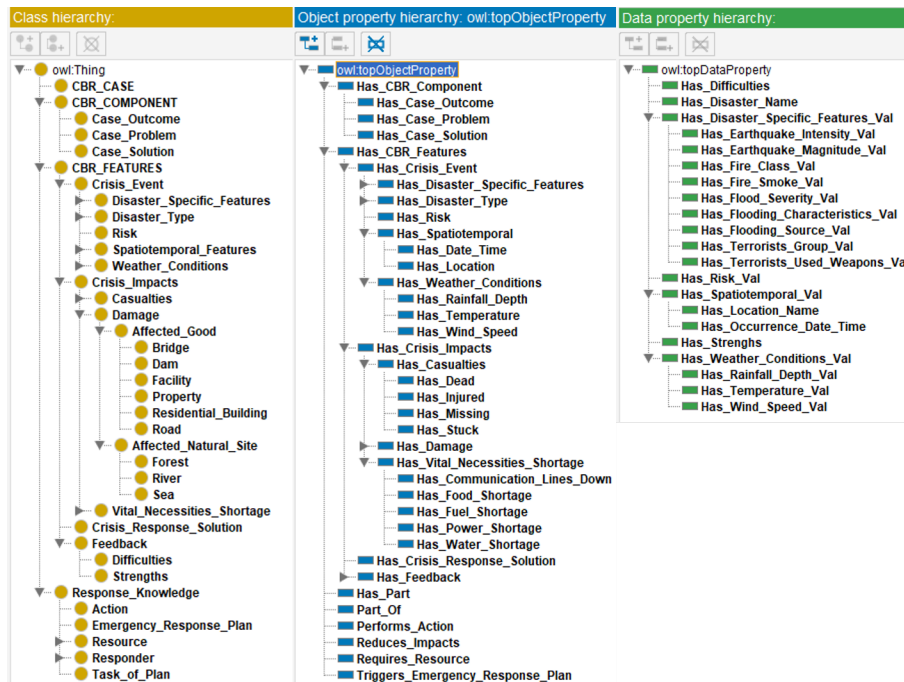


FIGURE 4.11 – Un extrait de l'ontologie de la base de cas

4.3.2 Recherche de cas

Rappelons que les gestionnaires de crise, lors de la réponse à une crise, sont souvent envahis par le stress, la pression du temps et l'incertitude. Sous telles circonstances, les preneurs de décisions d'urgence sont souvent dotés d'une rationalité limitée, d'une aversion au risque et d'une dépendance envers un point de référence (Wang *et al.*, 2017). Ceci pourrait affecter leurs décisions cruciales. Ainsi, le comportement psychologique du preneur de décisions d'urgence est un

paramètre non négligeable dans la réponse aux urgences (Wang *et al.*, 2015). Pour cela, nous proposons de prendre en compte l'état psychologique du gestionnaire de crise dans notre approche à base de RàPC, et plus spécifiquement, dans la phase de recherche de cas similaires. Ceci pourrait donner des résultats plus réalistes et améliorer la précision et l'efficacité de l'étape de recherche de cas similaires.

Afin d'atteindre notre objectif, nous proposons d'intégrer la théorie des perspectives cumulées ou « *Cumulative Prospect Theory* » (CPT) (Tversky et Kahneman, 1992), qui est un modèle descriptif de prise de décision dans des conditions de risque, dans le processus de recherche de cas similaires. En particulier, nous proposons d'améliorer la méthode présentée dans (Zheng *et al.*, 2018). Ces auteurs ont proposé une mesure de similarité basée sur la théorie des perspectives cumulées (*CPT-based similarity*) afin de prendre en compte les préférences du preneur de décisions d'urgence. Néanmoins, leur proposition de mesure de similarité basée sur la CPT ne peut être utilisée qu'avec des attributs de cas de type numérique et ne peut pas être utilisée avec d'autres types de données. Ainsi, nous proposons une extension de leur mesure de similarité basée sur la CPT, de manière à ce qu'elle puisse soutenir d'autres types de données comme les symboles et les variables linguistiques floues.

Dans la présente étude, nous adoptons un processus de recherche de cas en deux étapes comme l'illustre la figure 4.12 :

1. La première étape consiste à récupérer un ensemble de cas historiques potentiellement similaires, en se basant sur une comparaison entre les caractéristiques des événements de crise. En d'autres termes, cette étape s'occupe de la correspondance des événements de crise (*crisis event matching*). Pour ce faire, nous utilisons en combinaison avec les mesures de similarité syntaxique, les mesures de similarité à base de la théorie des perspectives cumulées.
2. La deuxième étape consiste à récupérer les cas historiques les plus similaires à partir de l'ensemble des cas potentiellement similaires récupérés dans l'étape précédente, et ce en se basant sur une mesure de similarité entre les impacts de crise. Autrement dit, il s'agit de la correspondance des impacts de crise (*crisis impacts matching*). Nous utilisons pour cela des mesures de similarité sémantique.

Notons ici que lorsque deux situations de crise présentent des événements de crise similaires, elles ont tendance à avoir des impacts de crise similaires. Ainsi, le but de la correspondance des événements de crise est de réduire le nombre de cas historiques qui seront utilisés dans la correspondance des impacts de crise. Ceci peut améliorer la performance de l'étape de recherche des cas les plus similaires. En outre, l'intégration de différentes méthodes de mesure de la similarité (similarité syntaxique et similarité sémantique) peut améliorer la précision de la phase de recherche de cas similaires (El-Sappagh *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018a).

Soit $HC = \{HC_1, HC_2, \dots, HC_n\}$ un ensemble fini de n cas historiques stockés dans la base de cas, où HC_i est le i^{me} cas historique, $1 \leq i \leq n$ et soit TC le cas cible.

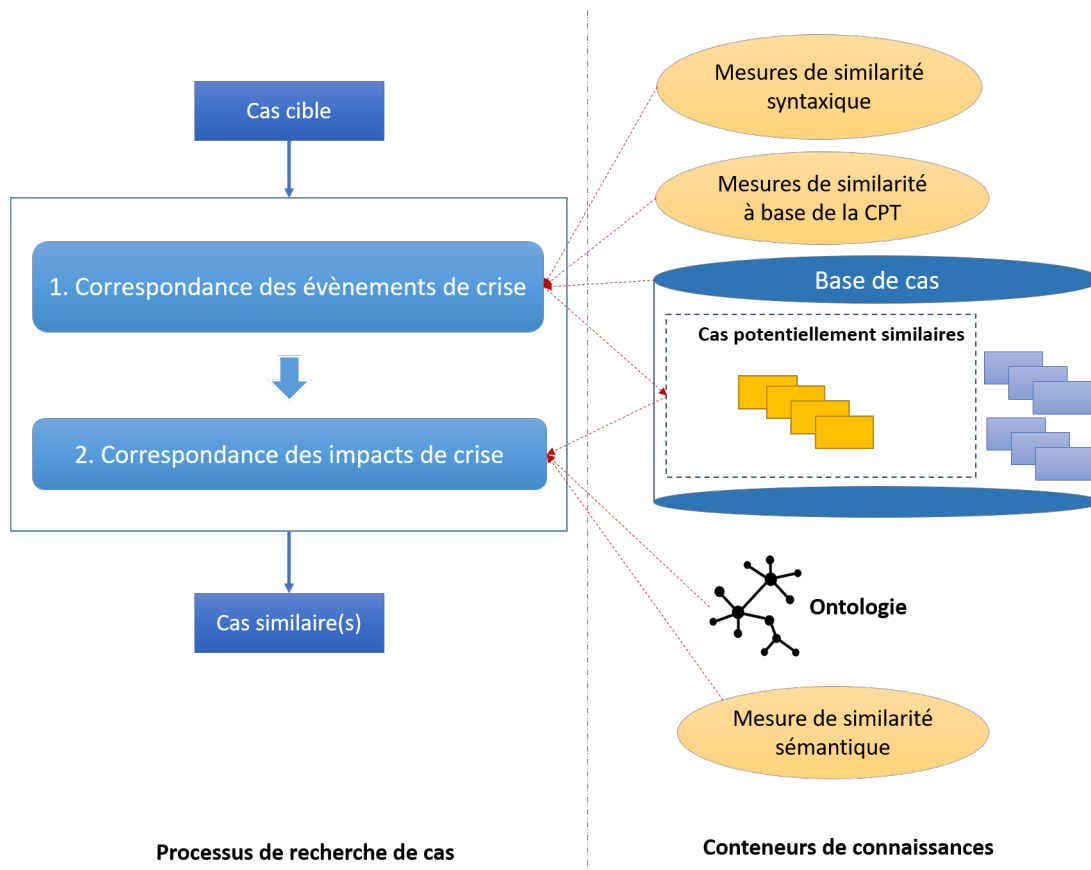


FIGURE 4.12 – Méthode proposée pour la recherche de cas similaires

Théorie des perspectives cumulées

La théorie des perspectives cumulées (CPT) (Tversky et Kahneman, 1992) est une extension de la théorie des perspectives proposée par (Kahneman et Tversky, 1979). C'est un modèle descriptif de prise de décision dans des circonstances de risque. CPT est considérée comme étant la théorie la plus dominante de prise de décision en situation d'incertitude et a été largement utilisée pour résoudre des problèmes de prise de décision en situation d'urgence en tenant compte du comportement psychologique du preneur de décisions d'urgence (Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018b). Ce modèle comprend deux phases dans le processus de décision : la phase d'édition et la phase d'évaluation. Tout d'abord, la phase d'édition consiste à exprimer les résultats en termes de gains et de pertes à partir d'un point de référence. Ensuite, la phase d'évaluation consiste à évaluer les perspectives éditées par une fonction de valeur. Celle-ci est exprimée sous forme de loi de puissance selon l'expression suivante (Tversky et Kahneman, 1992) :

$$v(x) = \begin{cases} x^\alpha, & x \geq 0 \\ -\lambda(-x)^\beta, & x < 0 \end{cases}$$

où x désigne les gains ou les pertes avec $x \geq 0$ ou $x < 0$ respectivement, α et β sont des paramètres de puissance liés aux gains et aux pertes respectivement, $\alpha \geq 0, \beta \leq 1$, λ est le paramètre d'aversion au risque qui représente la caractéristique d'être plus fort pour les pertes que pour les gains, $\lambda > 1$.

Correspondance des évènements de crise

Cette étape a pour but d'extraire des cas similaires potentiels qui seront utilisés pour l'étape suivante de mise en correspondance des cas (correspondance des impacts de crise). À cette fin, nous proposons une mesure de similarité hybride qui combine une mesure de similarité syntaxique et une mesure de similarité basée sur la théorie des perspectives cumulées. Plus spécifiquement, la première mesure évalue la similarité entre les valeurs des caractéristiques des événements de crise d'un cas cible et celles de chaque cas historique par rapport à leurs types de données. La deuxième mesure de similarité vise à prendre en compte le comportement psychologique du preneur de décision dans le processus de correspondance des événements de crise. Techniquement, les résultats de la mesure de similarité syntaxique sont utilisés par la fonction de valeur de la théorie des perspectives afin de générer des similarités basées sur la CPT.

Soient $F_{TC} = \{f_1^{TC}, f_2^{TC}, \dots, f_j^{TC}, \dots, f_p^{TC}\}$ et $F_{HC_i} = \{f_1^{HC_i}, f_2^{HC_i}, \dots, f_j^{HC_i}, \dots, f_p^{HC_i}\}$ des ensembles finis de caractéristiques d'événements de crise concernant un cas cible TC et un cas historique HC_i respectivement, f_j^{TC} et $f_j^{HC_i}$ représentent la j^{me} caractéristique de l'événement de crise de TC et HC_i respectivement, $1 \leq j \leq p$.

Mesure de similarité syntaxique La mesure de la similarité syntaxique des caractéristiques des événements de crise consiste à comparer leurs valeurs en fonction de leurs types de données entre le cas cible et chaque cas historique. Soit $Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ la similarité syntaxique entre un cas cible TC et un cas historique HC_i concernant la j^{me} caractéristique d'un événement de crise. Dans notre étude, nous utilisons la méthode proposée par (Fan *et al.*, 2014) pour déterminer $Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$. Dans ce qui suit, les formules de similarité concernant chaque type de données impliqué dans cette étude sont présentées. Nous notons ici que nous utilisons des notations issues des travaux de (Yu *et al.*, 2018).

Pour un type de données numérique précis, la valeur de similarité est calculée par :

$$Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) = \exp\left(-\frac{|v_{TC}(f_j) - v_{HC_i}(f_j)|}{\max_{1 \leq i \leq n} |v_{TC}(f_j) - v_{HC_i}(f_j)|}\right), 1 \leq j \leq p, 1 \leq i \leq n \quad (4.1)$$

où :

- v_{TC} et v_{HC_i} sont les valeurs de la j^{me} caractéristique de l'évènement de crise concernant TC et HC_i respectivement,
- $\max_{1 \leq i \leq n} |v_{TC}(f_j) - v_{HC_i}(f_j)|$ est la plus grande différence de la valeur de la j^{me} caractéristique entre TC et HC_i .

Pour le type de données texte, la valeur de similarité est calculée par :

$$Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) = \begin{cases} 1, v_{TC}(f_j) = v_{HC_i}(f_j), \\ 0, v_{TC}(f_j) \neq v_{HC_i}(f_j), \end{cases} \quad 1 \leq j \leq p, 1 \leq i \leq n \quad (4.2)$$

Pour le type de donnée variable linguistique floue, v_{TC} et v_{HC_i} sont des variables linguistiques floues, $v_{TC}(f_j), v_{HC_i}(f_j) \in U$. Selon les travaux de (Jiang *et al.*, 2008), une variable linguistique u_r ($u_r \in U$) peut être représentée par le nombre triangulaire flou $\tilde{h}_r = (h_r^a, h_r^b, h_r^c)$ comme suit :

$$\tilde{h}_r = (h_r^a, h_r^b, h_r^c) = \left(\max \left\{ \frac{(r-1)}{T}, 0 \right\}, \frac{r}{T}, \min \left\{ \frac{(r+1)}{T}, 1 \right\} \right) \quad (4.3)$$

où h_r^a, h_r^b et h_r^c sont des nombres réels et $h_r^c \geq h_r^b \geq h_r^a \geq 0$, $r = 0, \dots, T$, T est la cardinalité des termes linguistiques. Par exemple, si $U = \{u_0 = L : \text{Low}, u_1 = M : \text{Medium}, u_2 = H : \text{High}, u_3 = \text{VH} : \text{VeryHigh}\}$, alors les variables linguistiques (u_0, u_1, u_2, u_3) peuvent être représentés par des nombres triangulaires flous en utilisant l'équation 4.3 : $\tilde{h}_0 = (0, 0, 0.25)$, $\tilde{h}_1 = (0, 0.25, 0.5)$, $\tilde{h}_2 = (0.25, 0.5, 0.75)$ et $\tilde{h}_3 = (0.5, 0.75, 1)$.

Ensuite, la mesure de similarité entre TC et HC_i concernant un attribut de type variable linguistique floue peut être calculée comme suit :

$$Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) = \exp \left(- \frac{\sqrt{(v_{TC}^a(f_j) - v_{HC_i}^a(f_j))^2 + ((v_{TC}^b(f_j) - v_{HC_i}^b(f_j))^2 + (v_{TC}^c(f_j) - v_{HC_i}^c(f_j))^2)}}{\max \sqrt{(v_{TC}^a(f_j) - v_{HC_i}^a(f_j))^2 + ((v_{TC}^b(f_j) - v_{HC_i}^b(f_j))^2 + (v_{TC}^c(f_j) - v_{HC_i}^c(f_j))^2)}} \right) \quad (4.4)$$

avec :

- $(v_{TC}^a(f_j), v_{TC}^b(f_j), v_{TC}^c(f_j))$ et $(v_{HC_i}^a(f_j), v_{HC_i}^b(f_j), v_{HC_i}^c(f_j))$ désignent le nombre triangulaire flou correspondant de la valeur du j^{me} caractéristique d'évènement de crise de TC et HC_i respectivement,
- $\max \sqrt{(v_{TC}^a(f_j) - v_{HC_i}^a(f_j))^2 + ((v_{TC}^b(f_j) - v_{HC_i}^b(f_j))^2 + (v_{TC}^c(f_j) - v_{HC_i}^c(f_j))^2)}$ est la différence maximale de la valeur de la j^{me} caractéristique entre TC et HC_i , $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq p$.

En outre, désignons par $Sim^{SYN}(TC, HC_i)$ la similarité syntaxique concernant les caractéristiques (attributs) d'évènements de crise entre un cas cible TC et un cas historique HC_i . Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$Sim^{SYN}(TC, HC_i) = \sum_{j=1}^p w_j^{CE} Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}), 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p \quad (4.5)$$

avec w_j^{CE} est le poids du j^{me} caractéristique d'évènement de crise, souvent donné par le preneur de décision d'urgence, $0 \leq w_j^{CE} \leq 1$, $\sum w_j^{CE} = 1$.

Mesure de similarité basée sur la théorie des perspectives cumulées L'objectif de cette mesure de similarité est de prendre en compte le comportement psychologique du preneur de décisions d'urgence dans le processus de recherche de cas. Soit $Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ la similarité basée sur la CPT concernant la j^{me} caractéristique de l'évènement de crise entre TC et HC_i . Inspirés par les recherches de (Zheng *et al.*, 2018), nous introduisons les étapes suivantes pour déterminer $Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$:

1. Il convient de noter que $Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ utilise $Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ pour être déterminé. Par conséquent, il faut d'abord calculer $Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ (voir paragraphe 4.3.2).

