



HAL
open science

Système d'Information de Médiation pour le pilotage réactif et anticipatif de la réponse à une situation de crise : application aux perturbations sur les réseaux routiers

Guillaume Mace Ramete

► **To cite this version:**

Guillaume Mace Ramete. Système d'Information de Médiation pour le pilotage réactif et anticipatif de la réponse à une situation de crise : application aux perturbations sur les réseaux routiers. Autre [cs.OH]. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2015. Français. NNT : 2015EMAC0018 . tel-01427390

HAL Id: tel-01427390

<https://theses.hal.science/tel-01427390>

Submitted on 5 Jan 2017

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 Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

en vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université de Toulouse

*Délivré par : École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux conjointement avec
l'INSA de Toulouse*

Présentée par Guillaume MACÉ-RAMÈTE

Soutenue le 9 avril 2015

Système d'Information de Médiation pour le pilotage réactif
et anticipatif de la réponse à une situation de crise :
application aux perturbations sur les réseaux routiers

Jury

Xavier BOUCHER – Professeur – École des Mines de Saint-Etienne (*Rapporteur*)

Julie DUGDALE – Maître de conférences HDR – Université de Grenoble 2 (*Rapporteur*)

Frédéric BÉNABEN – Maître-Assistant HDR – Mines-Albi (*Co-encadrant*)

Jean-Pierre BOUREY – Professeur – Centrale Lille (*Président*)

Hélène DOLIDON – Docteur – CEREMA de l'Ouest (*Invitée*)

Matthieu LAURAS – Maître-Assistant HDR – Mines-Albi (*Co-encadrant*)

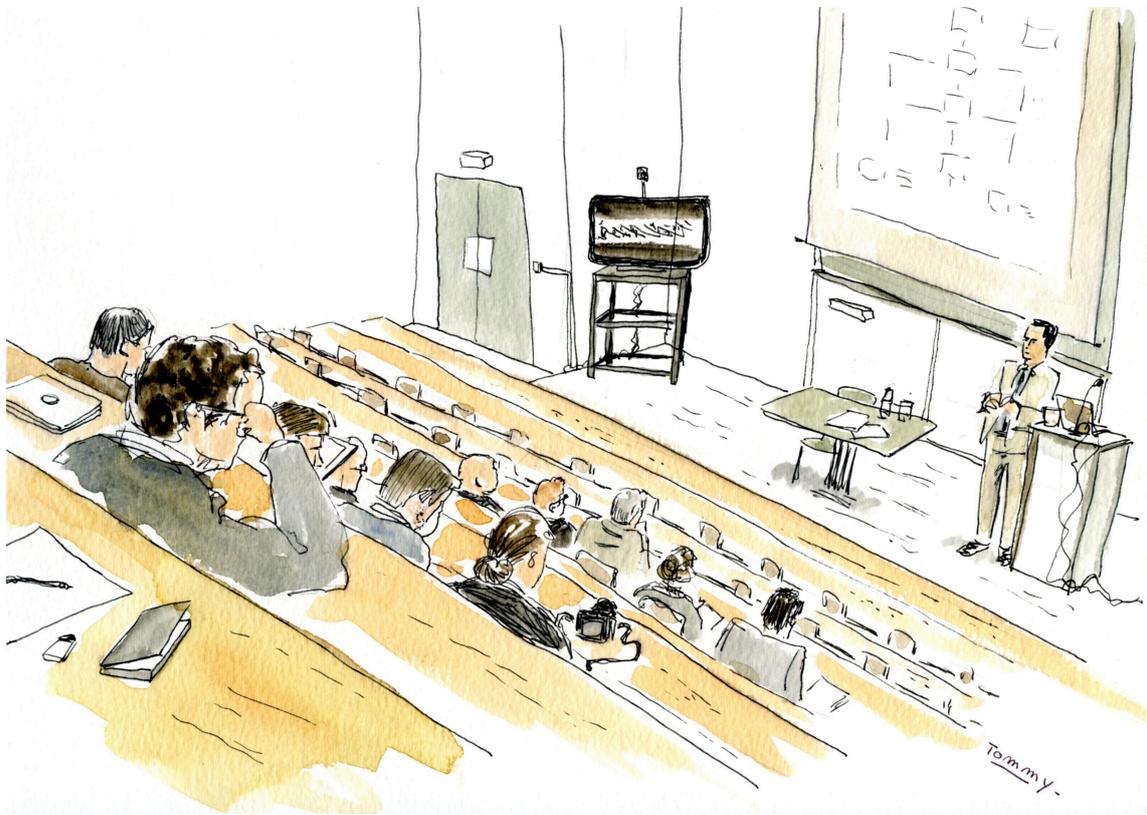
Jacques LAMOTHE – Professeur – Mines-Albi (*Directeur*)

Lionel LILAS – Ingénieur – Direction Interdépartementale des Routes de l'Ouest (*Invité*)

École doctorale et discipline ou spécialité : EDSYS : Génie Industriel 4200046

Unité de recherche : Centre Génie Industriel - École des Mines d'Albi-Carmaux

Directeur de thèse : Jacques LAMOTHE



Remerciements

« Vous avez peur de quoi ? Vous avez peur de qui ? Vous avez peur, eh bien vous allez perdre les gars, moi je vous le dis, vous allez perdre... » Ces mots empruntés à Aimé Jacquet auraient pu être prononcés tels quels par mes encadrants au cours d'une nième réunion de rédaction. Il est donc normal de remercier d'adresser mes remerciements à mes coéquipiers et autres personnes que j'ai eu l'honneur de côtoyer pendant ces trois ans.

Merci **Jacques** d'avoir été le capitaine de ces travaux. Ton aide fut précieuse tout au long de ces trois ans et plus particulièrement au moment de la poussive étape de rédaction du manuscrit. Les nombreux échanges que nous avons eus ont fortement contribué à sa construction. Avec le recul, ce fut un plaisir de t'avoir comme colocataire de bureau pendant cette période.

Merci **Matthieu** d'avoir été le meilleur buteur de cette thèse. J'ai pu découvrir le sens du mot efficacité à tes côtés. Avec ton aide, chaque situation complexe et alambiquée trouve une solution simple, efficace et souvent empreinte d'humour. J'ai été ravi de travailler avec toi et espère que nos futures collaborations seront tout aussi fructueuses.

Merci **Frédéric** d'avoir été le meneur de jeu de cette thèse. Ce fut un réel plaisir de travailler à tes côtés et de profiter de ta créativité incessante (parfois trop quand il s'agit de trouver des surnoms à tes doctorants...). Tes qualités humaines et l'esprit d'équipe que tu as pu insuffler au sein de l'axe IO ont largement concouru à mon épanouissement dans le laboratoire. Pourvu que cela dure...

Merci **Sébastien** d'avoir été le meilleur espoir de cette thèse. Au final sans en avoir officiellement le titre, tu étais le quatrième encadrant. Tes précieux conseils, ta disponibilité et ta gentillesse m'ont accompagné pendant toute la durée de la thèse et ont contribué au succès de celle-ci.

Je tiens également à remercier **Julie Dugdale** et **Xavier Boucher** d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse. J'espère pouvoir tirer profit au maximum de votre œil critique et de vos remarques constructives sur ma thèse dans mes futurs travaux.

Merci à **Jean-Pierre Bourrey** d'avoir accepté d'être président de mon jury. C'est un honneur pour moi de m'inscrire dans la lignée de thèses auxquelles tu as eu l'honneur de participer ou de rapporter dans notre laboratoire. Chacune de tes remarques permet une avancée constructive de nos réflexions.

Je remercie également **Lionel Lilas** et **Hélène Dolidon** d'avoir accepté l'invitation à être membre du jury. C'est grâce aux résultats du projet SIM-PeTra que j'ai pu rédiger ce manuscrit. Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous et j'espère que cela ouvrira la porte à de nouvelles collaborations. Par ailleurs, si, au cours de mes virées en Bretagne, je peux me vanter de savoir placer sur une carte Lamballe, Pont-Farcy et autre Loudéac c'est un peu grâce à vous !

Mes remerciements vont également à tous mes autres coéquipiers, doctorants et stagiaires du centre Génie Industriel que j'ai eu l'occasion de côtoyer tout au long de ma thèse (**Laura, Olf, Saïna, Romain, Anne-Marie, Tiexin, Xenia, Diana, Andres, Shadan, Safae, Loïc**). Merci à **Aurélien** et **Nicolas** de m'avoir proposé de faire partie de leur aventure InteropSys en 2013, et c'est pas fini.... Merci aussi à mes compagnons de chambrée, les locataires du bureau 0A01 (**Sébastien, Aurélie, Anne-Marie** et **Olina**) qui ont eu la joie de supporter mes sautes d'humeur et autres blagues de qualité variable (même si parfois je trouvais pire avec vous...) Merci également **Isabelle** pour ta sympathie et ta bonne humeur quotidienne. Sans toi, les chercheurs et doctorants du laboratoire seraient des brebis égarées devant tant de formalités administratives... D'une manière générale, merci à tout l'effectif du **Centre Génie Industriel** de l'Ecole des mines d'Albi de m'avoir accueilli de l'« autre côté » après m'avoir supporté pendant 4 ans sur les bancs de l'école.

Merci également aux autres doctorants des autres équipes de l'Ecole des mines d'Albi. Parmi eux je remercie particulièrement **Marion Ducouso** chez qui j'arrivais à trouver une oreille attentive à mes tracas et déboires quotidiens. Je souhaite également remercier **Christophe Spiesser** et **Mathieu Galtier Frisouille** qui ont su me convaincre un lendemain de remise des diplômes de me lancer dans cette aventure. Merci de m'avoir accompagné et supporté pendant deux ans dans le train numéro 870002 qui nous amenait à Albi dans la joie et la bonne humeur.

Je remercie également les promotions d'étudiants que j'ai côtoyées (2012, 2013) et à qui j'ai eu l'occasion de donner des cours (2014, 2015, 2016). Parmi eux un merci tout particulier aux « **Animaux** » de la promotion 2013 qui m'ont invité (merci **Romain Miclo**) à partager leurs vacances et à m'évader quelque temps de la rédaction de thèse... Merci également aux étudiants de l'option Génie Industriel de la promotion IFIE 2015 (**Maxime, Jesse, Mathias** et consorts...) qui m'ont suivi et accompagné tout au long de mon parcours de doctorant.

Un immense merci à mes copains colocataires Treux (**Melo, Hugh, Manu, Sly, Ken, Pilaf, Delphine**) (# BLC) avec qui j'ai vécu pendant les deux premières années de ma thèse et qui ont pu s'entendre dire (parfois abusivement) de la part de leur thésard du 31 préféré « je peux pas j'ai un papier à écrire ». En élargissant ce groupe on trouve les Chimeurs de l'extrême (**Kekette, Lysou, Llopi, Marie, De Dreux, Martine, D'gil, Bachir, Florina, Gouden, Cordially, Alex, Tonio, Clém, David, Elsa, Patxi, Dédé, Mélouche, Aurélie** et **RZwei**) mes amis, fidèles compagnons de décompression avec qui j'ai adoré passer du temps pour de franches parties de rigolade et de bonne humeur ! Merci aussi à **Tommy** d'avoir accepté de réaliser des dessins d'illustration pendant ma soutenance de thèse.

Enfin, je remercie l'ensemble de ma famille pour son soutien et ses encouragements tout au long de ma vie. Merci **Pauline**, ma formidable et rigolote petite sœurlette dont je suis très fier. Merci **Maman**, merci **Papa** pour tout, tout le soutien que vous m'avez apporté, toutes les valeurs que vous m'avez transmises, tout l'amour que vous m'avez donné, ce manuscrit est pour vous...