2. Soit $Sim_{RP}(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ le point de référence concernant la similarité du j^{me} attribut d'évènement de crise entre TC et HC_i (c'est-à-dire la similarité préférée du j^{me} attribut d'évènement de crise). En d'autres termes, si $Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) \geq Sim_{RP}(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$, alors le preneur de décisions d'urgence ressentirait un gain, sinon, il ressentirait une perte.
3. $Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ peut être alors calculé par :

$$Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) = \begin{cases} (Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}))^\alpha, & Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) \geq Sim_{RP}(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}), \\ -\lambda(Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}))^\beta, & Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}) < Sim_{RP}(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}), \end{cases} \quad (4.6)$$

où :

- $(Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}))^\alpha$ et $-\lambda(Sim_1(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}))^\beta$ réfèrent à la similarité du j^{me} attribut d'évènement de crise entre TC et HC_i lorsque le preneur de décisions d'urgence ressent respectivement un gain et une perte,
- α et β représentent les paramètres d'exposant concernant les gains et les pertes respectivement, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$,
- λ réfère au paramètre d'aversion au risque, $\lambda > 1$.

Les valeurs de α , β et λ sont déterminés par les expériences (Tversky et Kahneman, 1992). Comme dans les travaux de (Wang et al., 2015), la présente étude utilise les valeurs suivantes afin de simplifier le calcul : $\alpha = 0.89$, $\beta = 0.92$ et $\lambda = 2.25$.

4. Soit $Sim^{CPT}(TC, HC_i)$ la similarité à base de la CPT concernant les attributs d'évènement de crise entre le cas cible TC et un cas historique HC_i . Elle peut être calculée par une simple méthode de pondération additive comme suit :

$$Sim^{CPT}(TC, HC_i) = \sum_{j=1}^p w_j^{CE} Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i}), \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p \quad (4.7)$$

où w_j^{CE} désigne le poids de la j^{me} attribut d'évènement de crise, $0 \leq w_j^{CE} \leq 1$, $\sum w_j^{CE} = 1$.

Similarité d'évènements de crise Après avoir déterminé à la fois la similarité syntaxique et la similarité basée sur le CPT des attributs d'évènement de crise (c'est à dire la similarité locale), la similarité globale de l'évènement de crise peut être finalement calculée par la formule suivante :

$$Sim_{CE}(TC, HC_i) = \theta Sim^{SYN}(TC, HC_i) + \delta Sim^{CPT}(TC, HC_i), \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p \quad (4.8)$$

où :

- $Sim_{CE}(TC, HC_i)$ fait référence à la similarité de l'évènement de crise entre le cas cible TC et un cas historique HC_i ,
- θ et δ représentent, respectivement, les poids relatifs à la similarité syntaxique et à la similarité à base de la CPT de l'évènement de crise, $0 \leq \theta, \delta \leq 1$ et $\theta + \delta = 1$.

De plus, un seuil ε peut être défini par le preneur de décisions d'urgence afin de supprimer les cas historiques ayant une faible valeur de similarité d'évènement de crise (c'est à dire $Sim_{CE}(TC, HC_i) < \varepsilon$) et conserver un ensemble de cas historiques potentiellement similaires ϕ , $\phi \subset HC$ pour la correspondance des impacts de crise.

Correspondance des impacts de crise

Dans la présente étude, afin de mesurer la similarité des impacts de crise entre un cas cible TC et un cas historique HC_i , la méthode de mesure de similarité sémantique à base des caractéristiques, proposée par (Sánchez *et al.*, 2012), est sélectionnée. En fait, cette mesure prend en compte les caractéristiques taxonomiques extraites d'une ontologie. Dans notre cas, les impacts de crise sont également classés (catégorisées) dans notre ontologie CROnto. Par conséquent, nous pensons que cette mesure de similarité est convenable pour évaluer la similarité des impacts de crise. De plus, la grande précision de cette mesure par rapport à d'autres mesures de similarité a été vérifiée expérimentalement sous certains repères (Sánchez *et al.*, 2012).

Le calcul de la similarité des impacts de crise peut se faire en deux étapes :

1. La première étape consiste à calculer la similarité locale entre les attributs des impacts de crise comme suit :

$$Sim_3(I_k^{TC}, I_l^{HC_i}) = 1 - \log_2 \left(1 + \frac{|S(I_k^{TC}) \setminus S(I_l^{HC_i})| + |S(I_l^{HC_i}) \setminus S(I_k^{TC})|}{|S(I_k^{TC}) \setminus S(I_l^{HC_i})| + |S(I_l^{HC_i}) \setminus S(I_k^{TC})| + |S(I_k^{TC}) \cap S(I_l^{HC_i})|} \right) \quad (4.9)$$

avec :

- $Sim_3(I_k^{TC}, I_l^{HC_i})$ désigne la similarité sémantique entre le k^{me} attribut d'impact de crise d'un cas cible (c'est à dire I_k^{TC}) et le l^{me} attribut d'impact de crise d'un cas historique (c'est à dire $I_l^{HC_i}$), $0 \leq k \leq m$, $0 \leq l \leq m_1$,
 - m et m_1 sont les nombres des attributs des impacts de crise de TC et HC_i respectivement, $1 \leq i \leq n$,
 - $S(I_k^{TC})$ et $S(I_l^{HC_i})$ sont les ensembles de caractéristiques taxonomiques associées aux concepts de l'ontologie I_k^{TC} et $I_l^{HC_i}$,
 - $|S(I_k^{TC}) \setminus S(I_l^{HC_i})|$ est la cardinalité de l'ensemble des caractéristiques taxonomiques différentielles de I_k^{TC} par rapport à $I_l^{HC_i}$,
 - $|S(I_l^{HC_i}) \setminus S(I_k^{TC})|$ est la cardinalité de l'ensemble des caractéristiques taxonomiques différentielles de $I_l^{HC_i}$ par rapport à I_k^{TC} ,
 - $|S(I_k^{TC}) \cap S(I_l^{HC_i})|$ est la cardinalité de l'ensemble des caractéristiques taxonomiques communes de I_k^{TC} et $I_l^{HC_i}$.
2. La deuxième étape consiste à calculer la similarité globale en utilisant la méthode de la simple somme pondérée des similarités locales comme suit :

$$Sim_{CI}(TC, HC_i) = \frac{\sum_{k=1}^m \max_{1 \leq l \leq m_1} \{Sim_3(I_k^{TC}, I_l^{HC_i})\} w_k^{CI}}{\sum_{k=1}^m w_k^{CI}}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.10)$$

avec :

- $Sim_{CI}(TC, HC_i)$ désigne la similarité des impacts de crise,
- $\max_{1 \leq l \leq m_1} \{Sim_3(I_k^{TC}, I_l^{HC_i})\} w_k^{CI}$ est la similarité locale la plus élevée concernant l'attribut I_k^{TC} avec HC_i ,
- w_k^{CI} est le poids de l'attribut I_k^{TC} .

Similarité globale entre un cas cible et un cas historique

Après avoir déterminé à la fois la similarité des événements de crise et la similarité des impacts de crise, la similarité globale entre un cas cible TC et un cas historique HC_i peut être calculée par l'équation suivante :

$$Sim(TC, HC_i) = \gamma Sim_{CE}(TC, HC_i) + \sigma Sim_{CI}(TC, HC_i), 1 \leq i \leq n \quad (4.11)$$

avec :

- $Sim(TC, HC_i)$ désigne la similarité entre un cas cible TC et un cas historique HC_i ,
- γ et σ représentent, respectivement, les poids relatifs à la similarité des événements de crise et à la similarité des impacts de crise, $0 \leq \gamma, \sigma \leq 1$ et $\gamma + \sigma = 1$.

En outre, un seuil φ peut être défini par le preneur de décisions d'urgence afin de supprimer les cas historiques ayant une faible valeur de similarité d'impacts de crise (c'est à dire $Sim_{CI}(TC, HC_i) < \varphi$) et conserver un ensemble de cas historiques les plus similaires ψ , $\psi \subset \phi$ pour l'étape d'adaptation de cas.

4.3.3 Adaptation de cas

Une fois le cas le plus similaire au cas cible est obtenu, le preneur de décisions d'urgence procède ensuite à l'adaptation de leurs solutions pour construire le plan stratégique de réponse d'urgence final afin de répondre efficacement à la crise courante. En effet, l'étape de l'adaptation est omniprésente dans notre étude étant donné que chaque situation de crise est unique et possède ses propres caractéristiques. Plus spécifiquement, nous pouvons souvent rencontrer une de ces situations où l'adaptation des éléments de la solution récupérée devient essentielle (Fan *et al.*, 2015) : un ou plusieurs impacts de crise dans le cas historique similaire ne sont pas impliqués dans le problème cible, les tâches incluses dans le plan de réponse d'urgence du cas similaire ne sont pas suffisantes pour répondre à la crise courante ou ne peuvent pas être mis en œuvre selon les exigences pratiques actuelles. Ici, ce sont les gestionnaires de crise qui peuvent analyser la situation de crise courante, étudier l'applicabilité du plan de réponse d'urgence récupéré vis à vis le problème cible et présenter leurs jugements en fonction de leurs connaissances et expériences. S'il existe des situations de non convenance de la solution récupérée vis à vis le problème cible, des ajustements des éléments du plan de réponse d'urgence doivent être effectués afin qu'il soit adapté à la situation de crise courante.

Pour ce faire, nous avons adopté comme convenu une approche transformationnelle d'adaptation (Aamodt et Plaza, 1994; Wilke et Bergmann, 1998). Rappelons que selon cette approche, des éléments de la solution d'un cas récupéré vont être transformés (ajoutés, modifiés ou supprimés). Rappelons aussi que si ces transformations modifient des valeurs des attributs de la solution récupérée, il s'agit donc d'une adaptation substitutionnelle. Sinon, s'ils affectent la structure de la solution (ajout et suppression d'éléments de solution), il s'agit plutôt d'une adaptation structurelle. Dans notre cas et afin d'obtenir un plan final de réponse d'urgence adaptable à la situation de crise courante, nous apportons des modifications (ajout, suppression, substitution) aux instances de notre ontologie qui constituent les éléments de la solution du cas similaire récupéré. Inspirés

des travaux de (Yu *et al.*, 2018; Fan *et al.*, 2015), notre processus d’adaptation proposé, illustré dans la figure 4.13, s’étale sur cinq principales étapes :

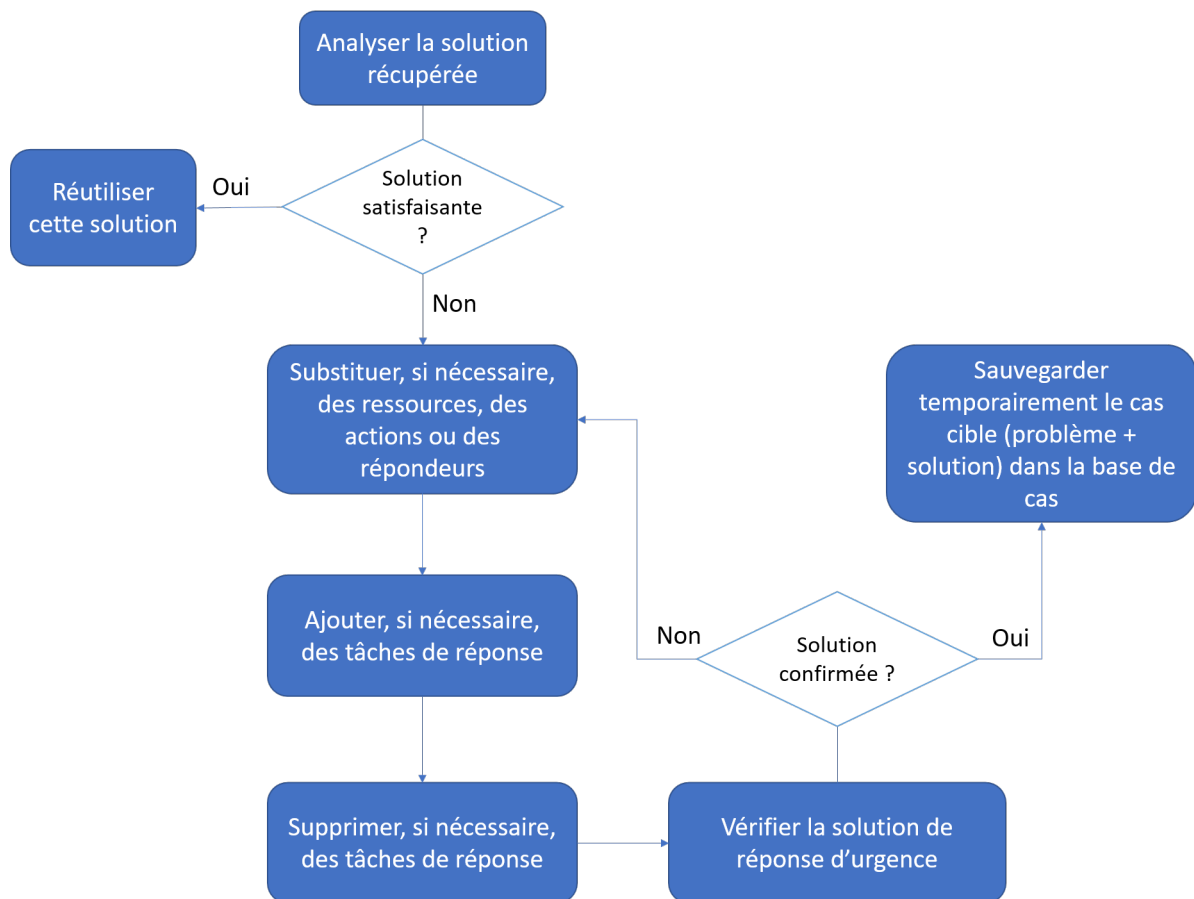


FIGURE 4.13 – Processus d’adaptation d’une solution de réponse à une crise

1. Étape 1 : le preneur de décisions d’urgence et les experts analysent si les tâches incluses dans les différents plans de réponse d’urgence de la solution récupérée sont suffisantes pour faire face aux impacts engendrés par la crise courante. Si oui, la solution de réponse récupérée sera réutilisée. Sinon, elle sera modifiée.
2. Étape 2 : si un plan de réponse d’urgence inclut des tâches qui nécessitent des modifications au niveau des ressources, des actions ou des répondeurs, il faut donc mettre à jour les valeurs de ces éléments de réponse.
3. Étape 3 : si les tâches d’un plan de réponse d’urgence sont insuffisantes pour répondre efficacement aux impacts de crise, il faut donc ajouter d’autres tâches de réponse.
4. Étape 4 : si un plan de réponse d’urgence contient plusieurs tâches non nécessaires à la situation de crise courante, il faut donc les supprimer pour éviter une réponse excessive.
5. Étape 5 : le preneur de décisions d’urgence vérifie l’ensemble des plans de réponse d’urgence. Si la solution de réponse est confirmée, il sauvegarde temporairement le cas cible (problème et solution correspondante) dans la base de cas.

Exemple illustratif

Dans ce paragraphe, nous proposons un exemple illustratif, créé par nous-même, d'adaptation d'un cas similaire récupéré. Le but de cet exemple fictif est de mieux comprendre le processus d'adaptation d'un plan stratégique de réponse d'urgence récupéré.

Supposons qu'une crise d'inondation a frappé une région rurale où l'accès aux victimes blessées est extrêmement difficile. Cependant, la solution du cas le plus similaire récupéré contient un plan de réponse d'urgence où les pompiers ont utilisé des zodiacs pour accomplir leur tâche de sauvetage. En outre, elle n'inclut pas des tâches de réponse de traitement des blessés. Par contre, elle contient une tâche de recherche de cadavres en utilisant des équipements de plongée. La figure 4.14 montre le modèle ontologique du plan stratégique initial de réponse.

Ici, le plan stratégique de réponse doit être évidemment adapté à la situation d'urgence courante. Par conséquent, le preneur de décisions d'urgence décide de substituer la ressource *Zodiac* par la ressource *Helicopter* car l'utilisation des zodiacs est difficile dans une zone rurale, d'ajouter une nouvelle tâche de réponse permettant de traiter les blessés et de supprimer la tâche de recherche de cadavres. La figure 4.15 montre le modèle ontologique du plan stratégique de réponse adapté.

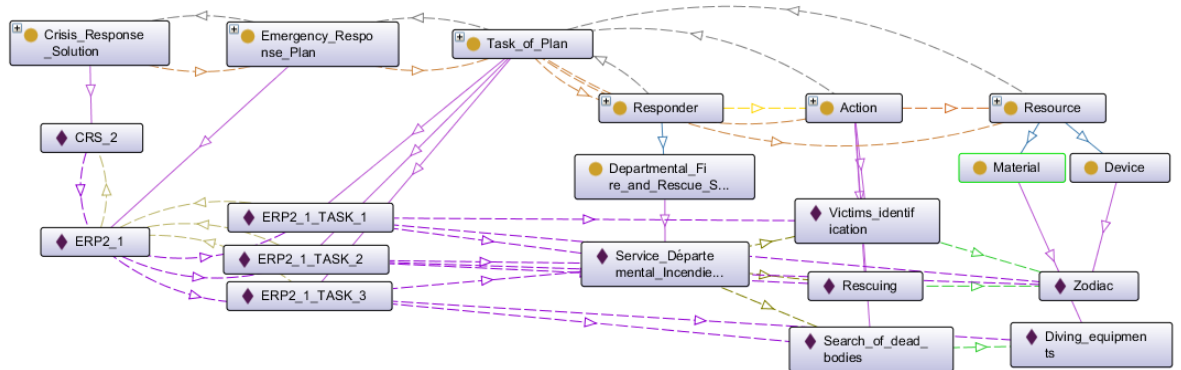


FIGURE 4.14 – Modèle ontologique du plan stratégique initial de réponse

4.3.4 Révision et apprentissage

Afin de garantir la pertinence de la solution cible proposée à l'issue de la phase d'adaptation, le preneur de décisions d'urgence l'évalue en l'appliquant dans le monde réel. Dans cette phase, la solution cible est alors retenue temporairement dans la base de cas en attendant la confirmation du preneur de décisions d'urgence concernant son efficacité par rapport à la situation de crise courante. Si la révision échoue, l'expert répare la solution pour qu'elle puisse répondre aux besoins de la situation d'urgence. Une fois la solution est confirmée, le cas cible testé peut être retenu en permanence dans la base de cas (apprentissage). Notons ici que les résultats d'application de la solution retenue sont aussi sauvegardés pour fournir un retour d'expérience qui permet d'aider

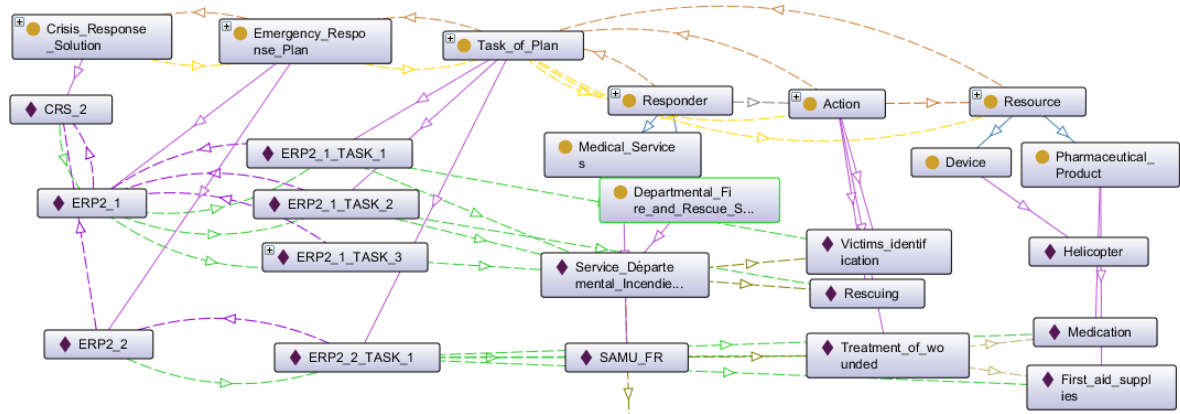


FIGURE 4.15 – Modèle ontologique du plan stratégique de réponse adapté

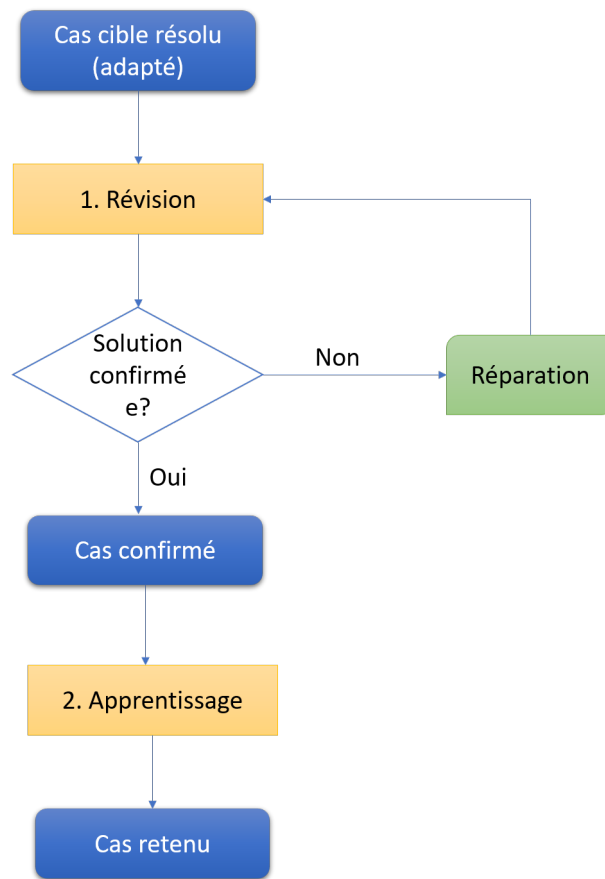


FIGURE 4.16 – Processus de révision et d'apprentissage

dans la résolution des prochaines situations de crise. La figure 4.16 illustre les phases de révision et d'apprentissage.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. Nous avons présenté, en premier lieu, l'architecture globale de notre approche qui est structurée en trois niveaux : la collecte collaborative des données situationnelles de crise, l'élaboration du problème cible et le raisonnement. Le but principal de l'approche proposée est de générer une solution adaptable à une situation de crise courante sous forme d'un plan de réponse stratégique d'urgence. Pour ce faire, nous avons adopté les ontologies pour modéliser les connaissances de réponse à une crise et le raisonnement à partir de cas pour raisonner sur ces connaissances capitalisées afin de produire une solution adaptable à la situation de crise courante. Pour cela, nous avons présenté, en deuxième lieu, notre modèle ontologique de réponse à une crise ainsi que toutes les étapes du processus de son développement et évaluation. Notre modèle représente les connaissances liées à trois aspects clés du domaine de réponse à une crise : les caractéristiques d'une crise, les impacts d'une crise et la réponse à une crise. A la fin de ce chapitre, nous avons décrit toutes les phases du processus de RàPC impliquées dans notre approche. Plus spécifiquement, nous avons commencé par la description de la structure d'un cas de réponse à une crise ainsi que l'ontologie de la base de cas. Puis, nous avons focalisé sur l'étape de recherche d'un cas similaire qui a impliqué des mesures de similarités syntaxiques, sémantique et à base de la théorie des perspectives afin de prendre en compte le comportement psychologique du preneur de décisions lors de cette étape. Par la suite, nous avons décrit l'étape d'adaptation qui permet d'ajuster la solution du cas le plus similaire récupéré afin de répondre aux besoins de la situation de crise courante. Enfin, nous avons présenté la phase de révision qui permet de tester la solution adaptée et la phase d'apprentissage qui permet de retenir le cas cible confirmé, ajoutant ainsi une nouvelle expérience dans la base de cas.

Le chapitre suivant présente les expérimentations réalisées afin d'évaluer notre approche d'aide à la décision.

Chapitre 5

Expérimentation et évaluation

Sommaire

5.1	Construction de la base de cas	110
5.1.1	Sources des cas	110
5.1.2	Instanciation de l'ontologie de la base de cas	111
5.2	Étude de cas	112
5.2.1	Collecte des données de crise	113
5.2.2	Élaboration du cas cible	113
5.2.3	Cycle de RàPC	115
5.3	Évaluation de l'approche proposée	123
5.3.1	Analyse comparative avec une méthode existante de recherche de cas similaires	124
5.3.2	Interprétation des résultats d'intégration de la CPT dans la méthode de recherche de cas similaires	126

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre approche d'aide à la décision à base d'ontologie et RàPC pour la réponse aux crises. Plus spécifiquement, nous avons utilisé les ontologies pour représenter et capitaliser les connaissances liées au domaine d'application, représenter et stocker les cas de réponse aux crises sous forme d'instances d'ontologie et fournir un support pour la mesure de similarité sémantique entre un cas cible et un cas historique. Dans la phase de recherche de cas similaires, nous avons adopté un processus de recherche scindé en deux étapes. La première étape consiste à récupérer les cas potentiellement similaires par la correspondance des événements de crise entre le cas cible et les cas historiques, à l'aide des mesures de similarité syntaxique et à base de la théorie des perspectives. La deuxième étape consiste à récupérer les cas les plus similaires par la correspondance des impacts de crise en utilisant des mesures de similarité sémantique. Dans la phase de réutilisation, nous avons adopté une approche transformationnelle d'adaptation. Selon cette approche, des procédures de substitution, de suppression ou d'ajout peuvent être appliquées sur les éléments de la solution récupérée nécessitant des ajustements. Rappelons que le but principal de cette phase est de générer un plan stratégique de réponse adaptable à la situation de crise courante. Dans les phases de révision et d'apprentissage, la nouvelle solution de réponse générée est évaluée et réparée si nécessaire. Si elle est confirmée par les experts, elle sera conservée avec le problème cible correspondant et les résultats de son application dans la base de cas.

Le but de ce présent chapitre est d'évaluer notre approche proposée. En particulier, nous allons évaluer les aspects applicabilité, validité et efficacité de notre approche d'aide à la décision. Pour cela, nous allons tout d'abord décrire l'étape de préparation du terrain d'expérimentation qui consiste à la construction de la base de cas. Ensuite, nous allons effectuer une étude de cas afin d'évaluer l'applicabilité de notre approche proposée. Enfin, nous allons conduire des expérimentations pour tester la validité et l'efficacité de notre approche à base de RàPC et d'ontologie.

5.1 Construction de la base de cas

Dans cette section, nous décrivons le processus adopté de construction de la base de cas sur laquelle repose notre approche d'expérimentation, allant de la collecte des données historiques de crise depuis différentes sources à la création des instances des cas historiques. La figure 5.1 illustre le processus suivi pour la construction de la base de cas.

5.1.1 Sources des cas

Dans notre travail, nous nous intéressons spécifiquement aux crises d'inondation vu qu'elles constituent les désastres les plus fréquentes en Europe et en Tunisie. À défaut des données relatives aux crises passées en Tunisie malgré nos efforts pour les collecter auprès des autorités tunisiennes, nous allons nous appuyer sur les données de crises d'inondation passées en Europe, et en particu-

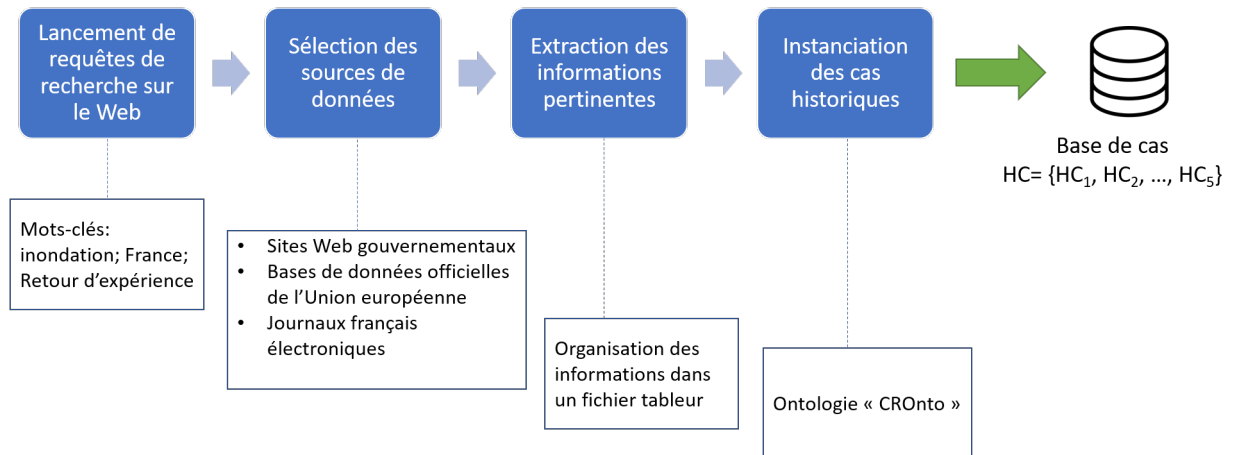


FIGURE 5.1 – Processus adopté pour la construction de la base de cas

lier, la France. La disponibilité des bases de données publiques en ligne¹ nous a donné la chance pour collecter des cas historiques de crise d’inondation. Plus spécifiquement, ces bases nous a fourni des données relatives aux caractéristiques de crise ainsi que leurs impacts. En revanche, les procédures de réponse aux crises ne sont pas disponibles dans ces sources de données. Alors, nous avons collecté et examiner les rapports publics en ligne de retour d’expérience des autorités françaises pour pouvoir extraire les plans stratégiques de réponse d’urgence exécutés (Rouzeau *et al.*, 2010; Hernu *et al.*, 2010; Des Comptes, 2012; Perrin *et al.*, 2017; SIARCE, 2017; Ayphassorho *et al.*, 2019). En résumé, nous avons pu collecter cinq cas historiques réels de crises d’inondation passées en France entre 2010 et 2019, $HC = \{HC_1, HC_2, \dots, HC_5\}$. Chacun de ces cas comporte vingt attributs dans sa partie problème, comme le montre la figure 5.2. Notons que nous avons divisé le tableau en deux parties pour avoir une meilleur visibilité de la figure.

5.1.2 Instanciation de l’ontologie de la base de cas

Suite à la collecte des cas historiques de crise, nous les avons conservés dans notre ontologie *CROnto* via leur instanciation. Rappelons que chaque cas historique est divisé en trois parties : problème, solution et résultat. La figure 5.3 illustre un exemple de cas historique stocké dans la base de cas. Pour plus de clarté et de lisibilité, nous avons détaillé dans la figure 5.4 la partie solution de l’exemple du cas historique.

1. European past floods : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-past-floods>

CaseID	Location	Flooding_Source	Flood_Severity	Rainfall	Flooding_Characteristics	Dead	Injured	Missing	Stuck	Flooded_Property
Case01	Var	Fluvial,Pluvial	Very_high	397	Flash flood,High velocity flow	23	0	2	0	FP1
Case02	Atantique	Fluvial	Moderate	50	Slow onset flood	47	79	0	0	FP2
Case03	Hérault	Pluvial	Very_high	300	Slow onset flood	6	0	0	0	FP3
Case04	Alpes-Maritime	Pluvial	Very_high	130	Flash flood,High velocity flow	20	0	0	0	FP4
Case05	Aude	Pluvial	Very_high	296	Flash flood,High velocity flow	15	99	0	0	FP5

CaseID	Flooded_Road	Flooded_House	Flooded_Dam	Flooded_Facility	Flooded_Bridge	Communication_Lines_Down	Food_Shortage	Fuel_Shortage	Power_Outage	Water_Shortage
Case01	FR1	FH1	FD1	FF1	NULL	CLD1	NULL	NULL	PO1	WS1
Case02	FR2	FH2	FD2	FF2	NULL	CLD2	NULL	NULL	PO2	NULL
Case03	FR3	FH3	NULL	FF3	NULL	CLD3	NULL	NULL	PO3	NULL
Case04	FR4	FH4	NULL	FF4	NULL	CLD4	NULL	NULL	PO4	NULL
Case05	FR5	FH5	NULL	NULL	FB5	NULL	NULL	NULL	PO5	NULL

FIGURE 5.2 – Échantillon d’apprentissage collecté

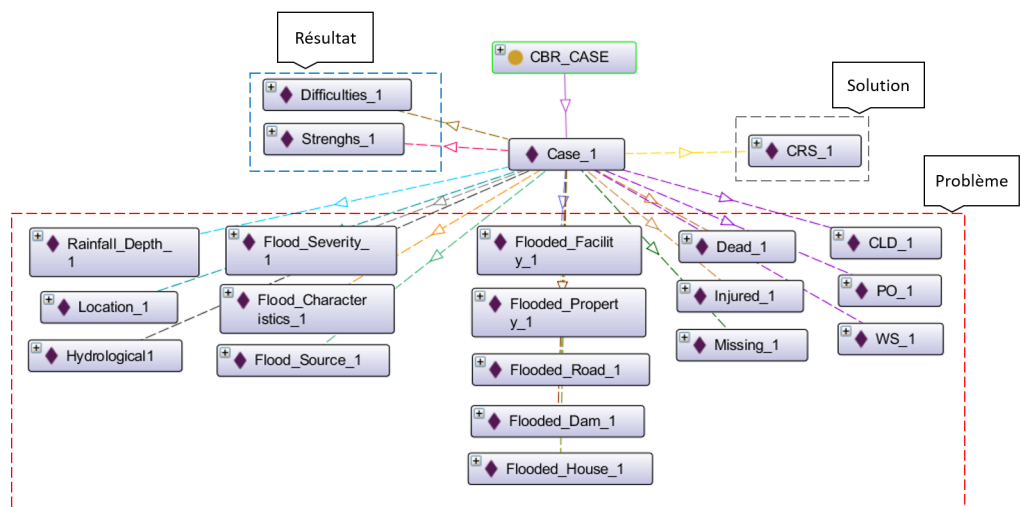


FIGURE 5.3 – Exemple de cas historique de crise stocké dans la base de cas

5.2 Étude de cas

Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous conduisons une étude de cas afin d’illustrer comment utiliser notre approche proposée d’aide à la décision et d’évaluer son utilité. Nous avons utilisé la crise d’inondation qui a frappé la région de l’Essonne en France en juin 2016², comme cas cible. Les données relatives à cette crise sont disponibles et publiques³. Afin de générer une solution convenable pour ce problème cible, nous allons suivre toutes les étapes de notre approche d’aide à la décision à base de RàPC et d’ontologie.