Guillaume Serge Maceram



Table des matières

Remerciements	v
Table des matières	xiii
Table des figures	xvii
Introduction générale	1
I Périmètre et vision d'ensemble	3
I.1 Contexte et problématique	3
I.1.1 La notion de crise	3
I.1.1.1 Considérations générales	3
I.1.1.2 Crise et risques	5
I.1.1.3 Classification des crises	5
I.1.1.4 La crise routière	6
I.1.2 La gestion de crise	7
I.1.2.1 Généralités sur la gestion de crise	7
I.1.2.2 Les phases de la gestion de crise	8
I.1.2.3 La prise de décision en situation de crise	10
I.1.2.4 Spécificités liées à la crise routière	12
I.1.2.5 Problèmes dans la gestion de crise routière	15
I.2 Le projet SIM-PeTra	17
I.2.1 Contexte et genèse du projet	17
I.2.2 Objectifs du projet SIMPeTra	18
I.2.3 Démarche générale du projet	20
I.3 Positionnement du travail de recherche	20
I.3.1 Positionnement dans l'équipe de recherche	21
I.3.1.1 Présentation du projet MISE	21
I.3.1.2 Positionnement au sein de MISE	23
I.3.2 Construction d'un cadre de travail	24
I.3.2.1 Différenciation Conception / Exécution	24
I.3.2.2 Différenciation a priori / a posteriori	24
I.3.3 Établissement d'une grille de lecture	25
I.3.3.1 Positionnement de la problématique dans le référentiel	26

I.3.3.2	Positionnement de la démarche MISE dans le cadre de travail	27
I.3.3.3	Boucles de pilotage proposées	27
I.3.3.4	Contributions	28
II	Vers une ontologie de crise routière	31
II.1	État de l’art sur les ontologies	32
II.1.1	De la nécessité d’un réceptacle de connaissance	32
II.1.1.1	Distinction entre donnée, information et connaissance	32
II.1.1.2	La représentation des connaissances	33
II.1.1.3	Vers un choix	34
II.1.2	Les ontologies	35
II.1.2.1	Définition des ontologies	35
II.1.2.2	Structuration des ontologies	36
II.1.2.3	Exploitation des ontologies	36
II.1.2.4	Les types d’ontologie	38
II.1.2.5	Les formats d’ontologies	39
II.1.2.6	Cycle de vie des ontologies	40
II.1.2.7	Vers un choix	41
II.1.3	Présentation d’ontologies de haut niveau	41
II.1.3.1	GFO	41
II.1.3.2	SUMO	42
II.1.3.3	BFO	43
II.1.3.4	Knowledge Representation Ontology ou Sowa	44
II.1.3.5	Upper Cyc Ontology	45
II.1.3.6	DOLCE	46
II.1.3.7	Vers un choix	48
II.1.4	Les ontologies de domaine orientées crise	48
II.1.4.1	SoKNOS	49
II.1.4.2	MOAC	50
II.1.4.3	SIADEx	50
II.1.4.4	ISyCri	51
II.1.4.5	WB-OS	52
II.1.4.6	HXL	53
II.1.4.7	Vers un choix	54
II.1.5	Synthèse	54
II.2	Construction d’un métamodèle collaboratif convergent (contribution collective)	55
II.2.1	Historique et genèse des travaux	55
II.2.1.1	MISE 1.0 et la genèse des travaux	55
II.2.1.2	IsyCri : Application au domaine de la crise	57
II.2.1.3	MISE 2.0 : maturation des travaux	58
II.2.1.4	Synthèse	59

II.2.2	Construction d'un métamodèle de collaboration	60
II.2.2.1	L'environnement de la collaboration	61
II.2.2.2	L'objet de la collaboration	61
II.2.2.3	Les partenaires de la collaboration	62
II.2.2.4	La dynamique de la collaboration	63
II.2.2.5	La mesure de la performance	63
II.2.3	Exploitation de l'ontologie	64
II.2.4	Application à un cas d'école	68
II.3	Vers une ontologie de crise routière	70
II.3.1	Une ontologie structurée en couches	70
II.3.1.1	Choix d'une ontologie haut niveau	70
II.3.1.2	Ajout de la couche crise	71
II.3.2	Vers une ontologie d'application dédiée crise routière	73
II.3.2.1	Métamodèle de crise routière	74
II.3.2.2	Exploitation de l'ontologie	78
II.3.2.3	Synthèse	85
II.3.3	Cas d'école	85
II.3.4	Rappel de la démarche générale	86
II.3.4.1	Identification des objectifs de la collaboration	86
II.3.4.2	Construction du réseau des partenaires	88
II.4	Conclusion	89
 III Pilotage réactif d'une situation de crise routière : implémentation et illustration		91
III.1	Grille de Lecture	92
III.2	Implémentation	94
III.2.1	La définition de la collaboration	94
III.2.1.1	Collecte des données	94
III.2.1.2	Modélisation des informations	97
III.2.1.3	La déduction basée sur l'exploitation des connaissances	100
III.2.2	La réalisation de la collaboration	101
III.2.2.1	La prise de décision basée sur les connaissances	101
III.2.2.2	La création d'un Workflow	102
III.2.2.3	L'orchestration	103
III.2.3	Le maintien de la collaboration	104
III.2.3.1	L'observation des données du terrain	104
III.2.3.2	La mise à jour des différents modèles	105
III.2.3.3	Détection	106
III.2.4	Synthèse	107
III.3	Illustration	108
III.3.1	Situation initiale	108
III.3.2	Émission d'un bulletin d'alerte météo	108
III.3.3	Dégradations des conditions de conduite	111

III.4 Limites et perspectives	114
IV Vers un pilotage anticipatif d'une situation de crise routière	117
IV.1 État de l'art autour de l'agilité	118
IV.2 État de l'art autour des scénarios	121
IV.3 État de l'art autour de la modélisation de trafic	125
IV.3.1 Différentes approches de modélisation du trafic routier	125
IV.3.2 Modélisation macroscopique du trafic routier	127
IV.3.2.1 Les variables macroscopiques de description du trafic rou- tier	127
IV.3.2.2 Obtention d'un modèle macroscopique	127
IV.3.2.3 Impacts des conditions météorologiques sur les variables de trafic	129
IV.3.3 Modèle d'affectation du trafic	130
IV.4 Proposition scientifique	133
IV.4.1 Hypothèses	133
IV.4.2 Vision d'ensemble et démarche globale	134
IV.4.3 Définition d'un scénario initial	136
IV.4.4 Affectation du trafic routier	137
IV.4.4.1 Modélisation du réseau	137
IV.4.4.2 Modélisation de la demande de trafic	139
IV.4.4.3 Modélisation du comportement des usagers	140
IV.4.4.4 Modélisation de la charge sur le réseau	141
IV.4.5 Intégration dans le modèle de crise	146
IV.4.6 Obtention du modèle projeté	147
IV.4.7 Évaluation et analyse	148
IV.4.7.1 Évaluation du scénario	148
IV.4.7.2 Analyse du modèle et élaboration d'une nouvelle stratégie	149
IV.4.8 Limites et perspectives	149
IV.5 Cas d'école	150
IV.5.1 Structure du réseau	151
IV.5.2 Construction du scénario	153
IV.5.2.1 Construction du tableau d'aléas	153
IV.5.2.2 Construction des matrices Origine-Destination	153
IV.5.3 L'affectation dynamique du trafic	154
IV.5.3.1 Impacts du scénario sur la modélisation du réseau	154
IV.5.3.2 Modèle de charge	155
IV.6 Conclusion	157
 Conclusion générale	 159
 Bibliographie	 176

A Règles de déduction	177
A.1 Règles issues de MISE 1.0	177
A.2 Règles issues de MISE 2.0	178
A.3 Règles issues de ISyCri	179
A.4 Règles sélectionnées pour la couche crise de l'ontologie de crise routière . .	182

Table des figures

I.1	Chaînage Risque Danger Conséquence d'après [Bénaben <i>et al.</i> , 2014]	5
I.2	Exemple du Chaînage Risque Danger Conséquence	5
I.3	Les interactions entre le théâtre opérationnel et la cellule de crise	8
I.4	Les différentes phases de la gestion de crise [Alexander, 2002]	9
I.5	Vue d'ensemble de l'organisation de la réponse à une situation de crise	14
I.6	Planning du projet SIM-PeTra	21
I.7	Vue d'ensemble du projet MISE [Bénaben, 2012]	22
I.8	Vision d'un système de contrôle commande [Heylighen et Joslyn, 2001]	24
I.9	L'évaluation de performance d'après [Tahon et Frein, 2000]	25
I.10	Positionnement de la problématique dans notre cadre de travail	26
I.11	Projection de la démarche MISE dans notre cadre de travail	27
I.12	Les différentes boucles de pilotage de la réponse dans notre cadre de travail	28
I.13	Positionnement des contributions de la thèse dans notre cadre de travail	29
II.1	Le passage de la donnée à la connaissance d'après [Blumentritt et Johnston, 1999]	33
II.2	Les différents types d'ontologie d'après [Guarino, 1998]	39
II.3	Structure du métamodèle de GFO	42
II.4	Structure du métamodèle de SUMO	43
II.5	Structure du métamodèle de BFO	44
II.6	Structure en diamant du métamodèle de KR Ontology [Sowa, 1999]	45
II.7	Structure du métamodèle de Cyc [Lenat <i>et al.</i> , 1990]	46
II.8	Exemple de règle dans le formalisme CycL	46
II.9	Structure du métamodèle DOLCE	47
II.10	Méta Modèle de l'ontologie SoKNOS [Babitski <i>et al.</i> , 2011]	50
II.11	Métamodèle de l'ontologie SIADEx [Fdez-Olivares <i>et al.</i> , 2006]	51
II.12	Le métamodèle ISyCri [Truptil, 2011]	52
II.13	Une partie du métamodèle de l'ontologie WB-OS [Chou <i>et al.</i> , 2011]	53
II.14	Le métamodèle de l'ontologie collaborative d'après [Rajsiri, 2009]	56
II.15	La démarche de construction d'une dynamique selon [Rajsiri, 2009]	57
II.16	Construction d'un processus collaboratif de réponse à une situation de crise selon [Truptil, 2011]	58
II.17	Le métamodèle MISE2.0 d'après [Mu, 2012]	59

II.18	Structure du métamodèle de collaboration	60
II.19	Partie environnement du métamodèle de collaboration	61
II.20	Partie objectif du métamodèle de collaboration	61
II.21	La vision d'une fonction d'après [Force, 1981]	62
II.22	Partie partenaires du métamodèle de collaboration	62
II.23	Partie processus du métamodèle de collaboration	63
II.24	Les dimensions de la performance selon [Jacot, 1990]	64
II.25	Partie performance du métamodèle de collaboration	64
II.26	Démarche d'exploitation du métamodèle convergent	65
II.27	Exemple de composants d'environnement	68
II.28	Processus collaboratif déduit	69
II.29	Structure du métamodèle de SUMO	70
II.30	Les parties système d'étude et crise de la couche crise	72
II.31	Partie système de traitement du métamodèle IsyCri	73
II.32	Système d'étude SIMPeTra	75
II.33	Modeleur de situation de crise routière	79
II.34	Le Métamodèle Core et la couche Crise Routière	85
II.35	Modèle initial de la situation de crise routière	87
II.36	Modèle de la situation après enrichissement de la base de connaissances	87
II.37	Modèle de la situation après la mise en place des objectifs	88
II.38	Processus de prise de mesure de gestion de trafic	89
III.1	Positionnement de la boucle de pilotage réactif dans le cadre de travail	91
III.2	Grille de lecture pour le pilotage en mode réactif	93
III.3	Système d'étude du Métamodèle SIM-PeTra et sources de données	98
III.4	Capture d'écran de l'interface cartographique de représentation (couche carte de vigilance météo)	99
III.5	Capture d'écran de l'interface de modélisation	100
III.6	Capture d'écran de l'interface de déduction	101
III.7	Capture d'écran de l'interface de création d'interface	103
III.8	Capture d'écran de l'interface de supervision de processus	104
III.9	L'interface d'affichage des modèles terrain et attendu	105
III.10	Capture d'écran de l'interface de résultat de comparaison	106
III.11	Les modules de l'application SIM-PeTra	107
III.12	Extrait du fichier XML vigiMeteo	108
III.13	Couche vigilance météo de l'interface cartographique après la mise à jour du 12/03/2013 à 6h	109
III.14	Interface de modélisation mise à jour à partir des informations de l'ontologie	109
III.15	Interface de déduction	110
III.16	Processus de passage en PIZO Niveau 2	110
III.17	Interface d'exécution de la tâche de choix des départements	111
III.18	Mise à jour de l'interface cartographique (couche niveaux PIZO)	111
III.19	Extrait du fichier XML des conditions de conduite	112

III.20	Affichage des conditions de conduite sur l'interface	112
III.21	Modèles terrain et attendu	113
III.22	Résultat de la comparaison entre modèles terrain et attendu	113
IV.1	Boucle de pilotage anticipatif d'une situation de crise	117
IV.2	Le processus de pilotage anticipatif	118
IV.3	La maison de l'agilité [Charles, 2010]	120
IV.4	Exemple d'arbre de décision	123
IV.5	Les différents niveaux d'échelle d'observation d'un trafic routier	126
IV.6	Les relations entre vitesse, débit et concentration	129
IV.7	Schéma de principe du processus d'affectation dynamique du trafic [Barceló, 2010]	131
IV.8	Diagramme d'influence	134
IV.9	Schéma de principe de la démarche globale	135
IV.10	La modélisation d'un réseau routier sous la forme d'un graphe	137
IV.11	Impact des différentes variables sur la modélisation du réseau	139
IV.12	Impact des différentes variables sur la modélisation du réseau	141
IV.13	Schéma de principe de l'affectation du trafic	142
IV.14	Algorigramme du module de projection	148
IV.15	Réseau considéré dans le cas d'école	150
IV.16	Graphe du réseau considéré dans le cas d'école	151
IV.17	Diagrammes fondamentaux du trafic pour les arcs considérés	152
IV.18	Impacts des éléments du scénario sur la vitesse maximale	155
IV.19	Profils de vitesse, concentration et débit pour l'axe Caen-Carentan	156
IV.20	Une partie du modèle projeté de crise obtenu	157
IV.21	Vision d'ensemble des contributions	161

Introduction générale

En décembre 2010, le nord-ouest de la France a été touché par des intempéries neigeuses remarquables. Les prévisionnistes météorologiques les ont qualifiées d'exceptionnelles. Les réseaux (transports, routes, électricité) ont alors été paralysés et les pouvoirs publics ont dû gérer une véritable situation de crise. Les conséquences d'une telle paralysie étaient d'autant plus importantes que cette crise est survenue au début des vacances de Noël, démultipliant ses effets néfastes (retards de livraison, vacanciers bloqués...). De telles intempéries se sont reproduites en mars 2013 paralysant une partie du Nord et de l'Ouest de la France.

Pour faire face à ce type de situation, les autorités mettent en œuvre des mécanismes de réponse inscrits dans des plans de gestion de crise. Ceux-ci ont pour but de détailler l'organisation et les actions des différentes parties prenantes dans la réponse à la situation de crise. La cellule de crise se positionne alors comme garante du bon déroulement de l'exécution de la réponse. Elle doit notamment assurer la bonne *collaboration* entre les partenaires impliqués dans la réponse. Celle-ci s'inscrit également dans un écosystème en constante évolution et fait intervenir des acteurs très hétérogènes pour une durée très courte. Ceci nécessite alors une flexibilité importante dans la conception du réseau responsable de la réponse et une réactivité considérable face aux évolutions. Le rôle de la cellule de crise lors du pilotage de la réponse porte alors sur les points clés suivants :

- La construction de la réponse à la situation de crise ;
- La coordination des différents intervenants ;
- Le maintien d'une réponse pertinente face aux instabilités liées à la situation de crise.

Par ailleurs, le développement croissant des Systèmes d'Information et de Communication constitue un enjeu important pour les décideurs en situation de crise. En effet, ceux-ci permettent de recueillir des données issues du théâtre opérationnel (capteurs, GPS, réseaux sociaux...) et sont censés contribuer à l'amélioration des prises de décisions et de la coordination des actions. Toutefois, si les Systèmes d'Information peuvent se révéler être de puissants alliés de la gestion de crise, ils peuvent aussi se révéler très néfastes en générant une surcharge d'informations pour le décideur.

Il apparaît alors important que la cellule de crise soit dotée d'outils informatiques suffisamment bien conçus pour l'aider dans ses décisions et ses actions. Ce système doit notamment être capable d'accompagner la cellule de crise dans la définition et le pilotage d'une réponse coordonnée.

La problématique abordée dans ces travaux de thèse propose la mise en place d'un Système d'Information de Médiation pour le pilotage réactif et anticipatif de la réponse à une situation de crise. Cette thèse a été menée au sein de l'axe Interopérabilité des Organisations du laboratoire de Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux dont l'une des thématiques de recherche propose la mise en place de Systèmes d'Information de Médiation capables de supporter la collaboration multi acteur (projet MISE : Mediation Information System Engineering). Les présents travaux s'inscrivent donc dans la continuité de ce projet transverse démarré en 2004.

Par ailleurs, les présents travaux de recherche s'appuient sur les résultats du projet de recherche français SIM-PeTra¹ Financé par le PREDIT et réalisé entre 2011 et 2013. SIM-PeTra visait à définir des éléments de méthodologie et outils capables de supporter une cellule de crise routière dans la définition et le pilotage de la coordination entre acteurs impliqués dans la réponse à une situation de crise routière.

Tout au long de ce manuscrit, nous allons donc chercher à répondre aux enjeux liés à la mise en place et au pilotage d'une situation collaborative de crise routière. Le présent document est ainsi structuré selon le plan suivant :

- Le chapitre I présente le contexte et la vision d'ensemble de ces travaux de thèse. À partir de généralités sur les crises et leur gestion, nous exposerons la problématique de ces travaux, puis nous présenterons le projet SIM-PeTra et le cadre de travail pour y positionner nos contributions.
- Le chapitre II s'attache à décrire la structuration en couches d'une ontologie dédiée à supporter la prise de décision dans un contexte de crise routière. La présentation de cette contribution se fait en deux temps avec la restitution d'un travail collectif sur la définition d'un métamodèle collaboratif convergent mené dans le cadre du projet MISE puis, la présentation de l'ontologie de crise routière.
- Le chapitre III présente l'implémentation et la mise en œuvre d'un mode de pilotage réactif pour la réponse à une situation de crise routière. Il s'agit d'étudier les mécanismes mis en jeu par la cellule de crise pour garantir la bonne exécution de la dynamique de réponse et assurer son maintien face aux évolutions constatées. Cette contribution applicative correspond aux résultats du projet SIM-PeTra.
- Le chapitre IV décrit un mécanisme de pilotage anticipatif pour la réponse à une situation de crise routière. En complément du mécanisme proposé dans le chapitre précédent, cette démarche propose de prendre en considération les évolutions potentielles de la crise lors de la prise de décision.

1. SIM-PeTra est l'acronyme de Système d'Information de Médiation pour le pilotage des crises ; application aux Perturbations dans les Transports.

Chapitre I

Périmètre et vision d'ensemble

Ce premier chapitre donne une présentation du périmètre dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse. La première section aborde les notions de crise et de gestion de crise, notamment dans le cadre des crises routières, et en soulève les problèmes attenants. La deuxième section présente le projet de recherche français SIM-PeTra au cours duquel les résultats de ces travaux ont été développés. Enfin, la troisième partie est l'objet d'une proposition de positionnement des présents travaux.

I.1 Contexte et problématique

Catastrophes naturelles, désastres, accidents majeurs, urgences, calamités, l'actualité déborde d'exemples de crises en tout genre (financière, sociale, humanitaire...). Mais quel sens peut-on donner à cette notion ? Comment s'organise la réponse à ces situations ?

I.1.1 La notion de crise

I.1.1.1 Considérations générales

Étymologiquement, le mot « crise » est issu du grec ancien $\kappa\rho\iota\sigma\iota\zeta$ qui signifie décider. Dans le latin médiéval [Du Cange *et al.*, 1845], « crisis » signifie, au sens médical, la manifestation grave d'une maladie, c'est-à-dire le moment pour le corps médical de *décider* du traitement du patient. Dans la langue chinoise [yu da zi dian" Hubei sheng bian ji bu., 1986], le sinogramme représentant le terme de crise résulte de l'association de deux symboles représentant le danger d'une part et l'opportunité d'autre part. De par son étymologie, le terme de crise renvoie donc aux notions de décision, de jugement, de choix, de danger et d'opportunité. On relèvera aussi les notions de *moment clé* et de *soudaineté* qui représentent une première caractéristique des crises.

Par la suite, le terme s'est généralisé dans les domaines de la psychologie (rupture d'équilibre), de la politique (remise en cause du pouvoir), de l'économie (rupture d'équilibre entre grandeurs économiques), de la biologie (extinction d'espèces animales) [Jeuge-Maynard, 2010]. Toutes ces utilisations du mot crise ont laissé dire à [Morin, 1976] que « la notion de crise s'est répandue au vingtième siècle à tous les horizons de la conscience

contemporaine. Il n'est pas de domaine qui ne soit hanté par la notion de crise : le capitalisme, le droit, la civilisation, l'humanité... ».

On trouve dans la littérature de nombreuses études sur le sujet, chacune essayant de donner une définition précise de la crise. Ainsi pour [Lagadec, 1991], la crise peut être vue comme « le dérèglement d'un univers de référence ». Elle est, pour [Dutton, 1986] et [Quarantelli, 1988], une situation extrêmement ambiguë pour laquelle les causes et effets ne sont pas connus. Dans [Pearson et Clair, 1998], la crise organisationnelle est définie comme « une situation peu probable, dont l'évènement majeur est à même de menacer la viabilité de l'organisation et qui est caractérisée par l'ambiguïté de ses causes, effets et moyens de réponses ainsi que par la rapidité des prises de décisions. ». Quant à [Jacques et Gatot, 1997], ils considèrent la crise comme « un phénomène complexe dynamique, qui constitue une menace pour la survie de l'organisation et/ou de ses membres, qui laisse peu de temps de réaction, et qui entraîne un ajustement du système ».

Une autre approche de [Tomasini et Van Wassenhove, 2004] suggère que la crise est une situation à forts enjeux se situant à l'intersection de deux forces :

- Une *vulnérabilité* ;
- Un *évènement déclencheur* avec une faible probabilité et un fort impact.

[Tomasini et Van Wassenhove, 2004] font apparaître ici la notion de vulnérabilité du système en crise. Le terme de vulnérabilité vient du latin *vulnerare* qui signifie blesser, endommager. Derrière cette acception étymologique, on trouve la notion de fragilité par rapport à des attaques, des menaces extérieures. Dans [for Disaster Reduction, 2004], les Nations-Unies définissent la vulnérabilité comme « l'ensemble des conditions qui augmentent la susceptibilité d'une communauté aux impacts des dangers ». En cinématique [Kervern, 1995], la vulnérabilité est identifiée par trois paramètres :

- *Un objet de risque* qui représente la ressource qui est menacée par un évènement aléatoire dommageable ;
- *Des facteurs de péril* qui sont les évènements aléatoires dommageables entraînant la privation ou la dégradation pour l'organisation de la ressource en péril ;
- *Des impacts potentiels* sur les fonctions ou objectifs de l'objet vulnérable.

Par ailleurs, la vision de [Tomasini et Van Wassenhove, 2004] laisse entendre que l'état de crise résulte avant tout de la mise en œuvre d'un évènement déclencheur sur un système en proie aux menaces. Cette approche événementielle se retrouve dans la littérature chez [Shrivastava, 1995], [Hale, 1997] pour qui le phénomène impactant doit être brutal et provoquer un état de choc pour l'organisation. Suivant cette approche, la crise et l'évènement déclencheur sont amalgamables. A contrario, on trouve dans la littérature [Turner, 1976], [Roux-Dufort, 2000] une vision processus de la crise où finalement, la crise n'est que le résultat d'une succession d'anomalies apparues pendant le fonctionnement normal de l'organisation. Cette approche confère à la crise un caractère dynamique, qui évolue dans le temps.

Ainsi, au regard de tous les éléments précédemment avancés, nous pouvons voir la crise comme la déstabilisation, à la suite d'un ou plusieurs évènements, d'un système complexe exposé à une certaine vulnérabilité.

I.1.1.2 Crise et risques

La notion de crise est également très fortement liée à la notion de risque si l'on se réfère à la définition du risque naturel donnée par [Ayrat et Griot, 2001] : le risque est le résultat de la confrontation d'un phénomène dangereux (l'*aléa*) face à des *enjeux* soumis à une certaine *vulnérabilité*. L'*aléa* est défini par sa probabilité d'occurrence et par son intensité tandis que la vulnérabilité des enjeux est une fonction de la présence humaine sur le territoire considéré. Par exemple, si l'on confronte l'occurrence de l'*aléa* « séisme » avec d'une part, l'enjeu « centrale nucléaire » et d'autre part, l'enjeu « entrepôt désaffecté » le risque résultant apparaît plus grave dans le premier cas (destruction d'une centrale nucléaire) que dans le second cas (effondrement d'un hangar vide). La mesure du risque se décline donc selon deux dimensions : la *probabilité* caractérisant la propension à l'apparition de l'*aléa* et la *gravité* caractérisant l'importance des effets liés à la concrétisation du risque.

Lorsque le risque a été concrétisé, on parle de conséquence du risque. Selon [Bénaben *et al.*, 2014], un système en crise peut donc être décrit comme un système soumis à des dérèglements importants caractérisés par l'ensemble des risques et conséquences impactant le système. La figure I.1 donne une illustration du chaînage danger/risque/-conséquence pour la description d'une situation de crise et la figure I.2 en présente un exemple.

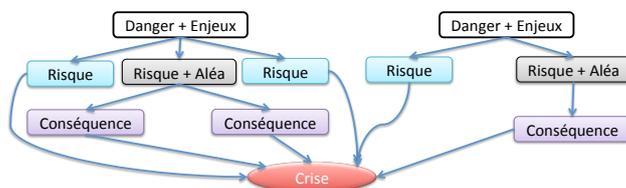


FIGURE I.1 – Chaînage Risque Danger Conséquence d'après [Bénaben *et al.*, 2014]

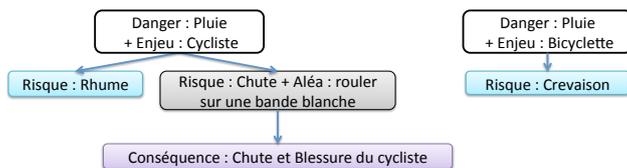


FIGURE I.2 – Exemple du Chaînage Risque Danger Conséquence

I.1.1.3 Classification des crises

Dans la littérature, on trouve plusieurs classifications des crises afin d'en obtenir une typologie. Dans ces études, les auteurs abordent les crises selon différents points de vue pour établir une nomenclature à partir de critères de tri. Ainsi [Devlin, 2006] considère une classification selon la nature de la crise : militaire, politique, économique,

sanitaire, sociale, technique ou humanitaire. On retrouve chez [Kovoor-Misra, 1995] une approche multidimensionnelle de la crise déclinée selon son appartenance aux sphères économique, sociale, légale, politique ou éthique. D'autres approches [Van Wassenhove, 2006] considèrent une classification en fonction des sources de l'évènement générateur (naturelle, humaine accidentelle, humaine intentionnelle). [Sundar et Sezhiyan, 2007] considèrent la vitesse d'apparition du phénomène constaté et font une dichotomie entre les crises soudaines (« rapid onset disaster ») et les crises installées dans le temps (« slow onset disaster »).

D'autres auteurs croisent plusieurs dimensions de la crise afin d'obtenir des matrices permettant de dégager des familles de crises. C'est le cas de [Gundel, 2005] qui propose une typologie basée sur le contrôle que l'organisation peut avoir sur le système en crise, et sur sa prédictibilité. En résulte la classification des crises suivantes :

- *Les crises conventionnelles* : ce sont les situations prédictibles pour lesquelles le degré d'influence de l'organisation sur la crise est le plus fort. Ce sont des crises anticipables et pour lesquelles des procédures de réponse ont été définies.
- *Les crises inattendues* : elles résultent d'une situation peu prévisible, mais pour lesquelles l'organisation possède un contrôle élevé sur le système. L'incendie du tunnel du Mont-Blanc en 1999 est un exemple de crise inattendue.
- *Les crises insurmontables* : ce sont des crises jouissant d'un fort caractère prédictible et face auxquelles l'organisation se trouve désœuvrée par manque de contrôle sur le système. La tempête Xynthia ayant touché les côtes vendéennes en 2010 entre dans cette catégorie.
- *Les crises fondamentales* : ce sont les crises les plus menaçantes pour les organisations de par leur faible prédictivité et du manque de connaissance concernant la réponse à y apporter. Les attentats du 11 septembre 2001 entrent dans la catégorie des crises fondamentales.