2. <https://www.tdg.ch/monde/crue-seine-rythme-ralenti/story/23663892>

3. <https://www.interieur.gouv.fr/Publications/Rapports-de-l-IGA/Rapports-recents/>

Inondations-de-mai-et-juin-2016-dans-les-bassins-moyens-de-la-Seine-et-de-la-Loire-retour-d-experience

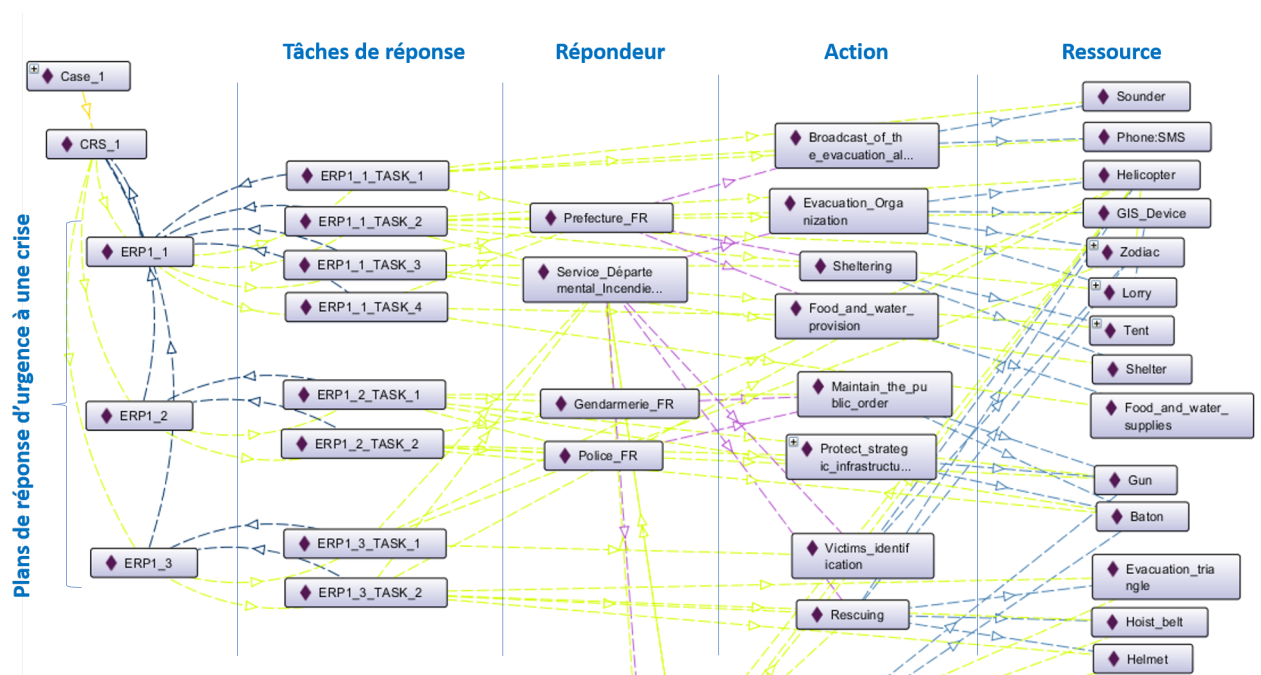


FIGURE 5.4 – Solution de l'exemple du cas historique

5.2.1 Collecte des données de crise

Pour pouvoir identifier les caractéristiques de la crise d'inondation ainsi que les pertes économiques et sociales engendrées, les différentes parties prenantes responsables de la réponse à la crise, issues de plusieurs organismes de réponse, optent tout d'abord à la collecte collaborative des données situationnelles de crise. Selon notre approche proposée, les différents réponders responsables de la collecte des données qui sont déployés sur le champ de crise, saisissent ces données et les envoient au serveur de base de données de la cellule de crise à l'aide d'un appareil mobile (téléphone ou tablette). La figure 5.5 illustre la maquette de l'application mobile dédiée à la collecte des données de la part du service départemental d'incendie et de secours.

5.2.2 Élaboration du cas cible

Rappelons que nous avons utilisé les ontologies pour, entre autres, stocker les cas historiques de réponse à une crise en tant qu'instances. De ce fait, une instance du cas cible doit être créée dans l'ontologie *CROnto*. Dans l'étape d'élaboration du cas cible, le preneur de décisions d'urgence instancie l'ontologie *CROnto* selon les données situationnelles de crise collectées et sauvegardées dans la base de données du système d'aide à la décision de la cellule de crise, en utilisant l'API OWL⁴. Dans le présent cas, une instance du cas cible de la crise d'inondation de l'Essonne est créée dans notre ontologie.

4. <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/OWLAPI>

FIGURE 5.5 – Maquette de l'application mobile de collecte des données de crise d'inondation

Afin de décrire l'évènement de crise d'inondation courant, cinq attributs sont sélectionnés. Ces caractéristiques, leurs types de données et leurs poids correspondants sont présentés dans le tableau 5.1.

En outre, les valeurs des attributs des évènements de crise des cas historiques HC et du cas cible TC sont données dans le tableau 5.2. Notons ici que les valeurs de l'attribut $f3$, dont le type est variable linguistique floue, sont déterminées à partir de l'ensemble de variables linguistiques floues prédéfini U , où $U = \{u_0 = L : \text{Low}, u_1 = M : \text{Medium}, u_2 = H : \text{High}, u_3 = VH : \text{VeryHigh}\}$. Pour la description des impacts de crise, huit attributs sont impliqués : Dead, Injured, Flooded_Property, Flooded_Road, Flooded_House, Communications_Lines_Down, Power_Outage et Water_Shortage.

Attribut	Code	Type de donnée	Poids
Location	f_1	Texte	0.10
Flood_Source	f_2	Texte	0.15
Flood_Severity	f_3	Variable linguistique floue	0.30
Rainfall	f_4	Numérique	0.15
Flood_Characteristics	f_5	Texte	0.30

TABLE 5.1 – Détails sur les attributs d'évènement de crise

Cas	Attributs d'évènement de crise				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
HC ₁	Var	Fluvial, Pluvial	VH	397	Flash flood, High velocity flow
HC ₂	Littoral Atlantique	Fluvial	M	50	Slow onset flood
HC ₃	Hérault	Pluvial	VH	300	Slow onset flood
HC ₄	Alpes-Maritimes	Pluvial	VH	130	Flash flood, High velocity flow
HC ₅	Aude	Pluvial	VH	296	Flash flood, High velocity flow
TC	Essonne	Fluvial, Pluvial	H	136	Flash flood, High velocity flow

TABLE 5.2 – Valeurs des attributs d'évènement de crise

5.2.3 Cycle de RàPC

Suite à l'élaboration du cas cible, le preneur de décisions d'urgence commence le cycle de raisonnement à partir de cas allant de la phase de recherche des cas similaires jusqu'à la sauvegarde du cas résolu et testé.

Recherche des cas similaires

Dans cette phase, rappelons que nous allons tout d'abord faire correspondre les évènements de crise afin d'extraire les cas historiques potentiellement similaires. Ensuite, à partir de l'en-

semble de ces extraits, nous allons faire correspondre les impacts de crise afin de récupérer les cas historiques les plus similaires. Dans ce qui suit, nous allons décrire les étapes de la phase de recherche.

- **Étape 1** : pour les attributs de type numérique précis (c'est à dire f_4), la similarité d'attribut $Sim_1(f_4^{TC}, f_4^{HC_i})$ est calculée en utilisant l'équation 4.1. Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 5.3.
- **Étape 2** : pour les attributs de type texte (c'est à dire f_1, f_2, f_5), les similarités d'attribut $Sim_1(f_1^{TC}, f_1^{HC_i})$, $Sim_1(f_2^{TC}, f_2^{HC_i})$ et $Sim_1(f_5^{TC}, f_5^{HC_i})$ sont respectivement calculées en utilisant l'équation 4.2. Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 5.3.
- **Étape 3** : pour les attributs de type variable linguistique floue (c'est dire f_3), le nombre triangulaire flou est calculé en utilisant l'équation 4.3. Les résultats de transformation sont présentés dans le tableau 5.4. Ensuite, la similarité d'attribut $Sim_1(f_3^{TC}, f_3^{HC_i})$ est calculée en utilisant l'équation 4.4. Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 5.3.
- **Étape 4** : maintenant, la similarité syntaxique des événements de crise $Sim^{SYN}(TC, HC_i)$ peut être calculée en utilisant l'équation 4.5. Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau 5.3.
- **Étape 5** : supposons que les similarités d'attributs préférés par le preneur de décisions d'urgence (similarités de point de référence) sont : $Sim_{RP}(f_1^{TC}, f_1^{HC_i}) = 0.2$, $Sim_{RP}(f_2^{TC}, f_2^{HC_i}) = 0.7$, $Sim_{RP}(f_3^{TC}, f_3^{HC_i}) = 0.4$, $Sim_{RP}(f_4^{TC}, f_4^{HC_i}) = 0.6$ et $Sim_{RP}(f_5^{TC}, f_5^{HC_i}) = 0.8$. Alors, la similarité basée sur la CPT (Théorie des perspectives cumulées) du j^{me} attribut de l'évènement de crise $Sim_2(f_j^{TC}, f_j^{HC_i})$ peut être calculée en utilisant l'équation 4.6.
Ensuite, la similarité à base de la CPT des attributs d'évènement de crise $Sim^{CPT}(TC, HC_i)$ est calculée en utilisant l'équation 4.7. Les résultats de calcul de la similarité à base de la CPT sont présentés dans le tableau 5.5.
- **Étape 6** : supposons que les valeurs de θ et δ , qui représentent respectivement les poids relatifs à la similarité syntaxique et à la similarité à base de la CPT de l'évènement de crise, sont égales à 0.5 ($\theta = \delta = 0.5$). La similarité d'évènement de crise peut ainsi être calculée en utilisant l'équation 4.8. Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau 5.6.
En outre, le preneur de décisions d'urgence définit le seuil $\varepsilon = 0.3$. Par conséquent, un ensemble de cas potentiellement similaires est enfin obtenu $\phi = \{HC_1, HC_4\}$.
- **Étape 7** : notons que les impacts de crise impliqués dans l'ensemble des cas potentiellement similaires extraits ϕ et le cas cible TC sont : $I_1 = \text{Dead}$, $I_2 = \text{Injured}$, $I_3 = \text{Missing}$, $I_4 = \text{Flooded_Property}$, $I_5 = \text{Flooded_Road}$, $I_6 = \text{Flooded_House}$, $I_7 = \text{Flooded_Dam}$, $I_8 = \text{Flooded_Facility}$, $I_9 = \text{Communications_Lines_Down}$, $I_{10} = \text{Power_Outage}$ et $I_{11} = \text{Water_Shortage}$.
En outre, les ensembles d'impacts de crise de HC_1 , HC_4 et TC sont respectivement $CI_{HC_1} = \{I_1, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{11}\}$, $CI_{HC_4} = \{I_1, I_4, I_5, I_6, I_8, I_9, I_{10}\}$ et $CI_{TC} = \{I_1, I_2, I_4, I_5, I_6, I_9, I_{10}, I_{11}\}$.
Maintenant, la similarité sémantique locale $Sim_3(I_k^{TC}, I_l^{HC_i})$ entre les impacts de crise peut être calculée à l'aide de l'équation 4.9. Par la suite, nous donnons le vecteur de poids des attributs d'impacts de crise relatif au cas cible TC , $W^{CI} = (0.8, 0.5, 0.4, 0.6, 0.7, 0.3, 0.3, 0.5)$. La similarité globale des impacts de crise peut être ainsi calculée à l'aide de l'équation 4.10. Les résultats de calcul de la similarité sémantique locale et globale des impacts de crise sont présentés dans le tableau 5.7.
- **Étape 8** : en supposant que les poids relatifs à la similarité des événements de crise et à la similarité des impacts de crise sont respectivement $\gamma = 0.4$ et $\sigma = 0.6$, la similarité entre

Cas	Attributs d'évènement de crise					Similarité syntaxique d'évènement de crise	
	$Sim_1(f_1^{TC}, f_1^{HC_i})$	$Sim_1(f_2^{TC}, f_2^{HC_i})$	$Sim_1(f_3^{TC}, f_3^{HC_i})$	$Sim_1(f_4^{TC}, f_4^{HC_i})$	$Sim_1(f_5^{TC}, f_5^{HC_i})$	$Sim^{SYN}(TC, HC_i)$	
HC ₁	0	1	0.3678	0.3678	1	0.6154	
HC ₂	0	0	0.3678	0.7192	0	0.2181	
HC ₃	0	0	0.3678	0.5334	0	0.1903	
HC ₄	0	0	0.3678	0.9773	1	0.5568	
HC ₅	0	0	0.3678	0.5417	1	0.4915	

TABLE 5.3 – Résultats de calcul des similarités syntaxiques locales et globales des évènements de crise

Valeur de f_3	Nombre Triangulaire Flou
M	(0, 0.25, 0.5)
H	(0.25, 0.5, 0.75)
VH	(0.5, 0.75, 1)

TABLE 5.4 – Variables linguistiques floues de l’attribut f_3 et les nombres triangulaires flous correspondants

le cas cible TC et les cas historiques HC_1 et HC_4 peut être enfin déterminée à l’aide de l’équation 4.11 : $Sim(TC, HC_1) = 0,7019$ et $Sim(TC, HC_4) = 0,6434$.

En outre, le preneur de décisions d’urgence définit le seuil $\varphi = 0.7$. Par conséquent, le cas historique le plus similaire est enfin récupéré $\psi = \{HC_1\}$. Ce cas historique récupéré sera ensuite réutilisé et adapté afin d’obtenir un plan de réponse d’urgence approprié.

Adaptation

Dans cette phase, le plan de réponse à la crise du cas le plus similaire HC_1 est récupéré pour être réutilisé et adapté à l’aide des experts afin de combler les besoins de la situation de crise actuelle. La figure 5.6 montre le modèle ontologique instancié de la solution récupérée du cas le plus similaire HC_1 . Selon cette figure, le plan global de la réponse à la crise contient trois plans de réponse d’urgence relatives respectivement à la protection des victimes, à la sécurité des citoyens et de leurs biens et aux opérations de secours et de sauvetage. Chacun de ces plans contient des tâches de réponse. Nous comptons au total huit tâches de réponse effectués par les répondants aux crises en utilisant diverses ressources :

- ERP_1_1_TASK_1 : la préfecture diffuse l’alerte d’évacuation en utilisant les avertisseurs sonores et les SMS.
- ERP_1_1_TASK_2 : le service départemental d’incendie et de secours organise les opérations d’évacuation à l’aide des hélicoptères, des appareils de localisation, des zodiacs et des camions.
- ERP_1_1_TASK_3 : la préfecture met à l’abri les victimes d’inondation à l’aide des refuges préétablis et des tentes.
- ERP_1_1_TASK_4 : la préfecture fournit de la nourriture et de l’eau aux victimes.
- ERP_1_2_TASK_1 : la police et la gendarmerie maintiennent l’ordre public en utilisant des bâtons et des armes à feu.
- ERP_1_2_TASK_2 : la police et la gendarmerie protègent les infrastructures et les bâtiments stratégiques à l’aide des armes à feu et des bâtons.
- ERP_1_3_TASK_1 : le service départemental d’incendie et de secours identifie les victimes d’inondation en utilisant des hélicoptères et des zodiacs.

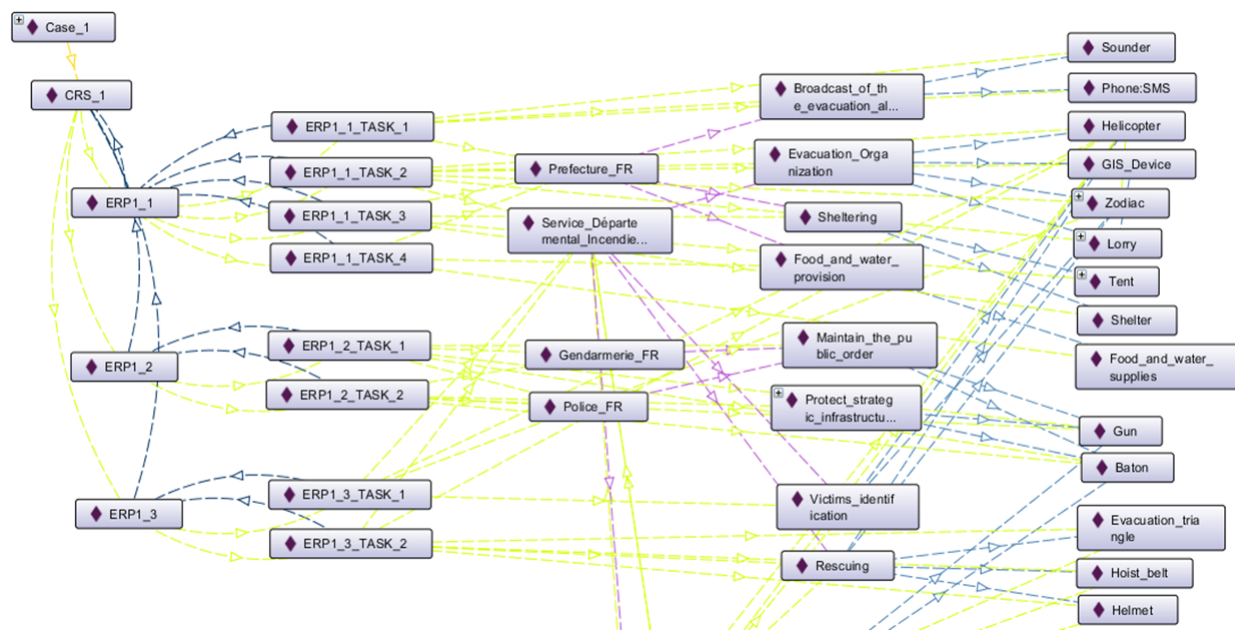
Cas	Attributs d'évènement de crise					Similarité à base de la CPT d'évènement de crise				
	$Sim_2(f_1^{TC}, f_1^{HC_i})$	$Sim_2(f_2^{TC}, f_2^{HC_i})$	$Sim_2(f_3^{TC}, f_3^{HC_i})$	$Sim_2(f_4^{TC}, f_4^{HC_i})$	$Sim_2(f_5^{TC}, f_5^{HC_i})$	$Sim^{CPT}(TC, HC_i)$				
HC ₁	0	1	-0.8964	-0.8964	1	0.0466				
HC ₂	0	0	-0.8964	0.7457	0	-0.1570				
HC ₃	0	0	-0.8964	-1.2620	0	-0.4582				
HC ₄	0	0	-0.8964	0.9797	1	0.1780				
HC ₅	0	0	-0.8964	-1.2800	1	-0.1609				

TABLE 5.5 – Résultats de calcul des similarités locales et globales des évènements de crise en utilisant la mesure de similarité à base de la théorie des perspectives cumulées

Cas	$Sim_{CE}(TC, HC_i)$
HC ₁	0.3310
HC ₂	0.0305
HC ₃	-0.1339
HC ₄	0.3674
HC ₅	0.1653

TABLE 5.6 – Résultats de calcul des similarités globales d'évènements de crise

- ERP_1_3_TASK_2 : le service départemental d'incendie et de secours sauve les victimes d'inondation à l'aide des hélicoptères, des triangles d'évacuation, des ceintures de levage et des casques.