Nature de la crise [Devlin, 2006]	militaire	politique	économique	sanitaire	sociale
Source de la perturbation [Van Wassenhove, 2006]	naturelle	humaine accidentelle	humaine intentionnelle		
Vitesse d'apparition [Sundar et Sezhiyan, 2007]	Brusque	latente			
Classe de crise [Gundel, 2005]	conventionnelle	inattendue	insurmontable	fondamentale	

TABLE I.1 – Classification des crises dans la littérature

I.1.1.4 La crise routière

Une première définition que l'on peut donner à la crise routière provient du système impacté par la crise. Si l'on reprend la définition du risque comme la manifestation d'un phénomène dangereux sur un enjeu, la notion de crise routière n'a de sens que si le risque porte sur l'enjeu « réseau routier ». [Setra, 2013] définit la crise routière comme une « situation qui, suite à un évènement inattendu par son ampleur ou sa soudaineté, et

dont la durée est non maîtrisée, nécessite des moyens à mettre en œuvre dépassant l'exploitation courante et en particulier des actions partenariales ». Dans les crises routières, l'élément déclencheur peut être de type *naturel* (météorologique, sismique, incendie), *sociétal* (grands rassemblements, mouvements sociaux), *industriel* (incident sur une usine) et se caractérise par un débordement des services en charge de l'exploitation routière. Pour la suite de cette étude, nous ne nous intéresserons qu'aux cas des crises routières dues aux aléas climatiques et tout particulièrement aux intempéries hivernales (neige, verglas).

Ainsi la crise routière due aux intempéries hivernales (appelée crise routière par la suite pour un souci de lisibilité) est soumise à deux types d'aléas prédictibles : d'une part les conditions météorologiques et d'autre part le trafic routier. En effet, les prévisions météorologiques deviennent de plus en plus précises et il est possible d'estimer les conditions météorologiques sur les axes du réseau routier avec un horizon de l'ordre d'une demi-douzaine d'heures. Il est également possible, grâce à des études statistiques [Chébasier *et al.*, 2010], d'estimer avec une précision relativement bonne les flux de véhicules circulant au cours d'une journée type. La manifestation d'aléas relativement prédictibles sur le système soumis à la crise routière confère donc à cette dernière son caractère hautement prédictible. Néanmoins, celui-ci est à nuancer dans le sens où les prévisions météorologiques et de trafic sont disponibles uniquement sur un horizon de court terme.

La table I.2 propose de positionner les crises routières par rapport à la classification établie dans la section I.1.1.3.

Nature de la crise [Devlin, 2006]	militaire	<i>politique</i>	<i>économique</i>	<i>sanitaire</i>	<i>sociale</i>
Source de la perturbation [Van Wassenhove, 2006]	<i>naturelle</i>	<i>humaine accidentelle</i>	<i>humaine intentionnelle</i>		
Vitesse d'apparition [Sundar et Sezhiyan, 2007]	<i> Brusque</i>	latente			
Classe de crise [Gundel, 2005]	<i>conventionnelle</i>	inattendue	insurmontable	fondamentale	

TABLE I.2 – Positionnement des crises routières

I.1.2 La gestion de crise

I.1.2.1 Généralités sur la gestion de crise

Pour faire face à une situation de crise, une organisation doit être en mesure de mettre en œuvre des moyens qui lui permettent de trouver une issue à la situation dégradée. C'est le rôle de la gestion de crise définie par [Devlin, 2006] comme « l'ensemble des mesures prises pour résoudre des problèmes causés par la survenue des crises. ». L'organisation met alors en place une *cellule de crise* (éventuellement distribuée) constituant l'organe décisionnel en charge de définir la réponse à la situation de crise et d'en assurer une cohérence globale [Lagadec, 1995]. La réponse à une situation de crise fait ainsi intervenir de nombreux acteurs hétérogènes que la cellule de crise va devoir coordonner pour y apporter une réponse. Il est important de noter que cet effort de coordination doit être

mené tant au sein de la cellule de crise qu'au niveau du théâtre opérationnel de la crise comme le souligne la figure I.3.

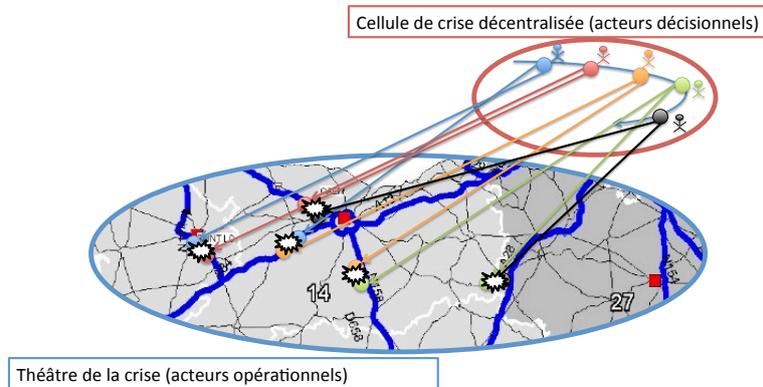


FIGURE I.3 – Les interactions entre le théâtre opérationnel et la cellule de crise

En outre, si l'on considère la cellule de crise comme une entité de management mettant en oeuvre des processus pour apporter une réponse à la situation de crise, il paraît raisonnable d'appliquer les préceptes issus de la norme ISO 9001-2008 [ISO, 2008] à la gestion de crise. Celle-ci propose que toute organisation soit structurée en trois niveaux : niveau *décisionnel*, niveau *opérationnel* et niveau *support*. La gestion de crise ainsi déclinée correspond à la mise en oeuvre d'activités décisionnelles, de réalisation et de support pour répondre à la situation. Même si cette approche est légitimement contestable (notamment à cause du caractère urgent inhérent à une situation de crise), elle est toutefois présente dans une grande partie des organisations en charge des réponses aux situations de crise et permet une structuration cohérente des actions menées.

Ainsi, à partir de l'ensemble des considérations exposées précédemment, il nous est possible de proposer la définition suivante de la gestion de crise :

« *Faire de la gestion de crise c'est assurer la collaboration d'acteurs hétérogènes assurant des tâches décisionnelles, de réalisation et de support dans le but de traiter l'ensemble des défaillances (potentielles ou avérées) impactant des composants d'un système complexe, à géométrie variable, considéré en crise.* »

I.1.2.2 Les phases de la gestion de crise

Il est commun de penser que la gestion de crise est un processus intervenant seulement lorsqu'une crise est établie. Ce serait réducteur au regard des procédures mises en place avant que la crise ne survienne et des éventuels retours d'expérience qui sont réalisés. [Alexander, 2002] a ainsi identifié les phases suivantes dans la gestion de crise :

- *La phase de prévention* (Mitigation). Elle concerne le traitement de la vulnérabilité du système par une gestion des risques a priori afin de diminuer la probabilité

d'occurrence du risque¹En considérant le risque comme une entité à deux dimensions : risque = probabilité x gravité et les conséquences qui en découlent. Prenons par exemple le cas d'un cycliste et du risque associé de chute du cycliste. La vérification du bon état de la bicyclette avant chaque sortie (bon état des freins, bonne pression des pneus...) peut être considérée comme une étape de la phase de prévention.

- *La phase de préparation* (Preparation). Il s'agit également d'une phase réalisée avant la crise. L'objectif est de prémunir l'environnement sujet à la crise de moyens pour y faire face. Dans cet objectif, des plans et des processus de gestion de crise sont définis et des formations sont prodiguées aux acteurs potentiellement impliqués dans une réponse à une situation de crise. Si l'on considère l'exemple du cycliste, le port du casque ou l'enregistrement des coordonnées téléphoniques d'un centre d'urgence dans son téléphone mobile sont des étapes de la phase de préparation.
- *La phase de réponse* (Response). C'est le moment qui suit l'apparition de la crise en tant que telle. Il s'agit dans cette étape de déployer tous les éléments définis dans la phase de préparation (ou d'en concevoir de nouveaux) puis de les mettre en œuvre afin de diminuer les effets de la crise. Dans l'exemple du cycliste, cela correspond au moment où le cycliste a chuté malgré tous les efforts de prévention. Entrent alors en considération les éléments définis dans la phase de préparation (protection du casque, appel téléphonique vers le numéro des urgences...).
- *La phase de rétablissement* (Recovery). Cette phase est celle de l'après la crise, lorsque la réponse associée est terminée et qu'une situation stabilisée est obtenue. Elle vise à ramener le système vers un état acceptable. Pour le cycliste, cela correspond au moment où celui-ci a été pris en charge par les services médicaux et quand la chaussée a été dégagée.

La figure I.4 présente les différentes phases dans la gestion de crise.

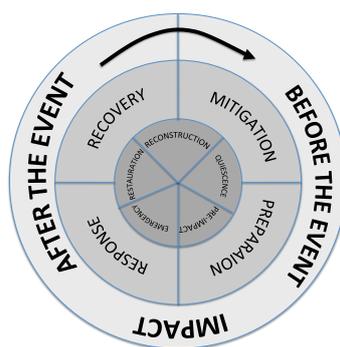


FIGURE I.4 – Les différentes phases de la gestion de crise [Alexander, 2002]

Dans le cadre de ces travaux, nous ne nous intéressons qu'à la phase de réponse. Toutefois, certains éléments inhérents à la phase de préparation seront abordés pour

1. .

permettre une meilleure compréhension des éléments de la phase de réponse.

I.1.2.3 La prise de décision en situation de crise

L'étymologie grecque du terme « crise » évoque directement la notion de décision. Les acteurs, dont l'objectif est de gérer la crise, cherchent ainsi à définir des stratégies pour mettre en place leurs actions. Toutefois, une situation de crise est une situation incertaine si l'on se rattache à la définition de l'incertitude donnée par [Zimmermann, 2000] : « L'incertitude implique que dans une certaine situation, une personne ne dispose pas de l'information appropriée, tant qualitative que quantitative, pour décrire, prescrire ou prédire de manière déterministe un système, son comportement ou ses caractéristiques ». Le même auteur rapporte que les causes des incertitudes proviennent :

- Du *manque* et de l'*incomplétude* de l'information qui empêchent le décideur d'établir les différents états vers lesquels le système est susceptible d'évoluer.
- De la trop grande *complexité* et *abondance* de l'information qui noient le décideur sous un volume d'information qu'il est incapable de traiter et d'analyser.
- D'un *conflit* entre informations contradictoires ou fausses qui amène le décideur à plusieurs conceptions divergentes de la situation.
- D'une *ambiguïté* dans les termes et les concepts employés pour décrire la situation.
- D'un manque de *précision* des systèmes de mesure pouvant amener à des imprécisions et engendrer des erreurs de calcul à propos de la situation.

Il apparaît alors essentiel que le décideur ait besoin d'aide dans sa prise de décision pour faire face à cette situation. C'est l'objet de l'aide à la décision définie par [Roy, 1992] comme « l'activité de celui qui, par des voies dites scientifiques, aide à obtenir des éléments de réponse à des questions que se posent des acteurs impliqués dans un processus de décision ». [Lauras, 2013] rappelle les différents modèles de décision existants dans le cadre d'une situation de crise.

Le modèle rationnel C'est la théorie « classique » de la décision. Il implique les hypothèses suivantes :

- Le décideur a des préférences sur chacun des critères et peut donc les ordonner. En d'autres termes, le connaisseur dispose d'informations exhaustives sur l'ensemble de son problème.
- Le problème est toujours représentable comme un problème d'efficacité dans lequel on va chercher à optimiser une fonction d'utilité apportant la solution au problème de décision.
- L'information et les ressources nécessaires pour trouver une solution sont toujours disponibles.

Dans le modèle rationnel, le décideur a la possibilité d'étudier toutes les alternatives possibles. Il est en mesure de choisir une solution, car il détient les critères permettant de classer toutes les décisions possibles. Si on considère le décideur en temps de crise, les hypothèses d'exhaustivité et de disponibilité de l'information ne sont que très rarement vérifiées compte tenu de leur caractère incertain. Ce modèle est donc très difficilement

exploitable dans de telles situations.

Le modèle de la rationalité limitée Le décideur de gestion de crise étant soumis à des contraintes temporelles fortes, il ne peut pas entreprendre une analyse exhaustive de la situation de crise. Son objectif ne consistera pas à trouver la solution la plus performante (optimum), mais plutôt d'atteindre une solution jugée *acceptable* (satisfecit) qui permette de remplir les objectifs liés à la gestion de crise. Le modèle de rationalité limitée est souvent associé au modèle de prise de décision IMC (Intelligence, Modélisation, Choix) [Newell *et al.*, 1972]. Celui-ci se fait selon les trois étapes suivantes :

1. *Intelligence*. Il s'agit de recueillir les informations nécessaires à la formulation du problème auquel le décideur est soumis.
2. *Modélisation*. À partir du traitement des informations recueillies lors de l'étape précédente, le décideur va chercher un ensemble de solutions envisageables pour traiter le problème identifié.
3. *Choix*. Il s'agit d'évaluer et d'estimer les conséquences de chacune des solutions élaborées lors de l'étape précédente afin d'en retenir la meilleure, compte tenu des critères et des contraintes établies.