FIGURE 5.6 – Le modèle ontologique instancié de la solution récupérée du cas le plus similaire HC₁

Par la suite et selon le processus d'adaptation décrit dans notre approche, le preneur de décisions d'urgence et les experts décident d'ajouter la tâche de traitement des blessés qui sera effectuée par le « SAMU », vu le nombre important des blessés (Modification 1), ainsi que la tâche d'aide au pompage des logements inondés qui sera exécutée par les pompiers (Modification 2). En outre,

Cas	Impacts de crise du cas cible										Similarité d'impacts de crise	
	I_1	I_2	I_4	I_5	I_6	I_9	I_{10}	I_{11}	$Sim_{CI}(TC, HC_i)$			
HC ₁	0.8000	0.2924	0.4000	0.6000	0.7000	0.3000	0.3000	0.5000	0.9493			
HC ₄	0.8000	0.2924	0.4000	0.6000	0.7000	0.3000	0.3000	0.0000	0.8274			

TABLE 5.7 – Résultats de calcul des similarités sémantiques locales et globales des impacts de crise

ils ajoutent les équipements de plongée comme ressource additionnelle pour effectuer la tâche de recherche et d'identification des victimes d'inondation (Modification 3). Par conséquent, le nouveau plan de réponse adapté au cas cible *TC* est le suivant :

- ERP_1_1_TASK_1 : la préfecture diffuse l'alerte d'évacuation en utilisant les avertisseurs sonores et les SMS.
- ERP_1_1_TASK_2 : le service départemental d'incendie et de secours organise les opérations d'évacuation à l'aide des hélicoptères, des appareils de localisation, des zodiacs et des camions.
- ERP_1_1_TASK_3 : la préfecture met à l'abri les victimes d'inondation à l'aide des refuges pré-établis et des tentes.
- ERP_1_1_TASK_4 : la préfecture fournit de la nourriture et de l'eau aux victimes.
- ERP_1_2_TASK_1 : la police et la gendarmerie maintiennent l'ordre public en utilisant des bâtons et des armes à feu.
- ERP_1_2_TASK_2 : la police et la gendarmerie protègent les infrastructures et les bâtiments stratégiques à l'aide des armes à feu et des bâtons.
- ERP_1_3_TASK_1 : le service départemental d'incendie et de secours identifie les victimes d'inondation en utilisant des hélicoptères, des zodiacs et des équipements de plongée.
- ERP_1_3_TASK_2 : le service départemental d'incendie et de secours sauve les victimes d'inondation à l'aide des hélicoptères, des triangles d'évacuation, des ceintures de levage et des casques.
- ERP_1_3_TASK_3 : le service départemental d'incendie et de secours aide les citoyens au pompage de leurs logements inondés en utilisant des unités mobiles de pompage et des pompes.
- ERP_1_4_TASK_1 : le SAMU traite les blessés à l'aide des fournitures de premier secours et des médicaments.

Le modèle ontologique instancié du plan de réponse adapté à la crise courante est illustré dans la figure 5.7. Nous avons encadré la première modification par la couleur rouge, la deuxième modification par la couleur bleu clair et la troisième modification par la couleur jaune. Notons que nous avons allégé la figure par la suppression de la relation sémantique « Has_Part » afin d'avoir une meilleure lisibilité.

Révision et apprentissage

Après avoir testé la nouvelle solution générée par notre approche d'aide à la décision sur le monde réel, le preneur de décisions d'urgence confirme sa pertinence à la situation de crise courante et décide de la sauvegarder d'une façon permanente dans la base des cas, afin qu'elle puisse être utilisée dans la résolution de prochaines situations de crise. La partie résultat du cas cible résolu inclut les deux points suivants :

- Difficultés : accumulation des dysfonctionnements électriques et de communication pendant les interventions de réponse ; refus de certaines populations concernées de quitter leurs

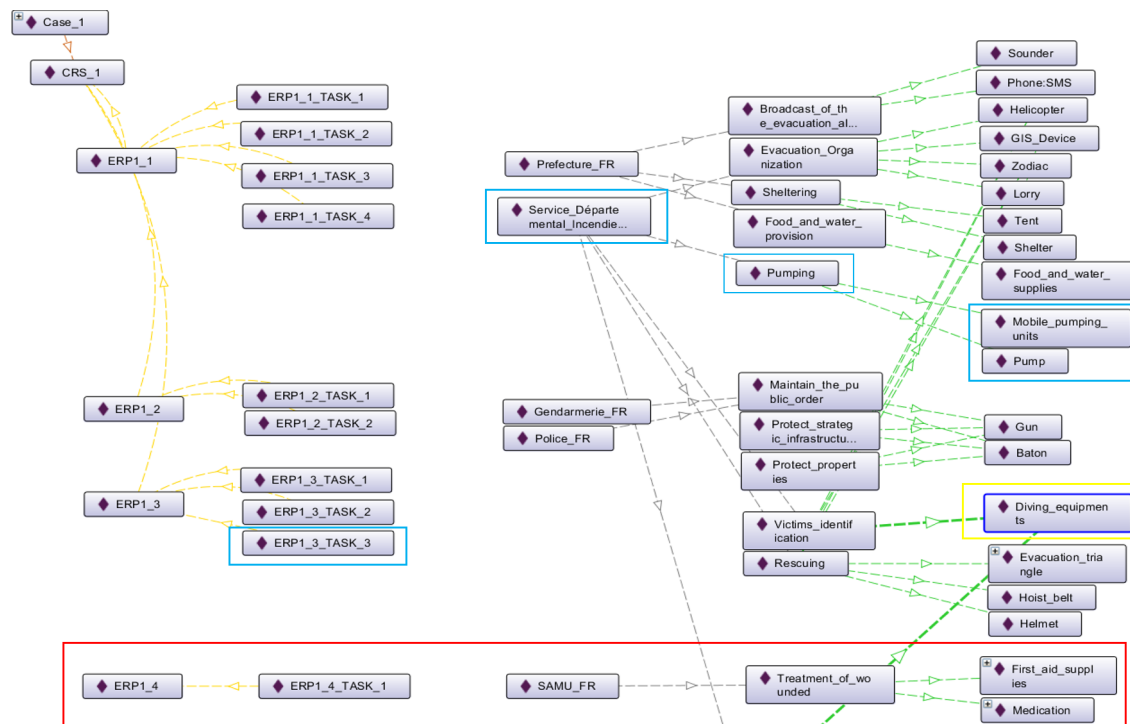


FIGURE 5.7 – Le modèle ontologique instancié de la solution adaptée

domiciles lors de l'évacuation ; multiplication des interventions d'urgence à cause de la non efficacité des évacuations préventives.

- Points forts : pas de difficulté majeure dans l'évacuation ; efficacité des mesures de maintien de l'ordre ; coordination entre les forces de l'ordre et les sapeurs pompiers dans l'évacuation.

5.3 Évaluation de l'approche proposée

Dans cette section, nous proposons d'évaluer notre approche d'aide à la décision afin d'illustrer sa validité et son efficacité. Plus précisément, nous proposons d'évaluer la méthode adoptée pour la recherche des cas similaires, étant donné que cette dernière constitue le cœur de notre approche à base de RàPC. Pour ce faire, et puisque la phase de recherche de cas similaires repose essentiellement sur la mesure de similarité entre le cas cible et les cas historiques, nous allons conduire dans cette partie du chapitre une étude comparative entre notre méthode adoptée pour la mesure de similarité de cas et une certaine mesure de similarité existante dans la littérature. Notons que nous nous sommes inspirés des travaux de (Zhang *et al.*, 2022) pour effectuer cette analyse comparative. En outre, nous allons interpréter les résultats d'intégration de la théorie des perspectives cumulées dans notre méthode de recherche de cas similaires.

5.3.1 Analyse comparative avec une méthode existante de recherche de cas similaires

L'évaluation de la similarité entre le cas cible et les cas historiques constitue l'étape la plus essentielle du module de recherche de cas similaires. De ce fait, et afin de vérifier la validité de notre méthode de recherche de cas similaires, il est primordial d'établir une comparaison entre notre méthode d'évaluation de la similarité de cas et une méthode issue de la littérature. Nous avons choisi la méthode récente d'évaluation de la similarité de (Fan *et al.*, 2014), étant donné qu'elle prend en compte plusieurs types ou formats de données : numériques, textuelles, intervalles, variables linguistiques flous et aléatoires.

Nous avons gardé la même étude de cas, présenté dans la section 5.2, pour effectuer la comparaison des méthodes de recherche de cas similaires. Par conséquent, nous avons utilisé le même cas cible, les mêmes cas historiques stockés dans la base de cas et les mêmes poids des attributs de cas pour calculer la similarité des cas. Les résultats de calcul de la similarité entre le cas cible et les cas historiques selon notre méthode et la méthode de (Fan *et al.*, 2014) sont respectivement présentés dans les tableaux 5.8 et 5.9.

Cas	$Sim_{CE}(TC, HC_i)$	$Sim_{CI}(TC, HC_i)$	$Sim(TC, HC_i)$	Rang
HC ₁	0.3310	0.9493	0.7019	1
HC ₂	0.0305	0.8780	0.5390	4
HC ₃	-0.1339	0.8274	0.4428	5
HC ₄	0.3674	0.8274	0.6434	2
HC ₅	0.1653	0.8048	0.5490	3

TABLE 5.8 – Similarités des cas historiques et leurs rangs correspondants selon notre méthode de recherche de cas similaires

Les deux tableaux contiennent les informations suivantes : les similarités d'évènement de crise ($Sim_{CE}(TC, HC_i)$), les similarités d'impacts de crise ($Sim_{CI}(TC, HC_i)$), la similarité globale entre le cas cible et un cas historique ($Sim(TC, HC_i)$) et le rang correspondant de chaque cas historique après le calcul de la similarité globale. D'après les tableaux 5.8 et 5.9, nous constatons que les valeurs de similarités obtenues à partir de notre méthode proposée sont proches de celles obtenues de la méthode de (Fan *et al.*, 2014). La figure 5.8 présente une illustration graphique des valeurs de similarité produites par notre méthode et par celle de (Fan *et al.*, 2014). En outre, le classement des cas historiques obtenu à partir de la méthode proposée est proche de celui obtenu de l'autre méthode avec une légère différence au niveau du classement des cas historiques HC₄ et HC₅ : dans le tableau 5.8, HC₄ est le deuxième cas le plus similaire tandis que dans le tableau 5.9, HC₅ est le deuxième cas le plus similaire.

Cas	$Sim_{CE}(TC, HC_i)$	$Sim_{CI}(TC, HC_i)$	$Sim(TC, HC_i)$	Rang
HC ₁	0.6154	0.8780	0.7729	1
HC ₂	0.2181	0.8780	0.6140	4
HC ₃	0.1903	0.7560	0.5297	5
HC ₄	0.5568	0.7560	0.6763	3
HC ₅	0.4915	0.8048	0.6794	2

TABLE 5.9 – Similarités des cas historiques et leurs rangs correspondants selon la méthode de (Fan *et al.*, 2014)

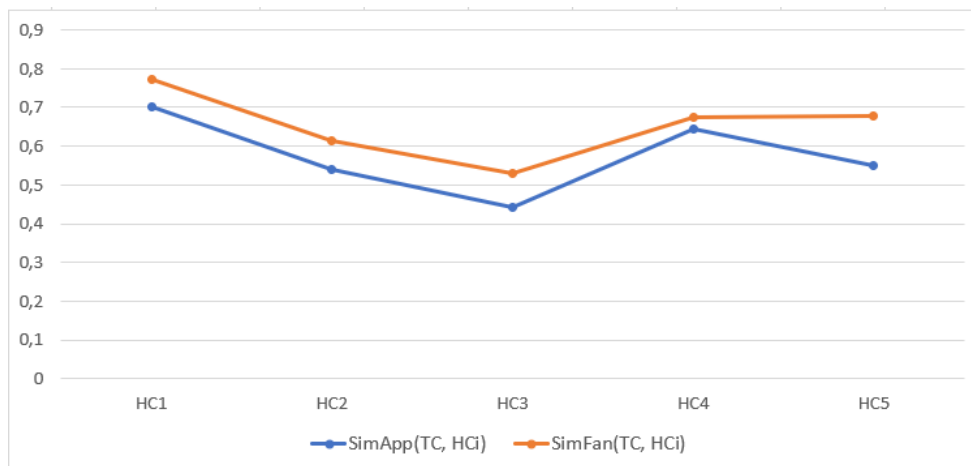


FIGURE 5.8 – Illustration graphique des similarités obtenues par notre méthode et par la méthode de (Fan *et al.*, 2014)

Plus loin, nous avons réalisé une analyse statistique des valeurs de la similarité obtenues par notre méthode et par la méthode de (Fan *et al.*, 2014) à travers le calcul de l'**Erreur Quadratique Moyenne** (en anglais, Root Mean Square Error (RMSE)) (Hyndman et Koehler, 2006). Cette métrique, exprimée par l'équation 5.1, est fréquemment utilisée pour calculer les différences entre les valeurs prédites par un estimateur et les valeurs observées. Plus spécifiquement, elle mesure la moyenne des carrés d'erreur (différence quadratique moyenne) entre les valeurs estimées et les vraies valeurs, permettant ainsi de caractériser la précision d'un estimateur. Dans notre cas, les valeurs de la similarité obtenues par notre méthode représentent les valeurs prédites (\hat{y}_i) et les valeurs de similarité obtenu par la méthode de (Fan *et al.*, 2014) représentent les valeurs observés (y_i).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (5.1)$$

avec :

- \widehat{y}_i et y_i sont respectivement les valeurs prédites et les valeurs observées.
- $(\widehat{y}_i - y_i)^2$ est la différence au carré entre une valeur estimée et une valeur observée
- n est la taille de l'échantillon

Le résultat de calcul de l'erreur quadratique moyenne a donné la valeur **0.0849**. C'est une valeur très faible qui montre la haute précision de notre méthode de recherche de cas similaires. A la lumière des résultats de cette analyse comparative, la **validité** de notre méthode de recherche de cas similaires est vérifiée.

5.3.2 Interprétation des résultats d'intégration de la CPT dans la méthode de recherche de cas similaires

Le but de ce paragraphe est d'évaluer l'efficacité de notre approche proposée d'aide à la décision. Plus spécifiquement, nous évaluons ici notre méthode de recherche de cas similaires de point de vue étude de l'impact d'intégration de la théorie des perspectives cumulées au sein du processus de mesure de la similarité entre le cas cible et les cas historiques. Cette étude est basée sur les résultats produits par l'étude de cas présentée dans la section 5.2. Plus précisément, nous allons comparer les résultats de calcul de la similarité obtenus avant et après l'intégration de la CPT. Notons ici que nous allons comparer les valeurs de similarité d'évènement de crise et non pas pas les valeurs de similarité globales car l'effet d'incorporation de la CPT dans la mesure de similarité est plus visible au niveau de calcul de la similarité d'évènement de crise. Les tableaux 5.10 et 5.11 présentent, respectivement, les similarités d'évènement de crise sans et avec intégration de la CPT.

Cas	$Sim_{CE}(TC, HC_i)$	Rang
HC ₁	0.6154	1
HC ₂	0.2181	4
HC ₃	0.1903	5
HC ₄	0.5568	2
HC ₅	0.4915	3

TABLE 5.10 – Similarités d'évènement de crise des cas historiques et leurs rangs correspondants sans intégration de la CPT

Cas	$Sim_{CE}(TC, HC_i)$	Rang
HC ₁	0.3310	2
HC ₂	0.0305	4
HC ₃	-0.1339	5
HC ₄	0.3674	1
HC ₅	0.1653	3

TABLE 5.11 – Similarités d’évènement de crise des cas historiques et leurs rangs correspondants avec intégration de la CPT

En plus des similarités d’évènement de crise entre le cas cible et les cas historiques ($Sim_{CE}(TC, HC_i)$), ces deux tableaux contiennent le rang de chaque cas historique selon la valeur de la similarité calculée. Le classement de chaque cas historique nous aide à identifier l’effet de toute modification apportée sur le calcul de la similarité. Avant l’intégration de la CPT, le tableau 5.10 montre que le cas historique HC_1 est le plus similaire et est suivi du cas historique HC_4 en deuxième position. Cependant, après l’intégration de la CPT, le tableau 5.11 montre un changement de l’ordre des cas historiques. En effet, le cas historique HC_4 devient le cas le plus similaire et est suivi du cas historique HC_1 en deuxième position. Ceci prouve que la prise en compte de l’état psychologique du preneur de décision d’urgence lors du calcul de la similarité des cas de crise peut changer les résultats de calcul et aboutir à des résultats **plus raisonnables** et **plus fiables**. Par conséquent, l’**efficacité** de notre méthode de recherche de cas similaires est maintenant vérifiée.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté l’expérimentation et l’évaluation de notre approche d’aide à la décision basée sur l’ontologie et le RàPC.

Nous avons scindé la phase d’expérimentation en deux parties. La première partie a été consacrée à la description de la construction de la base de cas. En particulier, nous avons expliqué le processus d’acquisition des cas sources de réponse à une crise d’inondation ainsi que leur instantiation dans notre ontologie de base de cas. Dans la deuxième partie de la phase d’expérimentation, nous avons présenté une étude de cas réel de réponse à une crise d’inondation afin de vérifier l’applicabilité de notre approche proposée. Plus spécifiquement, nous avons focalisé sur le module de raisonnement à partir de cas de notre approche d’aide à la décision.

La phase d’évaluation est divisée en deux parties. Dans la première partie, nous avons conduit une étude comparative entre notre méthode de recherche de cas similaires et une autre méthode

de recherche issue de la littérature. Grâce à cette analyse comparative, nous avons pu vérifier la validité de notre méthode de recherche de cas similaires. Dans la deuxième partie de la phase d'évaluation, nous avons mené une interprétation des résultats d'intégration de la théorie des perspectives cumulées dans la phase de recherche des cas similaires. Plus précisément, nous avons étudié l'impact de son incorporation dans l'évaluation de la similarité entre le cas cible et les cas historiques. Cette analyse nous a permis de vérifier l'efficacité de notre approche proposée.

Conclusions et perspectives

L'objectif principal de cette thèse est d'offrir une aide à la décision aux preneurs de décisions d'urgence dans la réponse à une crise. Cette aide à la décision a été concrétisée par la création d'une approche à base du raisonnement à partir de cas (RàPC) et d'ontologie. Nous avons choisi le RàPC comme méthodologie de raisonnement afin d'exploiter les retours des expériences antérieures de réponse aux crises. Nous avons sélectionné les ontologies dans le but de capitaliser ces connaissances (expériences acquises) et offrir certains avantages pour le cycle de raisonnement. Le but spécifique de notre approche proposée est de fournir une aide à la décision dans l'établissement d'un plan de réponse d'urgence pour la réponse à une crise.

Le développement de notre approche d'aide à la décision a commencé par une étude exhaustive des concepts de base de notre contexte d'application ainsi qu'une étude bibliographique pour pouvoir aboutir à nos choix méthodologiques. Ces études constituent l'objet du **premier chapitre**. Nous avons tout d'abord exploré les notions de crise, gestion de crise et réponse à une crise dans un ordre décroissant du général au plus spécifique. Ensuite, nous avons examiné les approches existantes ayant pour but la capitalisation des connaissances de réponse à une crise. Cet examen a abouti à l'utilisation des ontologies étant donné leurs nombreux avantages dans notre domaine d'application, à savoir sa capacité de résoudre le problème d'hétérogénéité du vocabulaire utilisé par les répondants aux crises. Par la suite, nous avons étudié les méthodologies et les techniques utilisés pour la génération d'un plan de réponse d'urgence à une crise. Cette étude a abouti à la sélection de la méthodologie du RàPC vu qu'elle présente de multiples avantages, à savoir l'importance d'exploitation du retour d'expérience dans domaine de gestion de crise.

Ayant sélectionné les méthodologies sur lesquelles notre approche est bâtie, nous avons conduit dans le **deuxième chapitre** une étude bibliographique exhaustive sur les ontologies. Cette étude a touché, en premier lieu, les ontologies en tant qu'un formalisme de représentation des connaissances et, en deuxième lieu, les ontologies existantes dans la littérature ayant représenté les situations de crise. Cette analyse bibliographique a débouché sur une synthèse complète des travaux réalisés afin de pouvoir identifier leurs lacunes et les combler par la suite lors du développement de notre modèle ontologique.

Dans le **troisième chapitre**, nous avons établi un état de l'art sur le RàPC. Plus spécifiquement, nous avons, tout d'abord, présenté les principaux concepts de base qui tournent autour de cette méthodologie de raisonnement (composantes, cycle de raisonnement, mesures de similarité, etc.). Par la suite, nous avons établi une étude de la littérature des approches à base de RàPC existantes ayant pour but la réponse à une crise. Cette étude bibliographique a été conclue par une analyse synthétique des travaux connexes ainsi qu'un recensement de leurs limites.

Dans le **quatrième chapitre**, nous avons présenté notre approche d'aide à la décision à base de RàPC et d'ontologie. En particulier, nous avons, tout d'abord, présenté l'architecture globale de l'approche proposée qui illustre ses trois étapes : collecte collaborative des données situationnelles de crise, élaboration du problème cible et raisonnement. Par la suite, nous avons exposé notre modèle ontologique permettant de représenter les connaissances liées aux situations de réponse à une crise. Enfin, nous avons décrit comment un cas de réponse à une crise est représenté et nous avons détaillé chacun des phases du cycle de raisonnement à partir de cas.

Au sein du **cinquième chapitre**, nous avons présenté notre approche d'expérimentation et d'évaluation. Concernant l'étape d'expérimentation, nous avons tout d'abord décrit le processus

de construction de la base de cas. Ensuite, nous avons mené une étude de cas réel de crise d'inondation afin d'étudier la faisabilité et l'applicabilité de notre approche proposée d'aide à la décision. Concernant l'étape d'évaluation, nous avons conduit, en premier lieu, une étude comparative entre notre méthode de recherche de cas similaires et une autre issue de la littérature afin de vérifier la validité de l'approche proposée. Dans le but de vérifier l'efficacité de notre approche, nous avons mené, en deuxième lieu, une interprétation des résultats d'intégration de la théorie des perspectives cumulées (CPT) (Tversky et Kahneman, 1992) au sein de l'évaluation de la similarité de cas.

Contributions

Les principales contributions de cette thèse peuvent être résumées en quatre points :

- Proposition d'un modèle ontologique pour la représentation des connaissances liées aux situations de réponse à une crise. Notre ontologie proposée, appelée *CROnto*, permet de fournir un vocabulaire commun, unifié, lisible par une machine et capable de surmonter les problèmes d'interopérabilité et de partage d'informations entre les parties prenantes impliquées dans la réponse à une crise, constituant ainsi une base de connaissances unifiée et partageable. L'ontologie *CROnto* couvre les principaux aspects du domaine de réponse à une crise : caractéristiques d'une crise, impacts d'une crise et stratégies de réponse à une crise. Nous avons construit notre modèle ontologique suite à une étude bibliographique exhaustive des ontologies qui existent dans la littérature et qui représentent des situations de crise. De ce fait, nous avons essayé, via notre ontologie proposée, de représenter exhaustivement tous les concepts clés du domaine de réponse à une crise : caractéristiques des désastres, dommages et pertes, répondants, actions, ressources, etc.
- Exploitation de l'ontologie proposée dans toutes les phases du cycle du RàPC. En effet, nous avons utilisé l'ontologie *CROnto* conjointement avec la méthodologie de raisonnement RàPC, étant donné que les ontologies sont très utiles dans la conception des systèmes à base de RàPC de type *knowledge-intensive* (Recio-Garfa et Díaz-Agudo, 2007). Ce couplage a été concrétisé dans la représentation des cas de réponse à une crise (utilisation du vocabulaire pour définir la structure d'un cas), le stockage et l'indexation des cas historiques, la définition du vocabulaire de la requête (cas cible), l'évaluation de la similarité et l'adaptation d'un cas récupéré.
- Proposition d'une méthode de recherche de cas similaires à deux étapes. Le but principal de cette méthode est de réduire le laps de temps nécessaire à la recherche des cas similaires. En effet, la première étape consiste à récupérer un ensemble de cas historiques potentiellement similaires suite à une correspondance des caractéristiques des événements de crise. Ceci nous permet de restreindre le nombre de cas susceptibles d'être similaires. Cette correspondance se base principalement sur une mesure de similarité syntaxique. La deuxième étape consiste à récupérer les cas historiques les plus similaires à partir de l'ensemble des cas potentiellement similaires récupérés dans la première étape, et ce en se basant sur une correspondance des impacts de crise. Cette correspondance utilise une mesure de similarité sémantique. Nous avons choisi d'utiliser ce type de mesure de similarité pour la correspondance des impacts de crise car ces derniers sont catégorisés dans notre ontologie proposée, donnant ainsi plus de sémantique aux natures des dommages et des pertes engendrés par

une crise. De ce fait, l'utilisation des mesures de similarité sémantique dans ce contexte semble plus pertinente.

- Prise en compte du comportement psychologique du preneur de décisions d'urgence dans notre approche d'aide à la décision pour la réponse à une crise. En effet, les gestionnaires de crise sont souvent envahis par le stress, la pression du temps et l'incertitude dans leur travail. Sous telles circonstances, les preneurs de décisions d'urgence sont souvent dotés d'une rationalité limitée, une aversion au risque et une dépendance envers un point de référence (Wang *et al.*, 2017). Ceci pourrait affecter leurs décisions cruciales. Dans cette présente étude, nous avons proposé d'intégrer la théorie des perspectives cumulées, qui est un modèle descriptif de prise de décision dans des conditions de risque, dans notre approche d'aide à la décision à base de RàPC, et plus précisément, dans la phase de recherche de cas similaires. L'évaluation de notre approche d'aide à la décision a montré que l'incorporation de la CPT au sein du processus d'évaluation de la similarité de cas a pu améliorer la précision et l'efficacité de l'étape de recherche de cas similaires.

Perspectives

Afin que notre travail puisse être exploité dans un milieu industriel (c'est à dire utilisé par cellule de crise réelle), il faut tout d'abord apporter des améliorations au niveau de la quantité et la qualité des connaissances utilisées par notre système et au niveau du module de raisonnement. Ces améliorations, envisagées dans le futur, peuvent être considérées comme des perspectives de notre projet de thèse. Ces perspectives peuvent être résumées en cinq points :

- Enrichir l'ontologie proposée *CROnto* par d'autres concepts de catégories de dommages et de perte engendrés par une crise. Ceci permet d'améliorer la précision de calcul de la similarité sémantique dans l'étape de correspondance des impacts de crise.
- Enrichir la base de cas par d'autres cas de réponse à une crise et améliorer leurs qualités. Rappelons que le RàPC est un paradigme de résolution de problèmes qui utilise les connaissances et les expériences acquises depuis des situations problématiques antérieures et les réutilise afin de résoudre une nouvelle situation similaire. Par conséquent, plus le nombre d'expériences acquises est grand, plus la qualité de recherche et de récupération de cas similaires est améliorée. Plus loin, plusieurs systèmes à base de RàPC ont été créés pour effectuer des tâches de classification (Althoff, 1995). La taille de la base d'apprentissage constitue ainsi un atout pour un tel système d'apprentissage automatique.
- Proposer une méthode qui permet d'affecter les poids des attributs de cas d'une manière plus objective. En effet, l'évaluation de la similarité locale entre les attributs d'un cas cible et des cas historiques dépend fortement des poids affectés pour chaque caractéristique. De ce fait, une attribution objective et loin d'être biaisée des poids des caractéristiques des cas est nécessaire pour assurer des résultats plus fiables de recherche de cas similaires.
- Intégration de la logique floue dans l'interprétation des résultats de recherche de cas similaires. Supposons que l'utilisateur expert du système à base de RàPC considère la valeur 0.8000 comme étant le seuil minimal de similarité des cas historiques. Dans ce cas, si un cas source est doté d'une similarité égale 0.7999, il ne sera pas récupéré. Ainsi, l'introduction de la logique floue dans l'interprétation des résultats de recherche de cas similaires

semble une solution efficace pour résoudre ce type de problème. Plus spécifiquement, les valeurs de la similarité des cas historiques peuvent être transformées en variables linguistiques floues, comme par exemple « très similaires », « similaires » et « peu similaires ».

- Proposition d'une méthode semi-automatique d'adaptation de cas similaire. Au lieu de réaliser manuellement le processus d'adaptation, le système à base de RàPC et d'ontologie assiste le preneur de décision d'urgence (l'utilisateur expert) dans le choix des éléments de réponse : par exemple les ressources, les répondeurs et les actions. La génération de ces recommandation peut être effectuée à l'aide des règles SWRL (Semantic Web Rule Language) (Horrocks *et al.*, 2004). Cependant, elle ne pourra être réalisée que si les règles d'adaptation sont déjà prédéfinies dans l'ontologie *CROnto*. Notons qu'une acquisition correcte de ces règles ne pourra être effectuée qu'avec une aide étroite des experts du domaine de réponse à une crise.

Bibliographie

- AAMODT, A. (1991). *A knowledge-intensive, integrated approach to problem-solving and sustained learning*. Thèse de doctorat, Universitetet i Trondheim (Norway).
- AAMODT, A. (2004). Knowledge-intensive case-based reasoning in creek. *In European Conference on Case-Based Reasoning*, pages 1–15. Springer.
- AAMODT, A. et PLAZA, E. (1994). Case-Based Reasoning : Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*, 7(1):39–59.
- AIMÉ, X. (2011). *Gradients de prototypicalité, mesures de similarité et de proximité sémantique : une contribution à l'Ingénierie des Ontologies*. Theses, Université de Nantes.
- AL-DAHASH, H., THAYAPARAN, M. et KULATUNGA, U. (2016). Understanding the terminologies : Disaster, crisis and emergency. *In Proceedings of the 32nd Annual ARCOM Conference, ARCOM 2016*, pages 1191–1200. London South Bank University.
- ALEXANDER, D. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Oxford University Press.
- ALTHOFF, K.-D. (1995). Case-based reasoning for decision support and diagnostic problem solving : The inreca approach. *In Proceedings of the 3rd German Workshop on CBR*.
- ALTHOFF, K.-D. (2001). Case-based reasoning. *In Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering : Volume I : Fundamentals*, pages 549–587. World Scientific.
- AMAILEF, K. et LU, J. (2013). Ontology-supported case-based reasoning approach for intelligent m-Government emergency response services. *Decision Support Systems*, 55(1):79–97.
- ANTHONY, R. N. (1965). *Planning and Control Systems : A Framework for Analysis*. Planning and Control Systems : A Framework for Analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- ARPIREZ, J., GÓMEZ-PÉREZ, A., LOZANO, A. et PINTO, H. S. (1998). 2agent : An ontology-based www broker to select ontologies. *In Workshop on Applications of Ontologies and PSMs, Brighton, England*.
- ATANASSOV, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1):87–96.
- AUSLANDER, B., APKER, T. et AHA, D. W. (2014). Case-Based Parameter Selection for Plans : Coordinating Autonomous Vehicle Teams. *In LAMONTAGNE, L. et PLAZA, E., éditeurs : Case-Based Reasoning Research and Development*, pages 32–47, Cham. Springer International Publishing.

- AVESANI, P., PERINI, A. et RICCI, F. (2000). Interactive Case-Based Planning for Forest Fire Management. *Applied Intelligence*, 13(1):41–57.
- AYPHASSORHO, H., PIPIEN, G., Guion de MERITENS, I. et LACROIX, D. (2019). Retour d'expérience des inondations du 14 au 17 octobre 2018 dans l'aude. *Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD)*.
- BAADER, F., CALVANESE, D., MCGUINNESS, D., PATEL-SCHNEIDER, P., NARDI, D. et al. (2003). *The description logic handbook : Theory, implementation and applications*. Cambridge university press.
- BABITSKI, G., PROBST, F., HOFFMANN, J. et OBERLE, D. (2009). Ontology Design for Information Integration in Disaster Management. *GI Jahrestagung*, 154:3120–3134.
- BARROS, R., KISLANSKY, P., SALVADOR, L., ALMEIDA, R., BREYER, M. et PEDRAZA, L. G. (2015). EDXL-RESCUER ontology : Conceptual Model for Semantic Integration. *In ISCRAM*.
- BÉNABEN, F., HANACHI, C., LAURAS, M., COUGET, P. et CHAPURLAT, V. (2008). A metamodel and its ontology to guide crisis characterization and its collaborative management. *In Proceedings of the 5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM), Washington, DC, USA, May*, pages 4–7.
- BERGMANN, R., ALTHOFF, K.-D., BREEN, S., GÖKER, M., MANAGO, M., TRAPHÖNER, R. et WESS, S. (2003). *Developing industrial case-based reasoning applications : The INRECA methodology*. Springer Science & Business Media.
- BERGMANN, R., KOLODNER, J. et PLAZA, E. (2005). Representation in case-based reasoning. *The Knowledge Engineering Review*, 20(3):209–213.
- BERGMANN, R., RICHTER, M. M., SCHMITT, S., STAHL, A. et VOLLRATH, I. (2001). Utility-oriented matching : A new research direction for case-based reasoning. *In Proceedings of the Ninth German Workshop on Case-Based Reasoning*.
- BERNARAS, A. (1996). Building and reusing ontologies for electrical network applications. *Proc. of ECAI 96, 1996*, pages 298–302.
- BERNERS-LEE, T., HENDLER, J. et LASSILA, O. (2001). The semantic web. *Scientific American*, 284(5):34–43.
- BICHINDARITZ, I. (1994). *Apprentissage de concepts dans une mémoire dynamique : raisonnement à partir de cas adaptable à la tâche cognitive*. Thèse de doctorat, Paris 5.
- BITENCOURT, K., DURÃO, F. A., MENDONÇA, M. et SANTANA, L. L. B. D. S. (2018). An ontological model for fire emergency situations. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 101(1):108–115.
- BLANCHARD, B. W. (2008). Guide to emergency management and related terms, definitions, concepts, acronyms, organizations, programs, guidance, executive orders & legislation : A tutorial on emergency management, broadly defined, past and present. *In United States. Federal Emergency Management Agency*. United States. Federal Emergency Management Agency.
- BOIN, A. (2004). Lessons from Crisis Research. *International Studies Review*, 6(1):165–174.
- BOIN, A., STERN, E., SUNDELIUS, B. et al. (2005). *The politics of crisis management : Public leadership under pressure*. Cambridge University Press.