Dans le cadre d'une prise de décision, il est d'usage de distinguer les niveaux de décision en fonction des horizons de temps pour lesquels les décisions sont prises. Ainsi, la prise de décision se fait suivant les horizons suivants [Ansoff et McDonnell, 1990] :

- *Stratégique*. Ce sont les décisions les plus importantes dans le sens où elles déterminent l'orientation générale de l'organisation. Le niveau de détail des décisions est très faible, mais concerne toute l'organisation. Les décisions stratégiques sont l'objet d'une vision à long terme de l'organisation. En gestion de crise, il s'agit notamment de la configuration du réseau de réponse à une situation de crise et de l'établissement des plans de gestion de crise (doctrine). Ces décisions sont élaborées pendant la phase de préparation.
- *Tactique*. Il s'agit du raffinement des décisions stratégiques avec une vision à moyen terme de la situation. Ce sont souvent des décisions de gestion prises pour une partie de l'organisation. En gestion de crise, les décisions prises par la cellule de crise en fonction de la situation réelle et future du terrain sont considérées comme tactiques.
- *Opérationnel*. Elles correspondent aux décisions réalisées au jour le jour par les acteurs opérationnels. Elles ont un effet immédiat et leurs résultats sont connus avec certitude. En gestion de crise, il s'agit des décisions prises sur le terrain.

Les présents travaux ne traitent que des décisions prises par la cellule de crise pendant la phase de réponse. Par conséquent nous nous intéressons uniquement au niveau tactique de la prise de décision.

I.1.2.4 Spécificités liées à la crise routière

La réponse à une situation de crise routière en France est hiérarchisée en fonction du périmètre du réseau routier impacté par la crise (cf table I.3). L'exploitation des routes est ainsi organisée de la manière suivante.² :

- *Les Voies Communales (VC)* sont exploitées par les services techniques des communes, et sont placées sous l'autorité du maire et du conseil municipal.
- *Les réseaux routiers départementaux* sont exploités par les Services Techniques Départementaux et placés sous l'autorité du président du conseil général.
- *Le réseau routier national non concédé* est géré par les DIR (Directions Interdépartementales des Routes). Chaque DIR est placée sous l'autorité du préfet de région où se situe son siège (rôle de préfet coordonnateur des itinéraires routiers).
- *Le réseau routier national concédé* est géré par les sociétés concessionnaires d'autoroute (SCA) qui sont responsables de la viabilité de leur réseau. En cas de crise, chaque SCA désigne un référent joignable par les autorités au niveau de la zone de défense et sécurité.³.

Nature du réseau	Autorité de décision	Gestionnaire Routier
Voies Communales	Conseil Municipal	Commune
Départemental	Conseil Général	Services Techniques Départementaux
National non concédé	Préfecture de Zone	Direction Interdépartementale des Routes
National concédé	Préfecture de Zone	Société Concessionnaires d'Autoroutes

TABLE I.3 – Les différentes échelles de gestion routière en France

En regard de ces différentes échelles, l'organisation du traitement des situations de crise routière se fait alors à plusieurs échelons :

Niveau Départemental En situation de crise au niveau départemental, c'est le Directeur Départemental des Territoires et de la Mer (DDTM) qui est en charge de la coordination des différents acteurs (notamment entre les gestionnaires routiers). Il exerce un rôle d'expertise auprès du préfet du département et est responsable du volet « réseau routier » du Centre Opérationnel Départemental (COD)⁴ lorsque celui-ci est activé.

Niveau Zonal Lorsque l'échelle de la crise dépasse le niveau départemental, c'est le Poste de Commandement (PC) zonal de circulation qui met en oeuvre les mesures de

2. Il s'agit d'une organisation valable pour le début de l'année 2015, les futures réformes territoriales pouvant en modifier le fonctionnement.

3. Les zones de défense et de sécurité (au nombre de sept en France métropolitaine) correspondent à un découpage administratif comprenant plusieurs régions. Les décisions prises au niveau zonal impactent le réseau routier dit « structurant » (composé essentiellement de grands axes à deux voies).

4. Le COD est l'organe opérationnel au niveau départemental du dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile), activé en cas de catastrophe sur le département concerné. Le COD épaulé le Directeur des Opérations de Secours (préfet du département) dans sa mission d'organisation des secours et de mobilisation des moyens.

gestion de trafic et l'information des usagers. Le PC zonal est géré par le Centre Régional d'Information et de Coordination Routière (CRICR) et est placé sous l'autorité du Préfet Délégué à la Défense et à la Sécurité de la zone de défense impactée. Le PC zonal travaille de pair avec le Centre Opérationnel de Zone⁵ (COZ) qui traite du volet « sécurité civile » de la crise routière.

Niveau Inter-Zonal Si la crise affecte plusieurs zones de défense limitrophes, mais sans toutefois revêtir un caractère national, le ministre de l'Intérieur désigne l'un des préfets de zone pour prendre les mesures de coordination et notamment les mesures de police, de façon à assurer la cohérence des décisions prises. Celui-ci s'appuie sur l'expertise des CRICR des zones concernées pour prendre ses décisions en conséquence.

Niveau National Si la crise est d'ampleur nationale, c'est le CMVOA (Centre Ministériel de Veille Opérationnel et d'Alerte) pour le volet transport et le COGIC (Centre Opérationnel de Gestion Interministériel des Crises) pour le volet sécurité civile qui assurent le rôle de cellule de crise. Des décisions peuvent être prises au niveau national par arrêté ministériel. Si la crise change de dimension et dépasse le cadre d'une crise routière, alors le Premier Ministre peut choisir d'activer le Centre Interministériel de Crise (CIC). Ce fut notamment le cas de la crise de mars 2013 où la crise avait dépassé le caractère routier avec notamment de nombreux foyers privés d'électricité et des transports fortement perturbés.

La figure I.5 propose une vue d'ensemble de l'organisation de la réponse à une situation de crise en France.

L'organisation de ces différents niveaux de décisions passe par l'élaboration de plans de coordination définis pour des situations spécifiques. On y trouve la « doctrine » de la gestion de crise et notamment les règles amenant au déclenchement des mesures citées précédemment. Ces plans sont révisés tous les ans après avoir été éprouvés en situations réelles grâce aux retours d'expérience. On peut citer à titre d'exemple les Plans Intempéries Zonaux qui décrivent les mécanismes de mesure à adopter en cas d'intempéries neigeuses ou encore le plan PALOMAR (PARis-LyOn-MARseille) qui propose des solutions lors de grandes migrations (départs en vacances...). Ces plans sont coordonnés avec les plans ORSEC définis par le Ministère de l'Intérieur.

Sur le réseau routier de l'Ouest de la France, la gestion d'une crise routière due aux intempéries hivernales se fait dans le cadre de l'application du Plan Intempéries Zone de l'Ouest (PIZO). C'est un plan de secours de circulation routière qui a pour objectifs de :

- Prévenir les conséquences de conditions météorologiques défavorables sur les principaux axes de la zone de défense Ouest.
- Assurer au mieux l'écoulement du trafic, même dans des conditions dégradées, en évitant le blocage des axes routiers et autoroutiers par la maîtrise de la gestion du trafic des poids lourds.

5. Le COZ, à l'instar du COD est l'organe opérationnel dont dispose le préfet de Zone en cas de dispositif ORSEC zonal.

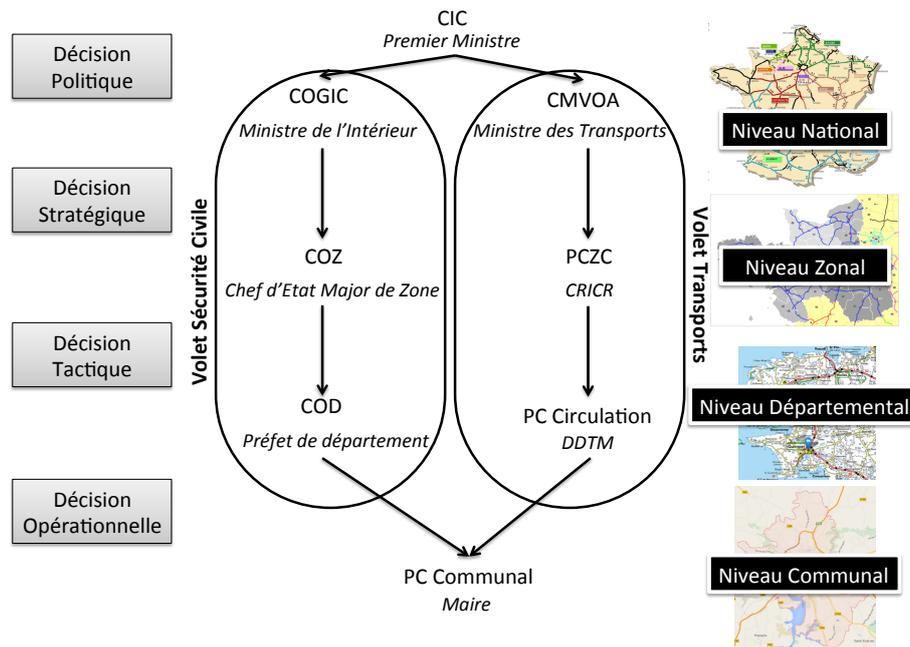


FIGURE I.5 – Vue d'ensemble de l'organisation de la réponse à une situation de crise

- Coordonner, en appui des préfets de département de la zone de défense, l'assistance et le secours aux usagers des axes routiers structurants (réseau PIZO).

Ce plan s'attache à décrire les procédures métiers de mise en oeuvre et de réponse à une situation de crise routière. Le plan est découpé en quatre niveaux d'activation dépendant de la criticité de la crise en cours :

- Le *Niveau 1* dit de « veille hivernale » est actif pendant toute la période hivernale (du 15 novembre au 15 mars). Pendant cette période, une attention particulière est portée aux évènements météorologiques (bulletins et cartes de vigilance) et aux conditions de circulation ;
- Le *Niveau 2* dit de « pré alerte » ou « pré crise » correspond à la phase durant laquelle une concertation est menée pour définir l'ampleur de la crise, sa durée, sa position géographique et les services impliqués pour la prise de mesures préventives ;
- Le *Niveau 3* dit de « crise – gestion préventive du trafic » implique le début d'une réponse à la situation de crise routière par la prise de Mesures de Gestion de Trafic (MGT). A noter qu'il s'agit ici uniquement de mesures préventives, aucun évènement majeur (naufragés de la route⁶, accident grave de la circulation) n'est encore à déplorer.
- Le *Niveau 4* dit de « crise – gestion curative du trafic » est le plus haut niveau d'activation du PIZO. Il correspond à la prise de mesures curatives de gestion de

6. Le terme naufragé de la route est utilisé par les médias pour désigner les usagers de la route bloqués dans leur véhicule et qui sont généralement amenés à y rester toute ou partie de la nuit.

trafic en coordination avec des Mesures d'assistance et de Secours aux Usagers (MSU) dans le cadre de l'application du plan ORSEC. Au niveau 4, la crise change donc de dimension et devient aussi une crise de sécurité civile.

Les plans de gestion de crise et en particulier le PIZO sont définis lors de la phase de préparation et décrivent les mécanismes à adopter en fonctions des différentes situations de crise. Pour faire face à une situation de crise routière, les autorités en charge de la gestion de la crise ont ainsi identifié les mesures spécifiques suivantes :

- *Les Mesures d'Information aux Usagers (MIU)*. Elles ont pour but d'informer les usagers des conditions de circulation sur le réseau routier. Elles font partie intégrante du plan de communication mis en place dans le cadre d'une gestion de crise. Elles comportent un volet d'information prévisionnelle (prévisions Bison Futé, travaux...) et un volet d'information temps réel (état du trafic, incidents...). Ces informations sont diffusées sur le site internet de Bison Futé, par des médias régionaux ou nationaux, par les radios dédiées (Radio Vinci Autoroutes), par les nouvelles technologies (systèmes GPS embarqués) et par les Panneaux à Message Variable (PMV) disposés sur l'ensemble du réseau.
- *Les Mesures de Gestion de Trafic (MGT)*. Ce sont des mesures qui ont été définies dans la phase de préparation lors de l'élaboration de Plans de Gestion de Trafic (PGT). Elles ont pour but d'assurer la régulation et l'optimisation de la fluidité de la circulation sur les différents axe routiers impactés. Chaque MGT fait l'objet d'un arrêté signé par l'autorité compétente du réseau impacté. Ainsi parmi les mesures de gestion de trafic on trouve :
 - Les interdictions de dépassement pour les poids lourds ;
 - Les limitations de vitesse ;
 - La définition d'itinéraires de contournement ;
 - L'ouverture de Zone De Stockage (ZDS) pour poids lourds ;
 - Les interdictions de circuler (poids lourds ou tous véhicules)
- *Les Mesures d'assistance Secours aux Usagers (MSU)*. Elles ont pour but de venir en aide et d'apporter une assistance aux personnes touchées par une situation de crise routière. Ces mesures sont pilotées par les unités de Sécurité Civile et s'effectuent dans le cadre du plan ORSEC. Elles proposent le secours des personnes en détresse, la sécurisation et l'évacuation des usagers en difficulté, l'accueil, l'hébergement et l'alimentation des usagers bloqués.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons au réseau national (réseau structurant) et donc au pilotage zonal des situations de crise. En outre, nous considérons seulement le volet « routier » de la réponse à la situation de crise.

I.1.2.5 Problèmes dans la gestion de crise routière

D'une manière générale, la gestion d'une crise ne se fait pas sans écueil, la gestion des crises routières ne déroge pas à cette règle comme le souligne [Panhaleux, 2011] dans

un retour d'expérience sur la crise routière de décembre 2010. Cette crise est souvent citée en exemple pour mettre en relief les difficultés de coordination dans la gestion de crises routières. [Panhaleux, 2011] préconise ainsi une amélioration de la coordination entre les différents acteurs, une meilleure anticipation du risque météorologique et une maîtrise plus importante du trafic des poids lourds.

L'un des principaux dysfonctionnements de la gestion de crise réside dans le manque de coordination des acteurs hétérogènes. Il ne s'agit aucunement de remettre en cause la capacité de chaque acteur, expert sur son champ de compétences, à effectuer la mission qui lui incombe, mais plutôt de caractériser les problèmes liés à l'hétérogénéité des parties prenantes. Ainsi, le pompier éteignant un incendie proche d'une route à haute circulation ne risque-t-il pas d'entraver le bon déroulement de la circulation sur cet axe et donc de perturber le gestionnaire routier en charge son exploitation ? Le manque de collaboration et de coordination entre acteurs semble donc hautement préjudiciable pour tous les naufragés de la route. Ce manque de collaboration peut se décliner au cours des trois étapes du cycle de vie de la collaboration :

- Difficultés dans la *définition* de la collaboration.
- Entraves dans la *réalisation* de la collaboration.
- Écueils dans le *maintien* de la collaboration.

Dans le contexte très instable et très évolutif induit par la situation de crise, le maintien de la collaboration pour y répondre apparaît comme un enjeu majeur. La cellule de crise doit donc être en capacité de détecter le plus justement possible les évolutions liées à la situation et proposer en retour une adaptation la plus pertinente possible. Cet enjeu relève directement de l'agilité de la réponse telle que définie dans [Charles, 2010] comme « la capacité d'un système à apporter une réponse rapide et efficace aux changements brusques d'une organisation ». Par ailleurs, [Barthe, 2013] la définit comme la capacité de *détection* et d'*adaptation* d'un système aux changements de manière *réactive* et *efficace*.

En outre, le système en crise fonctionne en régime « dégradé ». Les délais de décision sont raccourcis et nécessitent une amélioration dans les trois phases de la prise de décision : la *remontée d'information*, la *prise de décision* et sa *mise en application*. L'enjeu se situe alors dans la récupération de données et d'informations issues du terrain et leur assimilation pour en déduire les bonnes décisions.

Enfin, plus un constat qu'un problème, l'apparition et le développement Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) qui prend une part de plus en plus importante dans les crises, amènent le décideur à devoir traiter un volume de données de plus en plus important. Cette « numérisation » croissante de l'espace physique impose la nécessité d'outils suffisamment intelligents capables d'exploiter ces données pour supporter ensuite la prise de décision dans les situations de crise.

Ainsi se pose la question pour le décideur d'assurer un pilotage agile et efficace de la réponse à une situation de crise routière. Au travers du dernier constat de l'émergence des NTIC dans les crises, la bonne conduite de ce pilotage semble passer par la mise en place d'un système d'information capable de supporter le décideur dans ses choix. C'est la problématique à laquelle tentent de répondre les présents travaux : la conception

d'un système d'information supportant le pilotage réactif et anticipatif d'une situation de crise routière.

I.2 Le projet SIM-PeTra

I.2.1 Contexte et genèse du projet

Les épisodes neigeux de décembre 2010 et leurs conséquences sur la circulation routière (routes embouteillées, accident de poids lourds, naufragés de la route) ont amené les autorités françaises à se fixer comme impératif l'amélioration de la coordination entre les différentes parties prenantes impliquées dans la réponse à la situation de crise (gestionnaires routiers, sécurité civile, services d'urgence...) en cas de fortes intempéries hivernales [Panhaleux, 2011].

Le projet de recherche SIM-PeTra (Système d'Information de Médiation pour un pilotage coordonné des situations de crise : application aux PErurbations dans les TRAnsports) ambitionne de poursuivre cette réflexion par la mise en place d'un système d'information de médiation d'aide à la décision pour le pilotage des crises routières.

Ce projet a été financé par le Programme de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres (PREDIT) dans le cadre de l'appel à projet PREDIT-GO2 « Gestion des crises et des perturbations dans les transports ». Il a été réalisé d'octobre 2011 à octobre 2013 en partenariat avec le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE⁷) et le CRICR de l'Ouest. Ces deux partenaires jouent un rôle majeur lors d'une crise routière puisque le CETE est en charge de la rédaction du Plan Intempéries Zone Ouest (PIZO) et le CRICR est en charge de sa bonne exécution en tant que cellule de crise routière.

Le projet fait donc suite aux intempéries ayant touché l'Ouest de la France en décembre 2010 et auxquelles le CRICR a dû faire face en gérant la crise routière consécutive à ces intempéries. Dans son rapport de retour d'expérience, [Panhaleux, 2011] a émis les recommandations suivantes pour l'amélioration de la coordination entre les acteurs de la crise :

- *Formalisation et fiabilisation des remontées d'information* provenant des acteurs opérationnels sur le terrain ;
- *Organisation et amélioration* des circuits de décision ;
- *Renforcement des relations* entre les différentes cellules de crise (départementales, régionales, zonales et nationales).

Initialement, pour pouvoir apporter une réponse à la situation de crise, les différents acteurs s'appuient sur des outils informatiques assurant les fonctionnalités de *recupération de l'information*, *d'aide à la décision* et de *diffusion de l'information*. La liste est donnée ci-après :

7. Il est à noter que depuis le 1er janvier 2014, le CETE a été remplacé par le Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) suite à une décision du Grenelle de l'Environnement.

Les outils de recueil d'information

- **OPTIMA** (Outil de Production sur les Tronçons d'Informations Météorologiques Agrégées) est un outil Météo France permettant d'assurer un suivi en temps réel de la situation météorologique sur les tronçons routiers du réseau et de fournir des prévisions météorologiques précises pour chaque tronçon.
- **VigiMeteo** est un outil Meteo France permettant la diffusion sur internet de la carte de vigilance Meteo France.
- **SERPE-VH** est le système d'information des gestionnaires routiers dédié aux renseignements des conditions de conduite hivernale (état des chaussées).

Les outils de diffusion de l'information

- **TIPI** est le système d'information du CRICR et des gestionnaires routiers supportant l'ensemble des processus de gestion de l'information routière (signalisation d'accidents, de travaux, conditions de trafic...). Il est à noter que TIPI centralise aussi l'information grâce à sa base de données partagée au niveau national avec l'ensemble des gestionnaires routiers et des services de police.
- **DIRIA** est l'outil de diffusion d'information aux usagers (téléphone, Internet) installé dans les CRICR de France.
- **SYNERGI** est l'outil de main courante du ministère de l'Intérieur sur lequel sont renseignées toutes les mesures prises tout au long de la crise.

Les outils d'aide à la décision

- **OPTICCO** (Outil pour le Traitement Informatisé et Cartographique des Crises hivernales dans l'Ouest) est l'outil d'aide à la décision géographique du CRICR de l'Ouest permettant de l'accompagner dans sa prise de décision en fournissant un rendu cartographique de la situation de crise.
- **L'outil d'aide à la rédaction d'arrêtés** permet au CRICR de générer de manière semi-automatique des messages types à envoyer aux différents acteurs intervenants dans la réponse à la situation de crise routière. Il accompagne la cellule de crise dans la rédaction des différents arrêtés à prendre (changement de niveau PIZO ou prise de mesures de gestion de trafic) et assure leur diffusion vers tous les acteurs concernés (gestionnaires, préfectures).

Un des premiers enjeux du projet est alors d'assurer la communication et l'échange de données entre ces systèmes d'information hétérogènes. Il s'agit donc d'assurer l'interopérabilité de ces systèmes vue comme « la capacité d'un système à travailler avec un autre système sans effort de la part de l'utilisateur » [Konstantas et al., 2005].

1.2.2 Objectifs du projet SIMPeTra

Le projet SIM-PeTra s'inscrit dans la suite du projet ISyCri (ANR/06/SECU/006, 2006-2010 : Interopérabilité des Systèmes en situation de Crise) dont un des résultats

marquants a été la définition d'une méthodologie de conception d'un Système d'Information de Médiation (SIM) pour répondre aux situations de crise et dont les résultats sont détaillés dans [Truptil, 2011]. Le projet SIM-PeTra vise ainsi à valider et améliorer cette méthodologie pour ensuite proposer des pistes d'actions efficaces pour ces outils de gestion de crise. Pour cela, SIM-PeTra propose les trois niveaux d'expérimentation suivants :

- *Définition et expérimentation d'une méthodologie* de gestion de crise appliquée et adaptée au domaine des transports ;
- *Implémentation et expérimentation des outils informatiques* (démonstrateur), supports à la méthodologie, sur des scénarios crédibles ;
- *Retour d'expérience* sur ces scénarios afin de mettre en évidence, vis-à-vis d'une situation vécue précédemment, les apports de la démarche et des outils.

La méthodologie proposée (issue du projet ISyCri) s'articule autour des quatre niveaux conceptuels suivants :

- *Caractérisation d'une situation de crise*. Il s'agit de définir un « réceptacle » permettant d'accueillir les concepts de base pour modéliser une situation de crise routière. Cette étape vise à recueillir, formaliser et capitaliser des éléments caractéristiques de la situation étudiée.
- *Déduction d'une dynamique collaborative de réponse*. Il s'agit d'analyser la connaissance capitalisée lors de l'étape précédente pour proposer des processus collaboratifs de réponse réalisables. Cette déduction doit se faire sur la base des compétences des différents acteurs et de règles de déduction métier permettant d'aboutir à la définition des actions à mener et à coordonner pour traiter la situation.
- *Orchestration informatisée des processus collaboratifs*. Cette étape correspond au déploiement d'un système informatisé permettant le pilotage des processus collaboratifs identifiés dans l'étape précédente. Cette implémentation n'est envisageable que si toutes les informations nécessaires à la configuration du Système d'Information de Médiation sont complètes et que par conséquent la « traduction » de la cartographie de processus en workflow exécutable a bien été réalisée.
- *Gestion de l'évolution de la situation*. Il s'agit d'assurer un maintien pertinent des processus collaboratifs engagés et du système informatisé déployé face aux évolutions possibles de la situation de crise. Le système doit donc être en mesure de *détecter* les changements induits par une évolution de la situation et de s'y *adapter* de manière pertinente en diagnostiquant le niveau d'adaptation requis (caractérisation, cartographie, implémentation).

L'objectif final du projet est de *proposer aux pouvoirs publics (et au CRICR en particulier) une solution informatique capable de les accompagner dans la gestion de crise routière*.

I.2.3 Démarche générale du projet

Afin de remplir les objectifs décrits dans la partie précédente, le projet (d'une durée de deux ans) a été organisé de la manière suivante :

- *Lot 1 : Coordination et dissémination.* Ce lot, qui couvre la totalité de la durée du projet permet d'assurer le suivi opérationnel et administratif du projet et la valorisation des résultats du projet. Ce lot fait l'objet de rapports semestriels de coordination et d'un rapport de politique de dissémination.
- *Lot 2 : Cas d'utilisation.* Il s'agit, à partir d'une analyse couvrante et exhaustive du retour d'expérience de l'évènement météorologique de 2010, de définir les éléments constitutifs d'un scénario crédible constituant le cas d'utilisation du démonstrateur final.
- *Lot 3 : Niveau « métier » .* Ce lot se décompose en trois tâches successives permettant de remplir les objectifs de caractérisation de la situation de crise et de déduction de la dynamique collaborative associée. La première tâche correspond à la définition de la base de connaissances, à savoir la définition d'un métamodèle de crise routière et son instanciation à partir d'éléments réels, crédibles et caractérisés. La deuxième tâche comprend la définition de règles qui, à partir d'une caractérisation de situation de crise, permettent de déduire la dynamique d'une réponse possible. Enfin, la troisième tâche s'attache à obtenir un outil de démonstration (modeleur) capable de caractériser une situation de crise routière, mais aussi d'exécuter les règles de déduction définies précédemment.
- *Lot 4 : Niveau « technique » .* Il s'agit dans un premier temps d'effectuer un état de l'art technologique afin de découvrir quelles solutions peuvent répondre à l'ensemble des fonctionnalités attendues (orchestration, format de workflow, mécanisme d'agilité, définition d'interfaces...). À partir de celui-ci, une définition théorique des mécanismes d'implémentation et d'agilité a été menée pour aboutir à un outil de démonstration intégrant également les résultats du niveau « métier » (Lot 3).

La figure I.6 reprend le planning tel qu'il a été réalisé dans le projet SIM-PeTra.

I.3 Positionnement du travail de recherche

Cette thèse s'inscrit en continuité de plusieurs travaux de recherche menés au sein du centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi. La première étape de notre positionnement va donc consister en une présentation de l'écosystème de travail. La deuxième partie s'attache à présenter un cadre dans lequel nos travaux peuvent s'inscrire. Enfin, la dernière partie propose une grille de lecture à partir du cadre précédemment établi.