- BOIN, A. et T HART, P. (2007). The Crisis Approach. *In Handbook of Disaster Research*, pages 42–54. Springer New York, New York, NY.
- BORGIO, S., GUARINO, N. et MASOLO, C. (1996). Stratified ontologies : the case of physical objects. *In Proceedings of ECAI-96 Workshop on Ontological Engineering*, pages 5–15. ECAI.
- BORST, W. (1997). *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse*. Thèse de doctorat, University of Twente, Netherlands.
- BRAY, T., PAOLI, J., SPERBERG-McQUEEN, C. M., MALER, E. et YERGEAU, F. (1997). Extensible markup language (xml). *World Wide Web Journal*, 2(4):27–66.
- BREITMAN, K., CASANOVA, M. A. et TRUSZKOWSKI, W. (2007). *Semantic web : concepts, technologies and applications*. Springer Science & Business Media.
- BRESLOW, L. et AHA, D. (1998). Nacodae : Navy conversational decision aids environment. Rapport technique, Citeseer.
- BRICKLEY, D. et GUHA, R. (2004). Rdf vocabulary description language 1.0 : Rdf schema. *W3C Recommendation*.
- CANGIALOSI, J. P., LATTO, A. S. et BERG, R. (2018). National Hurricane Center Tropical Cyclone Report : Hurricane Irma. *National Hurricane Center*.
- CARTER, W. N. (2008). *Disaster management : A disaster manager's handbook*. Asian Development Bank.
- CASELLAS, N. (2011). *Legal ontology engineering : Methodologies, modelling trends, and the ontology of professional judicial knowledge*, volume 3. Springer Science & Business Media.
- CHAN ALBERT P. C., CHAN DANIEL W. M. et YEUNG JOHN F. Y. (2009). Overview of the Application of “Fuzzy Techniques” in Construction Management Research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(11):1241–1252.
- CHANDRASEKARAN, B., JOSEPHSON, J. R. et BENJAMINS, V. R. (1999). What are ontologies, and why do we need them ? *IEEE Intelligent Systems and their applications*, 14(1):20–26.
- CHANG, C.-G., CUI, J.-J., WANG, D.-W. et HU, K.-Y. (2004). Research on case adaptation techniques in case-based reasoning. *In Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04EX826)*, volume 4, pages 2128–2133. IEEE.
- CHEN, N., LIU, W., BAI, R. et CHEN, A. (2017). Application of computational intelligence technologies in emergency management : a literature review. *Artificial Intelligence Review*, pages 1–38.
- CORCHO, O., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. et GÓMEZ-PÉREZ, A. (2006). Ontological engineering : principles, methods, tools and languages. *In Ontologies for software engineering and software technology*, pages 1–48. Springer.
- CORCHO, O., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. et GÓMEZ-PÉREZ, A. (2003). Methodologies, tools and languages for building ontologies. where is their meeting point ? *Data & knowledge engineering*, 46(1): 41 – 64.
- COURTNEY, J. F. (2001). Decision making and knowledge management in inquiring organizations : toward a new decision-making paradigm for DSS. *Decision Support Systems*, 31(1):17 – 38. Knowledge Management Support of Decision Making.
- COVER, T. et HART, P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE transactions on information theory*, 13(1):21–27.

- DAVIES, H. et MEGAN, W. (1998). Do all crises have to become disasters ? Risk and risk mitigation. *Property Management*, 16(1):5–9.
- DÍAZ-AGUDO, B. et GONZÁLEZ-CALERO, P. A. (2000). An Architecture for Knowledge Intensive CBR Systems. In BLANZIERI, E. et PORTINALE, L., éditeurs : *Advances in Case-Based Reasoning*, pages 37–48, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- DE MAIO, C., FENZA, G., GAETA, M., LOIA, V. et ORCIUOLI, F. (2011). A knowledge-based framework for emergency DSS. *Knowledge-Based Systems*, 24(8):1372–1379.
- DEAN, M., SCHREIBER, A., BECHOFER, S., VAN HARMELEN, F., HENDLER, J., HORROCKS, I., MACGUINNESS, D., PATEL-SCHNEIDER, P. et STEIN, L. (2004). *OWL Web Ontology Language Reference*. World Wide Web Consortium. Dean04a.
- DES COMPTES, C. (2012). Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (xynthia) et dans le var. *Rapport public thématique. Cours des Comptes*.
- DEVLIN, E. (2006). *Crisis management planning and execution*. CRC Press.
- DING, L., FININ, T., JOSHI, A., PAN, R., COST, R. S., PENG, Y., REDDIVARI, P., DOSHI, V. et SACHS, J. (2004). Swoogle : a search and metadata engine for the semantic web. In *Proceedings of the thirteenth ACM international conference on Information and knowledge management*, pages 652–659.
- DINIZ, V. B., BORGES, M. R. S., GOMES, J. O. et CANOS, J. H. (2005). Knowledge management support for collaborative emergency response. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2005.*, volume 2, pages 1188–1193 Vol. 2.
- DUTTON, J. E. (1986). The processing of crisis and non-crisis strategic issues. *Journal of Management Studies*, 23(5):501–517.
- EL GHOSH, M. (2018). *Automation of legal reasoning and decision based on ontologies*. Theses, Normandie Université.
- EL-SAPPAGH, S., ELMOGY, M. et RIAD, A. (2015). A fuzzy-ontology-oriented case-based reasoning framework for semantic diabetes diagnosis. *Artificial Intelligence in Medicine*, 65(3):179–208.
- ELMHADHBI, L., KARRAY, M. H. et ARCHIMÈDE, B. (2019). A modular ontology for semantically enhanced interoperability in operational disaster response. In *16th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management-ISCRAM 2019*, pages 1021–1029.
- ERIKSSON, K. (2009). Knowledge transfer between preparedness and emergency response : a case study. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*.
- FAN, Z.-P., LI, Y.-H., WANG, X. et LIU, Y. (2014). Hybrid similarity measure for case retrieval in CBR and its application to emergency response towards gas explosion. *Expert Systems with Applications*, 41(5):2526–2534.
- FAN, Z.-P., LI, Y.-H. et ZHANG, Y. (2015). Generating project risk response strategies based on cbr : A case study. *Expert Systems with Applications*, 42(6):2870–2883.
- FARQUHAR, A., FIKES, R. et RICE, J. (1997). The ontolingua server : A tool for collaborative ontology construction. *International journal of human-computer studies*, 46(6):707–727.

- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2020). Emergency Management in the United States. https://training.fema.gov/emiweb/downloads/is111_unit%204.pdf, dernier accès en 01/09/2020.
- FENSEL, D. (2001). Ontologies. In *Ontologies : A Silver Bullet for Knowledge Management and Electronic Commerce*, pages 11–18. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- FENSEL, D., HORROCKS, I., VAN HARMELLEN, F., DECKER, S., ERDMANN, M. et KLEIN, M. (2000). Oil in a nutshell. In *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, pages 1–16. Springer.
- FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. (1999). Overview of methodologies for building ontologies. In *IJCAI99 workshop on ontologies and problem-solving methods : Lessons learned and future trends*, volume 430.
- FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M., GÓMEZ-PÉREZ, A. et JURISTO, N. (1997). Methontology : From ontological art towards ontological engineering. In *Proceedings of the Ontological Engineering AAAI-97 Spring Symposium Series*. American Association for Artificial Intelligence. Ontology Engineering Group? OEG.
- FERTIER, A., MONTARNAL, A., BARTHE-DELANOË, A.-M., TRUPTIL, S. et BÉNABEN, F. (2020). Real-time data exploitation supported by model-and event-driven architecture to enhance situation awareness, application to crisis management. *Enterprise Information Systems*, 14(6):769–796.
- FOGLI, D., GREPPI, C. et GUIDA, G. (2017). Design patterns for emergency management : An exercise in reflective practice. *Information & Management*, 54(7):971–986.
- FOGLI, D. et GUIDA, G. (2013). Knowledge-centered design of decision support systems for emergency management. *Decision Support Systems*, 55(1):336–347.
- GAN, M., DOU, X. et JIANG, R. (2013). From ontology to semantic similarity : calculation of ontology-based semantic similarity. *The Scientific World Journal*, 2013.
- GENESERETH, M. R., FIKES, R. E. *et al.* (1992). Knowledge interchange format-version 3.0 : Reference manual. Rapport technique, Computer Science Department, Stanford University San Francisco, CA.
- GENESERETH, M. R. et NILSSON, N. J. (1987). *Logical foundations of artificial intelligence*. Morgan Kaufmann.
- GENNARI, J. H., MUSEN, M. A., FERGERSON, R. W., GROSSO, W. E., CRUBÉZY, M., ERIKSSON, H., NOY, N. F. et TU, S. W. (2003). The evolution of protégé : an environment for knowledge-based systems development. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(1):89 – 123.
- GENTNER, D. (1983). Structure-mapping : A theoretical framework for analogy. *Cognitive science*, 7(2):155–170.
- GÓMEZ-PÉREZ, A. (1996). Towards a framework to verify knowledge sharing technology. *Expert Systems with applications*, 11(4):519–529.
- GÓMEZ-PÉREZ, A. (1998). Knowledge sharing and reuse. *Handbook of applied expert systems*, 10:1–36.
- GÓMEZ-PÉREZ, A. (1999). Ontological engineering : A state of the art. *Expert Update : Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence*, 2(3):33–43. Ontology Engineering Group? OEG.

- GOMEZ-PEREZ, A., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. et CORCHO, O. (2004). *Ontological Engineering : with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web*. Springer-Verlag London.
- GRAU, B. C., HORROCKS, I., MOTIK, B., PARSIA, B., PATEL-SCHNEIDER, P. et SATTLER, U. (2008). Owl 2 : The next step for owl. *Journal of Web Semantics*, 6(4):309 – 322. Semantic Web Challenge 2006/2007.
- GRUBER, T. R. (1992). Ontolingua : A mechanism to support portable ontologies. Rapport technique, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University.
- GRUBER, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2):199–220.
- GRUBER, T. R. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(5):907–928.
- GRÜNINGER, M. et FOX, M. (1995). Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. In *IJCAI'95, Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, April 13, 1995*.
- GUARINO, N. (1997). Understanding, building and using ontologies. *International Journal of Human-Computer Studies*, 46(2-3):293–310.
- GUARINO, N. (1998). *Formal Ontology in Information Systems : Proceedings of the 1st International Conference June 6-8, 1998, Trento, Italy*. IOS Press, NLD, 1st édition.
- GUHA-SAPIR, D., BELOW, R. et HOYOIS, P. (2015). EM-DAT : The CRED International disaster database. *Catholic University of Louvain : Brussels, Belgium*, 27(2015):57–58.
- HAASE, P., LEWEN, H., STUDER, R., TRAN, D. T., ERDMANN, M., D'AQUIN, M. et MOTTA, E. (2008). The neon ontology engineering toolkit. WWW.
- HADDOW, G. D., BULLOCK, J. A. et COPPOLA, D. P. (2017). *Introduction to emergency management*. Butterworth-Heinemann.
- HAGHIGHI, P. D., BURSTEIN, F., ZASLAVSKY, A. et ARBON, P. (2013). Development and evaluation of ontology for intelligent decision support in medical emergency management for mass gatherings. *Decision Support Systems*, 54(2):1192–1204.
- HERMANN, C. F. *et al.* (1972). Some issues in the study of international crisis. *International crises : Insights from behavioral research*, pages 3–17.
- HERNU, H., KBAIER, R. et PELLETIER, f. (2010). L'évaluation des dommages causés par la tempête xynthia des 27 et 28 février 2010 à prendre en compte au titre du fonds de solidarité de l'union européenne. *Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités Territoriales*.
- HEWITT, K. (1983). Interpretations of calamity from the viewpoint of human ecology.
- HOLSAPPLE, C. W. et JOSHI, K. D. (2002). A collaborative approach to ontology design. *Communications of the ACM*, 45(2):42–47.
- HOOD, C. et JACKSON, M. (1992). The new public management : a recipe for disaster? *Hazard management and emergency planning : Perspectives on Britain*, pages 109–125.
- HORROCKS, I. *et al.* (2002). Daml+oil : A description logic for the semantic web. *IEEE Data Eng. Bull.*, 25(1):4–9.

- HORROCKS, I., PATEL-SCHNEIDER, P. F., BOLEY, H., TABET, S., GROSOFF, B., DEAN, M. *et al.* (2004). Swrl : A semantic web rule language combining owl and ruleml. *W3C Member submission*, 21(79):1–31.
- HYNDMAN, R. J. et KOEHLER, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4):679–688.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES (2020). Types of disasters : Definition of hazard. <https://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/definition-of-hazard/>, dernier accès en 27/08/2020.
- JIANG, Y., ZHANG, X., TANG, Y. et NIE, R. (2015). Feature-based approaches to semantic similarity assessment of concepts using wikipedia. *Information Processing & Management*, 51(3): 215–234.
- JIANG, Y.-P., FAN, Z.-P. et MA, J. (2008). A method for group decision making with multi-granularity linguistic assessment information. *Information Sciences*, 178(4):1098–1109.
- JOUVE, C. (1992). *Représentation des connaissances pour les problèmes de conception. Application à un système à base de connaissances pour la conception de réseaux informatiques : NEST*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne.
- KAHNEMAN, D. et TVERSKY, A. (1979). Prospect Theory : An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 47(2):263–291.
- KAMENSKY, J. M. et BURLIN, T. J. (2004). *Collaboration : Using networks and partnerships*. Rowman & Littlefield Publishers.
- KAPUCU, N. et GARAYEV, V. (2011). Collaborative decision-making in emergency and disaster management. *International Journal of Public Administration*, 34(6):366–375.
- KARP, P. D., CHAUDHRI, V. K. et THOMERE, J. (1999). Xol : An xml-based ontology exchange language.
- KEKE, Z., NIANXUE, L. et YINGBING, L. (2020). Stga-cbr : A case-based reasoning method based on spatiotemporal trajectory similarity assessment. *IEEE Access*, 8:22378–22385.
- KIFER, M., LAUSEN, G. et WU, J. (1995). Logical foundations of object-oriented and frame-based languages. *Journal of the ACM (JACM)*, 42(4):741–843.
- KOLODNER, J. L. (1992). An introduction to case-based reasoning. *Artificial Intelligence Review*, 6(1):3–34.
- KOLODNER, J. L. (1993). *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufmann.
- KONAK, A., COIT, D. W. et SMITH, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms : A tutorial. *Reliability engineering & system safety*, 91(9):992–1007.
- KONTOPOULOS, E., MITZIAS, P., MOSSGRABER, J., HERTWECK, P., SCHAAF, H. v. d., HILBRING, D., LOMBARDO, F., NORBIATO, D., FERRI, M., KARAKOSTAS, A., VROCHIDIS, S. et KOMPATSIARIS, I. (2018). Ontology-based Representation of Crisis Management Procedures for Climate Events. *In ISCRAM 2018 Conference Proceedings – 15th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, pages 1064–1073, Rochester, NY (USA) : Rochester Institute of Technology. Kees Boersma ; Brian Tomaszewski.

- KOSKO, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International journal of man-machine studies*, 24(1):65–75.
- KOZAKI, K., KITAMURA, Y., IKEDA, M. et MIZOGUCHI, R. (2002). Hozo : An environment for building/using ontologies based on a fundamental consideration of “role” and “relationship”. In GÓMEZ-PÉREZ, A. et BENJAMINS, V. R., éditeurs : *Knowledge Engineering and Knowledge Management : Ontologies and the Semantic Web*, pages 213–218, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- KRIPPENDORFF, K. (2018). *Content analysis : An introduction to its methodology*. Sage publications.
- KUO, Y., YANG, T. et HUANG, G.-W. (2008). The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & industrial engineering*, 55(1):80–93.
- L. A. ZADEH (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4):83–93.
- LAGADEC, P. et GUILHOU, X. (2002). Les conditions de survenue des crises graves. *Conditions et mécanismes de production des défaillances, accidents et crises*, pages 157–210.
- LAMONTAGNE, L. et LAPALME, G. (2002). Raisonnement à base de cas textuels : Etat de l’art et perspectives. *Revue d’intelligence artificielle*, 16(3):339–366.
- LASSILA, O. et MCGUINNESS, D. (2001). The role of frame-based representation on the semantic web. *Linköping Electronic Articles in Computer and Information Science*, 6(5):2001.
- LASSILA, O., SWICK, R. R., WIDE, W. et CONSORTIUM, W. (1998). Resource description framework (rdf) model and syntax specification.
- LE BOZEC, C., JAULENT, M.-C. et ZAPLETAL, E. (1998). Idem : Remémoration de cas pour l’aide au diagnostic en anatomie pathologique. In *IC’98 : ingénierie des connaissances (Pont à Mousson, 13-15 mai 1998)*, pages 11–22.
- LEAKE, D. B., KINLEY, A. et WILSON, D. (1996). Acquiring case adaptation knowledge : A hybrid approach. In *AAAI/IAAI, Vol. 1*.
- LENAT, D. B. et GUHA, R. V. (1989). *Building Large Knowledge-Based Systems ; Representation and Inference in the Cyc Project*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, 1st édition.
- LESOT, M.-J., RIFQI, M. et BENHADDA, H. (2009). Similarity measures for binary and numerical data : a survey. *International Journal of Knowledge Engineering and Soft Data Paradigms*, 1(1):63–84.
- LIAO, T. W., ZHANG, Z. et MOUNT, C. R. (1998). Similarity measures for retrieval in case-based reasoning systems. *Applied Artificial Intelligence*, 12(4):267–288. Publisher : Taylor & Francis.
- LIAO, Z., MAO, X., HANNAM, P. M. et ZHAO, T. (2012). Adaptation methodology of CBR for environmental emergency preparedness system based on an Improved Genetic Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39(8):7029–7040.
- LIMBU, M., WANG, D., KAUPPINEN, T. et ORTMANN, J. (2012). Management of a Crisis (MOAC) vocabulary specification.
- LIN, D. (1998). An Information-Theoretic Definition of Similarity. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning, ICML ’98*, pages 296–304, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

- LIU, S., BREWSTER, C. et SHAW, D. (2013). Ontologies for crisis management : A review of state of the art in ontology design and usability. *In ISCRAM*.
- LIU, X., LIU, Z., LIU, Y. et TIAN, J. (2021). Integration of a geo-ontology-based knowledge model and spatial analysis into emergency response for geologic hazards. *Natural Hazards*, pages 1–26.
- LIU, Z.-g., LI, X.-y. et DURRANI, D. K. (2019). Generating evacuation task plans for community typhoon emergencies : an integration of case-driven and model-driven approaches. *Operational Research*.
- LOPEZ, M. F., GOMEZ-PEREZ, A., SIERRA, J. P. et SIERRA, A. P. (1999). Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 14(1):37–46.
- LOPEZ DE MANTARAS, R., McSHERRY, D., BRIDGE, D., LEAKE, D., SMYTH, B., CRAW, S., FALTINGS, B., MAHER, M. L., COX, M. T., FORBUS, K., KEANE, M., AAMODT, A. et WATSON, I. (2005). Retrieval, reuse, revision and retention in case-based reasoning. *The Knowledge Engineering Review*, 20(3):215–240.
- LU, J. et RUAN, D. (2007). *Multi-objective group decision making : methods, software and applications with fuzzy set techniques*, volume 6. Imperial College Press.
- LUKE, S. et HEFLIN, J. (2000). Shoe 1.01. proposed specification. Rapport technique, University of Maryland.
- MACE RAMETE, G. (2015). *A Mediation Information System for reactive and anticipative crisis management : a road crisis application*. Theses, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- MACGREGOR, R. M. (1991). Inside the loom description classifier. *ACM Sigart Bulletin*, 2(3):88–92.
- MAIN, J., DILLON, T. S. et SHIU, S. C. (2001). A tutorial on case based reasoning. *In Soft computing in case based reasoning*, pages 1–28. Springer.
- MCCARTHY, J. (1980). Circumscription—a form of non-monotonic reasoning. *Artificial intelligence*, 13(1-2):27–39.
- MINSKY, M. (1974). A Framework for Representing Knowledge. Rapport technique, , USA.
- MINTZBERG, H., RAISINGHANI, D. et THEORET, A. (1976). The structure of "unstructured" decision processes. *Administrative science quarterly*, pages 246–275.
- MITROFF, I. I., PEARSON, C. M. et HARRINGTON, L. K. (1996). *The essential guide to managing corporate crises : A step-by-step handbook for surviving major catastrophes*. Oxford University Press.
- MIZOGUCHI, R. et KOZAKI, K. (2009). Ontology engineering environments. *In Handbook on Ontologies*, pages 315–336. Springer.
- MIZOGUCHI, R., SUNAGAWA, E., KOZAKI, K. et KITAMURA, Y. (2007). The model of roles within an ontology development tool : Hozo. *Applied Ontology*, 2(2):159–179.
- MIZOGUCHI, R., VANWELKENHUYSEN, J. et IKEDA, M. (1995). Task ontology for reuse of problem solving knowledge. *Towards Very Large Knowledge Bases : Knowledge Building & Knowledge Sharing*, 46(59):45.
- MORIN, E. (1976). Pour une crisologie. *Communications*, 25(1):149–163.