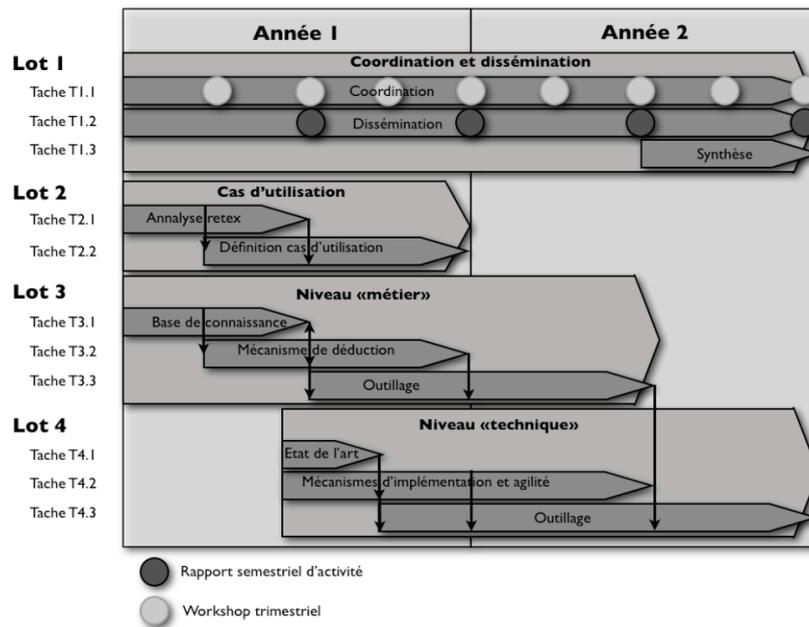


FIGURE I.6 – Planning du projet SIM-PeTra

I.3.1 Positionnement dans l'équipe de recherche

I.3.1.1 Présentation du projet MISE

La démarche MISE (Mediation Information System Engineering, Ingénierie de Système d'Information de Médiation) est un projet de recherche interne au centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi [Bénaben, 2012] dans lequel cette thèse s'inscrit directement. Ce projet a débuté en 2004 et vise à définir une architecture capable de supporter les collaborations entre acteurs hétérogènes par médiation de systèmes d'information. Il s'agit d'une démarche itérative dont la vue d'ensemble est donnée par la figure I.7.

MISE 1.0 (2004-2010) cette première itération du projet s'appuie sur une démarche d'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) [Bourey *et al.*, 2007] pour définir et déployer un système d'information de médiation capable de supporter une collaboration entre acteurs hétérogènes. La démarche MISE 1.0 s'articule autour des points suivants :

- Définition d'un modèle de situation collaborative correspondant au niveau CIM (Computer Independent Model) de la démarche MDA (Model Driven Approach) et transformation de ce modèle en un modèle de processus collaboratif correspondant au niveau CIM bas niveau. Cette transformation se trouve dans les travaux de [Rajsiri, 2009].
- Transformation du modèle CIM de processus collaboratif en un modèle PIM (Platform Independant Model) de Système d'Information de Médiation reprenant le paradigme SOA (Service Oriented Architecture). Cette transformation se trouve

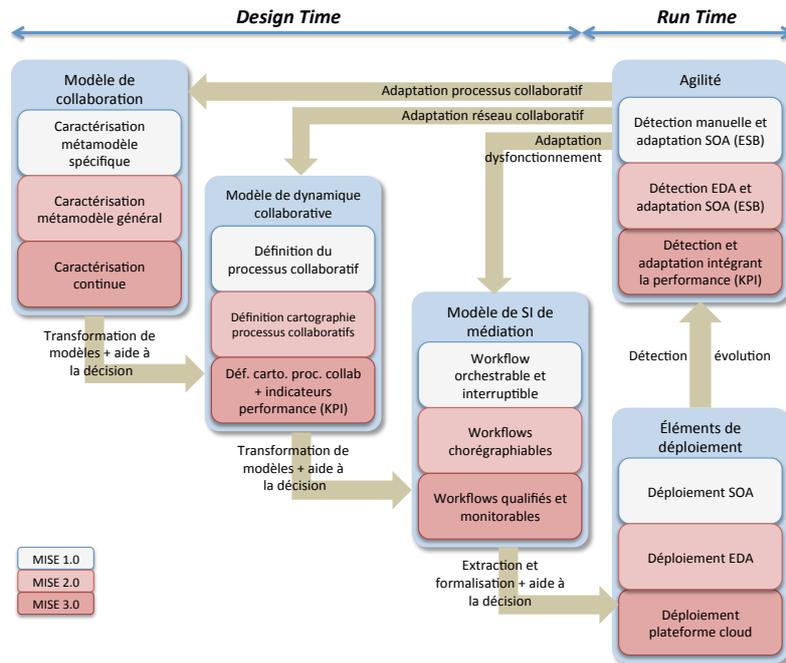


FIGURE I.7 – Vue d'ensemble du projet MISE [Bénaben, 2012]

détaillée dans les travaux de [Touzi, 2007].

- Application de la démarche dans le cadre de la conception d'un système d'information de médiation pour aider à la gestion des crises. Cette application concrète se trouve détaillée dans les travaux de thèse de [Truptil, 2011].

MISE 2.0 (2009-2013) La démarche MISE 2.0 s'articule autour des quatre avancées suivantes :

- La transformation d'un modèle de situation collaborative en un modèle de cartographie de processus annotés sémantiquement. La thèse de [Mu, 2012] détaille cette transformation.
- La transformation des modèles de cartographie de processus en modèles exécutables en réconciliant les activités (niveau processus) et les services (niveau modèle exécutable) de manière automatique [Boissel-Dallier, 2012].
- La prise en charge de l'agilité du SIM par une approche dirigée par les événements [Barthe, 2013].
- La prise en compte des exigences non fonctionnelles (sécurité, qualité, performance...) lors de la réconciliation entre les niveau métier et technique [Zribi, 2014].

MISE 3.0 (2011-...) La troisième itération du projet MISE a démarré en 2011 avec la présente thèse et se poursuit avec les travaux de thèse de Tiexin Wang (2012-2015), d'Aurélié Montarnal (2012-2015) et de Loïc Bidoux (2012-2015) pour enrichir encore chacune des étapes de la démarche MISE 2.0 :

- Caractérisation continue de la collaboration par la collecte « intelligente » de données issues notamment du monde de l'Open-Data et du Big-Data afin de les traiter et les formaliser en connaissance exploitable.
- Ajout d'une couche « aide à la décision » dans la première transformation de modèles afin d'obtenir un modèle de cartographie de processus sur lesquels viennent se greffer des indicateurs de performance pour en améliorer le pilotage.
- Déploiement du système de médiation sur une plateforme cloud permettant la définition de modèles de comportements collaboratifs.
- Amélioration de l'agilité des processus par un pilotage anticipatif des situations collaboratives.

I.3.1.2 Positionnement au sein de MISE

Les travaux de thèse détaillés dans ce manuscrit ayant démarré en 2011, ils s'inscrivent directement dans le cadre de la troisième itération du projet MISE. Toutefois, tout comme le projet ISyCri venait clôturer MISE 1.0, le projet SIM-PeTra s'affiche comme une conclusion de MISE 2.0 par un parcours total de la démarche appliqué au champ restreint des crises routières.

En effet, le projet SIM-PeTra propose une méthodologie pour la conception d'un système d'information de médiation collaboratif et agile supportant la décision dans le contexte des crises routières. Ainsi, une des contributions majeures du projet de recherche SIM-PeTra a été d'appliquer la démarche MISE 2.0 au cas concret des crises routières. Le découpage en lots du projet rappelé dans la section I.2.3 reprend les grandes étapes de la démarche d'ingénierie dirigée par les modèles du projet MISE avec :

- Les tâches de caractérisation de la situation de crise et déduction de la dynamique de réponse du lot 3 « niveau métier » qui correspondent au niveau CIM de la démarche MISE (Modèle de collaboration et modèle de dynamique collaborative de la figure I.7).
- Les tâches du lot 4 « niveau technique » qui prennent en charge les parties PIM et PSM de la démarche MISE avec la définition des mécanismes d'implémentation et la réalisation du prototype du système d'information de médiation.
- La tâche de définition des mécanismes théoriques d'agilité du lot 4 qui fait quant à elle référence à la prise en compte de l'agilité dans la démarche MISE.

Toutefois, l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit s'ils font référence à la seconde itération du projet MISE s'inscrivent également comme précurseur de la troisième itération. En effet, ceux-ci proposent la caractérisation semi-automatique de la situation de crise par un recueil de données issues de systèmes d'information « terrains ». Ensuite, ils proposent une amélioration de la prise de décision en la basant sur un métamodèle de collaboration générique étendu au domaine des crises puis au cas des crises routières. Enfin, une proposition est faite pour améliorer l'agilité des processus de réponse par un pilotage anticipatif de la situation de crise routière.

I.3.2 Construction d'un cadre de travail

I.3.2.1 Différenciation Conception / Exécution

La première dimension de notre cadre découle assez naturellement du positionnement de la thèse dans l'écosystème de travail. En effet dans la figure I.7, on distingue deux phases dans la vue d'ensemble du projet MISE :

- La phase de conception (Design Time) correspond aux étapes de caractérisation de la collaboration, de la déduction de la dynamique de collaboration et de l'obtention du modèle de Système d'Information de Médiation. Il s'agit de définir tous les éléments permettant la mise en place de la collaboration.
- La phase d'exécution (Run-Time) correspond au déploiement de la collaboration sur le terrain et comprend également des éléments de détection des changements. Il s'agit de mettre en œuvre tous les éléments définis lors de la phase de conception.

Ainsi, cette première dichotomie entre les éléments de Design Time et ceux de Run Time peut être identifiée comme les différentes étapes du cycle de vie de la réponse à la situation de crise.

I.3.2.2 Différenciation a priori / a posteriori

L'organisation de la gestion des crises peut être vue comme un système extrêmement complexe. Pour définir un outil d'aide à la décision pertinent, il est nécessaire de disposer d'une formalisation du système considéré. L'approche de Modélisation d'Entreprise pour obtenir une expression du fonctionnement de la gestion de crise apparaît alors comme pertinente. La Modélisation d'Entreprise est une discipline de la productique qui s'intéresse à la construction de modèles pour expliquer la structure et le fonctionnement d'une entreprise et en analyser le comportement pour en améliorer la performance [Vernadat, 1996]. En outre, la gestion de crise manque souvent de structuration et de formalisation. Ce système peut être également vu comme un système de contrôle commande représenté par la figure I.8 [Heylighen et Joslyn, 2001].

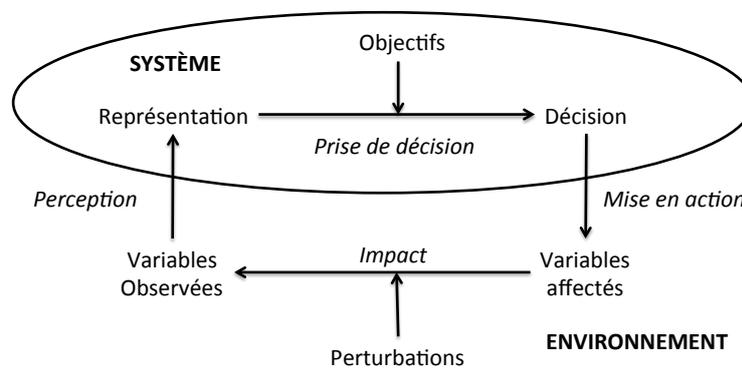


FIGURE I.8 – Vision d'un système de contrôle commande [Heylighen et Joslyn, 2001]

Le pilotage d'un tel système peut s'effectuer par une évaluation de la performance

de celui-ci. [Boucher et Burlat, 2003] précisent qu'une démarche d'évaluation de performance a besoin d'un modèle d'interprétation du système réel pour décrire les liens de causalité entre des actions sur le système et des performances en sortie. Il s'agit de définir et d'implémenter un système d'indicateurs de performance cohérents pour aider le décideur à comprendre. On distingue alors les démarches d'évaluation *a priori* des démarches d'évaluation *a posteriori* qui permettent respectivement d'aider la prise de décision à venir et d'évaluer la qualité des décisions prises.

L'évaluation de performance *a posteriori* permet de mesurer la performance d'un système réel par le calcul d'indicateurs « terrains ». S'en suit alors une interprétation des résultats par comparaison avec des objectifs préalablement définis. Cette démarche vise à mener des actions correctives pour piloter le système. Cette évaluation peut être considérée comme un moyen de détection des problèmes.

L'évaluation de performance *a priori* se base sur la modélisation et la formalisation des décisions à prendre et la mesure leur impact en évaluant l'état du système réel. Celui-ci est alors analysé pour identifier la performance des décisions formalisées. Une comparaison entre la performance attendue (liée aux objectifs du système) et la performance calculée est alors mise en œuvre pour proposer d'éventuelles modifications au niveau des variables de décisions. Ce nouveau jeu de variables est alors de nouveau évalué par rapport à l'état du système qui en résulte. Cette régulation porte le nom d'« optimisation ».

La figure I.9 illustre la distinction entre évaluation *a priori* et évaluation *a posteriori* de la performance [Tahon et Frein, 2000].

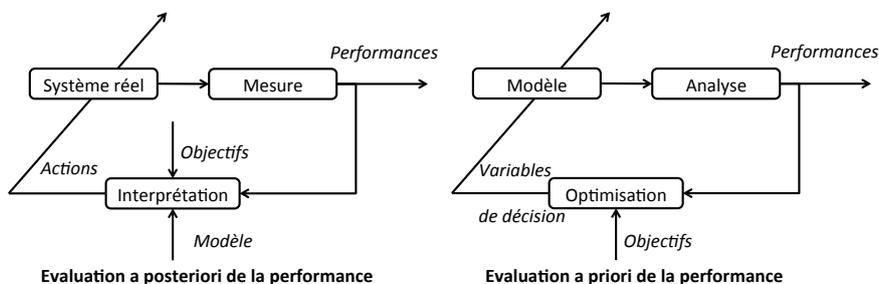


FIGURE I.9 – L'évaluation de performance d'après [Tahon et Frein, 2000]

I.3.3 Établissement d'une grille de lecture

Les différenciations précédentes permettent la mise en place d'un cadre de référence dans lequel nous allons positionner nos travaux afin de proposer une grille de lecture. Ce positionnement va se faire tout d'abord par rapport à la problématique de nos travaux puis nous ferons une description de nos contributions dans ce référentiel.