- MOTTA, E. (1999). *Reusable components for knowledge modelling : Case studies in parametric design problem solving*, volume 53. IOS press.
- NECHES, R., FIKES, R. E., FININ, T., GRUBER, T., PATIL, R., SENATOR, T. et SWARTOUT, W. R. (1991). Enabling technology for knowledge sharing. *AI magazine*, 12(3):36–36.
- NI, W., LIU, T. et CHEN, S. (2020). Rapid Generation of Emergency Response Plans for Unconventional Emergencies. *IEEE Access*, pages 1–1.
- NILSSON, M. et SOLLENBORN, M. (2004). Advancements and Trends in Medical Case-Based Reasoning : An Overview of Systems and System Development. *In FLAIRS Conference*, pages 178–183.
- NIU, L., LU, J. et ZHANG, G. (2009). *Cognition-Driven Decision Support for Business Intelligence*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- NOY, N. F. et MCGUINNESS, D. L. (2001). *Ontology development 101 : A guide to creating your first ontology*. Stanford knowledge systems laboratory technical report KSL-01-05 and . . .
- NOY, N. F., SINTEK, M., DECKER, S., CRUBÉZY, M., FERGERSON, R. W. et MUSEN, M. A. (2001). Creating semantic web contents with protege-2000. *IEEE intelligent systems*, 16(2):60–71.
- ORTMANN, J., LIMBU, M., WANG, D. et KAUPPINEN, T. (2011). Crowdsourcing linked open data for disaster management. *In Proceedings of the Terra Cognita Workshop on Foundations, Technologies and Applications of the Geospatial Web in conjunction with the ISWC*, pages 11–22. Citeseer.
- OTHTMAN, S. H. et BEYDOUN, G. (2013). Model-driven disaster management. *Information & Management*, 50(5):218 – 228.
- OTHTMAN, S. H., BEYDOUN, G. et SUGUMARAN, V. (2014). Development and validation of a Disaster Management Metamodel (DMM). *Information Processing & Management*, 50(2):235 – 271.
- PALEN, L., ANDERSON, K. M., MARK, G., MARTIN, J., SICKER, D., PALMER, M. et GRUNWALD, D. (2010). A vision for technology-mediated support for public participation & assistance in mass emergencies & disasters. *ACM-BCS Visions of Computer Science 2010*, pages 1–12.
- PARKER, D. (1992). The mismanagement of hazards. hazard management and emergency planning, perspective on britain.
- PÉREZ, A. G. et BENJAMINS, V. R. (1999). Overview of knowledge sharing and reuse components : Ontologies and problem-solving methods. *In Proceedings of the IJCAI-99 workshop on Ontologies and Problem-Solving methods (KRR5), Stockholm, Sweden*, pages 1–15.
- PERRIN, F., SAUZEY, P., MENORET, B. et ROCHE, P.-A. (2017). Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la seine et de la loire-retour d’expérience. *Paris : Ministère de l’Environnement de l’Énergie et de la Mer & Ministère de l’Intérieur*, page 210.
- PERRY, R. et QUARANTELLI, E. (2005). *What is a Disaster ? : New Answers to Old Questions*. Xlibris Corporation.
- PETRAKIS, E. G., VARELAS, G., HLIAOUTAKIS, A. et RAFTOPOULOU, P. (2006). X-similarity : Computing semantic similarity between concepts from different ontologies. *Journal of Digital Information Management*, 4(4).
- PSYCHÉ, V., MENDES, O. et BOURDEAU, J. (2003). Apport de l’ingénierie ontologique aux environnements de formation à distance. *STICEF (Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation)*, 10:89–126. Cet article est une version

de pré-tirage de l'article dont la version définitive se trouve à l'adresse http://sticef.univ-lemans.fr/num/vol2003/psyche-06s/sticef_2003_psyche_06s.htm. Veuillez citer la référence complète en se rapportant à l'article.

- QUARANTELLI, E. L. (1988). Disaster crisis management : A summary of research findings. *Journal of Management Studies*, 25(4):373–385.
- RADA, R., MILI, H., BICKNELL, E. et BLETNER, M. (1989). Development and application of a metric on semantic nets. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 19(1):17–30.
- RAGGETT, D., LE HORS, A., JACOBS, I. *et al.* (1999). Html 4.01 specification. *W3C recommendation*, 24.
- RAMÈTE, G. M., LAMOTHE, J., LAURAS, M. et BENABEN, F. (2012). A road crisis management metamodel for an information decision support system. In *2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST)*, pages 1–5. IEEE.
- RAPHAEL, B. (1986). *When disaster strikes : A handbook for the caring professions*. Hutchinson London.
- RECIO-GARÍA, J. A. et DÍAZ-AGUDO, B. (2007). Ontology based CBR with jCOLIBRI. In ELLIS, R., ALLEN, T. et TUSON, A., éditeurs : *Applications and Innovations in Intelligent Systems XIV*, pages 149–162. Springer London.
- RELICH, M. et PAWLEWSKI, P. (2018). A case-based reasoning approach to cost estimation of new product development. *Neurocomputing*, 272:40–45.
- RESNIK, P. (1995). Using Information Content to Evaluate Semantic Similarity in a Taxonomy. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1, IJCAI'95*, pages 448–453, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc. event-place : Montreal, Quebec, Canada.
- RICHTER, M. M. et WEBER, R. O. (2016). *Case-based reasoning*. Springer.
- RIFIQI, M. (1996). *Mesures de comparaison, typicalité et classification d'objets flous : théorie et pratique*. Thèse de doctorat, Paris 6.
- ROSENTHAL, U., BOIN, A. et COMFORT, L. K. (2001). *Managing crises : Threats, dilemmas, opportunities*. Charles C Thomas Publisher.
- ROSENTHAL, U., CHARLES, M. T. et HART, P. (1989). *Coping with crises : The management of disasters, riots, and terrorism*. Charles C Thomas Pub Limited.
- ROSENTHAL, U. et PIJENBURG, B. (1991). *Crisis management and decision making : simulation oriented scenarios*. Springer Science & Business Media.
- ROUZEAU, M., MARTIN, X. et PAUC, J. (2010). Retour d'expérience des inondations survenues dans le département du var les 15 et 16 juin 2010. *Inspection générale de l'administration, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Ministère de l'intérieur, de l'outre mer et des collectivités territoriales*, page 87.
- S. BEGUM, M. U. AHMED, P. FUNK, N. XIONG et M. FOLKE (2011). Case-Based Reasoning Systems in the Health Sciences : A Survey of Recent Trends and Developments. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(4):421–434.
- SANTOS, L. S., SICILIA, M.-A. et GARCIA-BARRIOCANAL, E. (2019). Ontology-based modeling of effect-based knowledge in disaster response. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 15(1):102–118.

- SAVINI, M. (2011). *Johannes Clauberg, Methodus cartesiana et ontologie*. Vrin.
- SCHANK, R. C. (1983). *Dynamic memory : A theory of reminding and learning in computers and people*. cambridge university press.
- SHAFER, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*, volume 42. Princeton university press.
- SHALUF, I. M. (2007a). Disaster types. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 16(5):704–717.
- SHALUF, I. M. (2007b). An overview on disasters. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 16(5):687–703.
- SHALUF, I. M. (2007c). An overview on the technological disasters. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 16(3):380–390.
- SHALUF, I. M., FAKHARU’L-RAZI, A. et AINI, M. S. (2003). A review of disaster and crisis. *Disaster Prevention and Management : An International Journal*, 12(1):24–32.
- SHAO, J., LIANG, C., LIU, Y., XU, J. et ZHAO, S. (2021). Relief demand forecasting based on intuitionistic fuzzy case-based reasoning. *Socio-Economic Planning Sciences*, 74:100932.
- SHRIVASTAVA, P., MITROFF, I. I., MILLER, D. et MICLANI, A. (1988). Understanding industrial crises. *Journal of Management Studies*, 25(4):285–303.
- SIARCE (2017). La crue de l’essonne 28 mai 2016 – 10 juin 2016 livre blanc. Rapport technique, Syndicat Intercommunal d’Aménagement, de Rivières et du Cycle de l’Eau.
- SIMON, H. A. (1960). *The new science of management decision*. Harper & Brothers.
- SLAM, N., WANG, W., XUE, G. et WANG, P. (2015). A framework with reasoning capabilities for crisis response decision–support systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 46: 346–353.
- SMITH, B. et WELTY, C. (2001). Fois introduction : Ontology—towards a new synthesis. In *Proceedings of the International Conference on Formal Ontology in Information Systems - Volume 2001*, FOIS ’01, page .3–.9, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- SMYTH, B. et CUNNINGHAM, P. (1992). Déjà vu : A hierarchical case-based reasoning system for software design. In *ECAI*, volume 92, pages 587–589. Citeseer.
- SMYTH, B. et KEANE, M. T. (1993). Retrieving adaptable cases. In *European Workshop on Case-Based Reasoning*, pages 209–220. Springer.
- SÁNCHEZ, D., BATET, M., ISERN, D. et VALLS, A. (2012). Ontology-based semantic similarity : A new feature-based approach. *Expert Systems with Applications*, 39(9):7718–7728.
- SOWA, J. F. (1984). *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA.
- STAAB, S., STUDER, R., SCHNURR, H.-P. et SURE, Y. (2001). Knowledge processes and ontologies. *IEEE Intelligent systems*, 16(1):26–34.
- STAHL, A. (2003). *Learning of knowledge-intensive similarity measures in case-based reasoning*. Thèse de doctorat, University of Kaiserslautern.
- STORN, R. et PRICE, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4):341–359.
- STUDER, R., BENJAMINS, V. R. et FENSEL, D. (1998). Knowledge engineering : principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25(1-2):161–197.

- SUÁREZ-FIGUEROA, M. C., GÓMEZ-PÉREZ, A. et FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. (2012). The neon methodology for ontology engineering. *In Ontology engineering in a networked world*, pages 9–34. Springer.
- SURE, Y., STAAB, S. et STUDER, R. (2004). On-to-knowledge methodology (otkm). *In Handbook on ontologies*, pages 117–132. Springer.
- SURE, Y., STAAB, S. et STUDER, R. (2009). Ontology engineering methodology. *In Handbook on ontologies*, pages 135–152. Springer.
- SWARTOUT, B., PATIL, R., KNIGHT, K. et RUSS, T. (1996). Toward distributed use of large-scale ontologies. *In Proc. of the Tenth Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*, pages 138–148.
- TIJERINO, Y. A. et MIZOGUCHI, R. (1993). Multis ii : enabling end-users to design problem-solving engines via two-level task ontologies. *In International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, pages 340–359. Springer.
- TURBAN, E., ARONSON, J. E. et LIANG, T.-P. (2004). *Decision Support Systems and Intelligent Systems (7th Edition)*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- TURNER, B. A. et PIDGEON, N. F. (1997). *Man-made disasters*. Butterworth-Heinemann.
- TVERSKY, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, 84(4):327–352. Place : US Publisher : American Psychological Association.
- TVERSKY, A. et KAHNEMAN, D. (1992). Advances in prospect theory : Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5(4):297–323.
- USCHOLD, M. (1996). Building ontologies : Towards a unified methodology. *In Proceedings of 16th Annual Conference of the British Computer Society Specialists Group on Expert Systems*. Citeseer.
- USCHOLD, M. et GRUNINGER, M. (1996). Ontologies : Principles, methods and applications. *The knowledge engineering review*, 11(2):93–136.
- USCHOLD, M. et KING, M. (1995). Towards a methodology for building ontologies. *In In Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, held in conjunction with IJCAI-95*.
- VAN DE WALLE, B., TUROFF, M. et HILTZ, S. R. (2009). *Information Systems for Emergency Management*. M.E.Sharpe.
- VAN HEIJST, G., SCHREIBER, A. T. et WIELINGA, B. J. (1997). Using explicit ontologies in kbs development. *International journal of human-computer studies*, 46(2-3):183–292.
- VIRKKI-HATAKKA, T. et RENIERS, G. (2009). A case-based reasoning safety decision-support tool : Nextcase/safety. *Expert Systems with Applications*, 36(7):10374–10380.
- VIVACQUA, A. S. et BORGES, M. R. (2012). Taking advantage of collective knowledge in emergency response systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(1):189–198.
- WANG, D., WAN, K. et MA, W. (2020). Emergency decision-making model of environmental emergencies based on case-based reasoning method. *Journal of environmental management*, 262:110382.
- WANG, L., WANG, Y.-M. et MARTÍNEZ, L. (2017). A group decision method based on prospect theory for emergency situations. *Information Sciences*, 418-419:119–135.

- WANG, L., ZHANG, Z.-X. et WANG, Y.-M. (2015). A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making. *Expert Systems with Applications*, 42(23):9379–9388.
- WANG, P. (2013). *Non-axiomatic logic : A model of intelligent reasoning*. World Scientific.
- WATSON, I. (1999). Case-based reasoning is a methodology not a technology. *Knowledge-Based Systems*, 12(5):303–308.
- WATSON, I. et MARIR, F. (1994). Case-based reasoning : A review. *The Knowledge Engineering Review*, 9(4):327–354.
- WILKE, W. et BERGMANN, R. (1998). Techniques and knowledge used for adaptation during case-based problem solving. In *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, pages 497–506. Springer.
- WILKE, W., VOLLRATH, I., ALTHOFF, K.-D. et BERGMANN, R. (1997). A framework for learning adaptation knowledge based on knowledge light approaches. In *Proceedings of the fifth german workshop on case-based reasoning*, pages 235–242.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2020). Natural disaster profiles. <https://www.who.int/hac/techguidance/ems/natprofiles/en/>, dernier accès en 27/08/2020.
- WU, Z. et PALMER, M. (1994). Verbs Semantics and Lexical Selection. In *Proceedings of the 32nd Annual Meeting on Association for Computational Linguistics*, ACL '94, pages 133–138, USA. Association for Computational Linguistics. event-place : Las Cruces, New Mexico.
- YANG, L., BALL, M., BHAVSAR, V. et BOLEY, H. (2005). Weighted partonomy-taxonomy trees with local similarity measures for semantic buyer-seller match-making. *Journal of Business and Technology*, 1(1):42–52.
- YU, F., FAN, B. et LI, X. (2020a). Improving emergency preparedness to cascading disasters : A case-driven risk ontology modelling. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 28(3):194–214.
- YU, F., LI, X.-Y. et HAN, X.-S. (2018). Risk response for urban water supply network using case-based reasoning during a natural disaster. *Safety Science*, 106:121–139.
- YU, J., THOM, J. A. et TAM, A. (2005). Evaluating ontology criteria for requirements in a geographic travel domain. In *OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems"*, pages 1517–1534. Springer.
- YU, X., LI, C., ZHAO, W.-X. et CHEN, H. (2020b). A novel case adaptation method based on differential evolution algorithm for disaster emergency. *Applied Soft Computing*, 92:106306.
- ZHANG, B., LI, X. et WANG, S. (2015a). A novel case adaptation method based on an improved integrated genetic algorithm for power grid wind disaster emergencies. *Expert Systems with Applications*, 42(21):7812–7824.
- ZHANG, D., ZHOU, L. et NUNAMAKER JR, J. F. (2002). A knowledge management framework for the support of decision making in humanitarian assistance/disaster relief. *Knowledge and Information Systems*, 4(3):370–385.
- ZHANG, G., LU, J. et GAO, Y. (2015b). *Multi-level decision making*. Springer.
- ZHANG, K., ZHENG, J. et WANG, Y.-M. (2022). A heterogeneous multi-attribute case retrieval method based on neutrosophic sets and todim for emergency situations. *Applied Intelligence*, pages 1–16.

- ZHANG, P., ESSAID, A., ZANNI-MERK, C., CAVALLUCCI, D. et GHABRI, S. (2018a). Experience capitalization to support decision making in inventive problem solving. *Computers in Industry*, 101:25–40.
- ZHANG, Z.-X., WANG, L. et WANG, Y.-M. (2018b). An Emergency Decision Making Method Based on Prospect Theory for Different Emergency Situations. *International Journal of Disaster Risk Science*, 9(3):407–420.
- ZHENG, J., WANG, Y.-M. et ZHANG, K. (2018). A case retrieval method combined with similarity measurement and DEA model for alternative generation. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11(1):1123–1141.