I.3.3.1 Positionnement de la problématique dans le référentiel

Nous allons ici chercher à projeter la problématique *de mise en place d'un système d'information supportant le pilotage agile et collaboratif d'une situation de crise routière* au travers des quatre objectifs suivants :

1. *Apporter une réponse couvrante et exhaustive à la situation de crise.* L'enjeu se situe ici au niveau de la *définition* de la dynamique collaborative. Il s'agit alors d'augmenter l'*efficacité* du système par une conception a priori de la réponse à la situation de crise.
2. *Apporter une réponse anticipée de la situation de crise.* L'enjeu se situe ici au niveau de l'*anticipation* que la cellule de crise va avoir vis-à-vis des évolutions potentielles de la situation. Il s'agit ainsi d'augmenter la *visibilité* du décideur en proposant une exécution *a priori* de la réponse.
3. *Adapter le comportement courant de la réponse par rapport aux évolutions de la situation.* L'enjeu se situe ici dans le *maintien* de la collaboration par la prise en compte des évolutions du système et des éventuelles adaptations qui en découlent. Cet objectif vise à augmenter la *réactivité* du système par la conception rapide d'une réponse a posteriori.
4. *Coordonner la réponse et en suivre le déroulement.* L'enjeu ici est de garantir la bonne *réalisation* de la réponse en en assurant un suivi pertinent par une mesure de la performance du système pendant la phase d'exécution de la réponse. L'objectif est alors d'augmenter la *vitesse* du système.

La figure I.10 propose de positionner ces enjeux dans le cadre précédemment présenté.

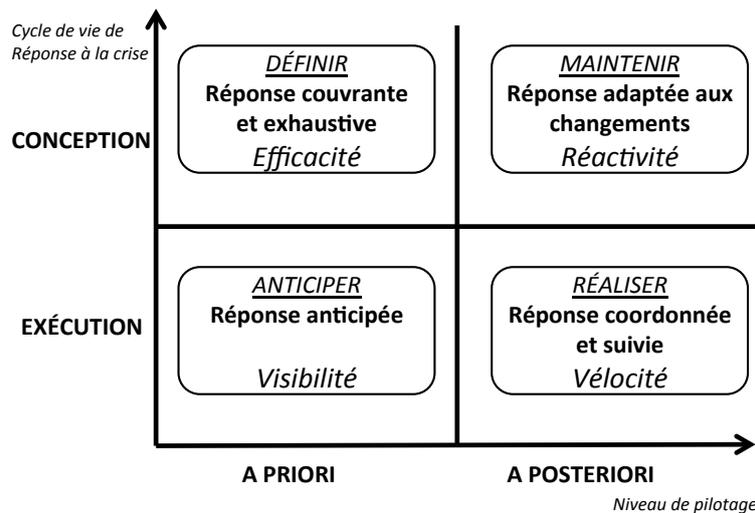


FIGURE I.10 – Positionnement de la problématique dans notre cadre de travail

I.3.3.2 Positionnement de la démarche MISE dans le cadre de travail

Si l'on reprend la démarche MISE décrite dans la section I.3.1.1, il est possible de replacer les différentes étapes dans le cadre de travail établi précédemment :

- Les étapes concernant la caractérisation de la situation collaborative et la déduction de la dynamique collaborative sont des étapes de Design Time, réalisées a priori.
- Les étapes d'informatisation du processus déduit et de déploiement sont des étapes de Run Time réalisées pour une évaluation a posteriori.
- Les étapes d'agilité, de détection des divergences et d'adaptation, sont des étapes de conception réalisées a posteriori.

La figure I.11 présente la projection de la démarche MISE dans notre cadre de travail.

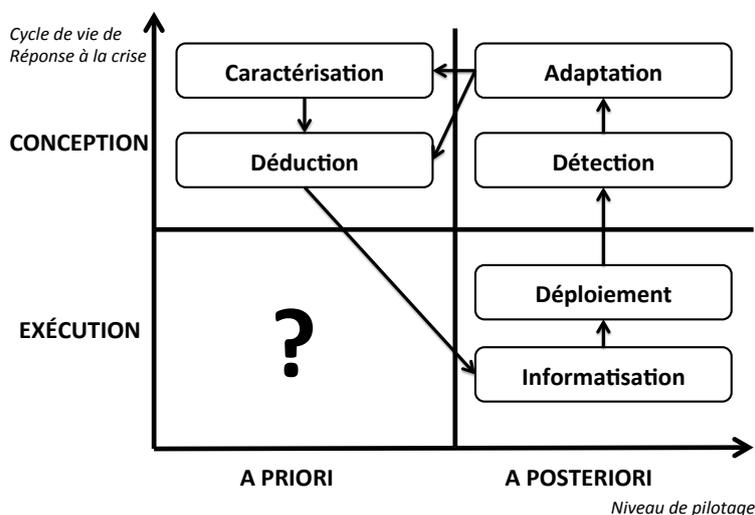


FIGURE I.11 – Projection de la démarche MISE dans notre cadre de travail

Cette projection permet d'identifier un manque dans la démarche MISE autour de l'exécution *a priori* d'une solution de réponse à la situation de crise. En effet, à l'heure actuelle lorsqu' une dynamique collaborative est déduite à partir de la caractérisation d'une situation collaborative, le décideur n'est pas en mesure d'évaluer la performance de sa solution par rapport aux éléments de prévisions dont il dispose. Cela se caractérise alors par un manque de visibilité pour le décideur. La mise en place d'un tel système permettrait au décideur d'envisager un nouveau mode de pilotage, anticipatif, d'une situation de crise routière complémentaire à celui, réactif, proposé dans la démarche MISE.

I.3.3.3 Boucles de pilotage proposées

La définition d'une réponse à une situation de crise et son pilotage peut alors s'effectuer à partir des trois boucles suivantes :

- Boucle 1 : définition d'une dynamique de réponse à partir de la caractérisation d'une situation de crise. Cette étape constitue le niveau basique du système par la construction et l'exécution de la réponse à la situation de crise grâce à une prise en compte uniquement des éléments actuels de la situation de crise. Ce niveau est toutefois limité puisqu'il ne tient pas compte de l'évolution de la situation de crise. L'utilisateur doit relancer *ex nihilo* le processus de caractérisation et de déduction à chaque évolution de la crise.
- Boucle 2 : comprend le pilotage *ex nihilo* de la réponse auquel vient s'ajouter un mode réactif. Il s'agit de réaliser une évaluation de performance a posteriori de la solution mise en place au cours du niveau 1 pour assurer le pilotage de la réponse. Ce mode repose sur la détection des évolutions de la situation et de son adaptation pertinente. En revanche, il n'anticipe ni les évolutions à court terme ni les décisions dont le temps de mise en œuvre est relativement long.
- Boucle 3 : il s'agit de proposer une évaluation a priori de la solution donnée par la boucle 1 par une anticipation des problèmes éventuels pouvant survenir sur la base de prévisions dont dispose la cellule de crise. Ce mode de pilotage anticipatif s'inscrit en complément du mode de pilotage réactif proposé par le niveau 2.

La figure I.12 propose de placer les trois boucles de pilotage précédemment décrites dans le cadre de travail.

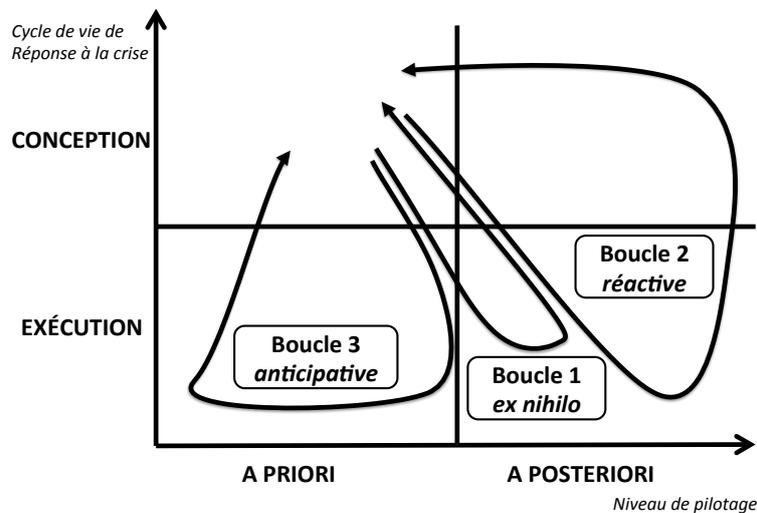


FIGURE I.12 – Les différentes boucles de pilotage de la réponse dans notre cadre de travail

I.3.3.4 Contributions

Les différentes projections, d'une part, du projet MISE et, d'autre part, des boucles de pilotage de la réponse à une situation de crise font émerger les constats suivants :

1. La construction d'une réponse couvrante et exhaustive face à une situation de

- crise apparaît comme un enjeu essentiel pour les différentes boucles de pilotage. En effet, sur la figure I.12, on constate que les trois flèches représentatives des trois boucles de pilotage partent toutes du même cadran (conception / a priori).
2. La démarche MISE ne propose pas à l'heure actuelle de solution dans l'exécution a priori d'une réponse à une situation de crise. Cela se traduit par un manque de visibilité pour le décideur qui ne dispose pas d'une vision anticipée de la situation.
 3. La deuxième itération de la démarche MISE liée au pilotage réactif d'une situation collaborative n'a pas bénéficié d'un cas d'application complet pour éprouver les mécanismes.

Face à ces constats, les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'articulent alors autour des trois contributions suivantes (chacune d'entre elles faisant l'objet d'un chapitre dédié) :

- **Chapitre II** : la structuration en couches d'ontologies pour une application à la crise routière. Il s'agit de définir la structure en couche d'une ontologie pour supporter la prise de décision dans un contexte de crise routière.
- **Chapitre III** : la mise en place d'un Système d'Information de Médiation aidant au pilotage réactif de la réponse à une situation de crise routière.
- **Chapitre IV** : la définition de la projection d'une situation de crise routière pour le pilotage anticipatif de sa réponse.

La figure I.13 propose de placer ces trois contributions dans le cadre précédemment défini.

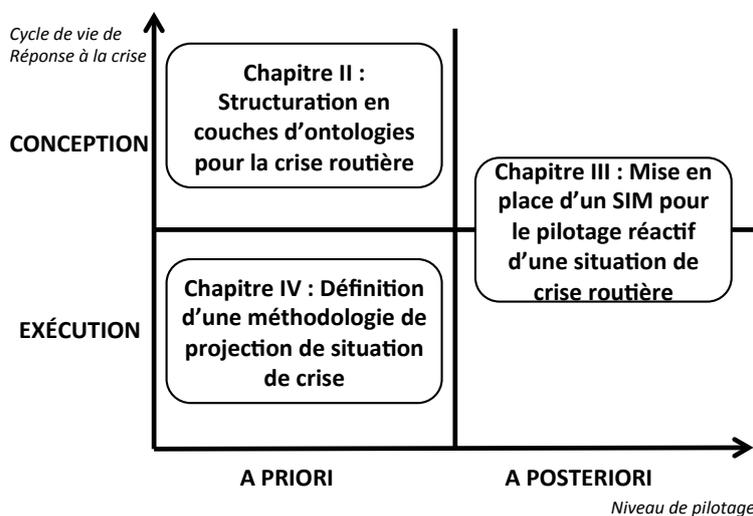


FIGURE I.13 – Positionnement des contributions de la thèse dans notre cadre de travail

Chapitre II

Vers une ontologie de crise routière

Lors d'une situation de crise routière, l'objectif principal de la cellule de crise est d'apporter une réponse à la situation rencontrée et à son évolution. Pour que cette réponse soit efficace¹, efficiente² et pertinente³, la cellule de crise doit pouvoir disposer d'une représentation abstraite de la situation, la plus proche possible de la réalité constatée sur le terrain. Ce premier enjeu de caractérisation de la situation de crise impose alors trois prérequis :

1. La cellule de crise doit disposer d'un « réceptacle » conceptuel suffisamment couvrant pour formaliser la connaissance inhérente à la situation rencontrée.
2. Le recueil de cette connaissance doit être réalisé facilement par les membres de la cellule de crise en automatisant au maximum la collecte.
3. Lorsque la situation est caractérisée, la connaissance recueillie doit pouvoir être exploitée et traitée afin d'apporter une aide aux décideurs.

Ce chapitre s'organise ainsi autour des sections suivantes :

- La première partie propose un état de l'art sur la capitalisation de la connaissance et s'intéresse plus particulièrement aux ontologies.
- La seconde partie présente une contribution collective avec le développement d'une ontologie de collaboration.
- La troisième partie s'attache à développer une ontologie d'application pour les crises routières.
- La quatrième partie propose une illustration de ces contributions par le développement d'un cas d'école.

1. Une réponse est considérée efficace si elle arrive à atteindre les objectifs qu'elle s'est fixés.

2. Une réponse est considérée comme efficiente si elle arrive à l'obtention des résultats de la réponse en consommant le moins de ressources possible.

3. Une réponse est considérée pertinente si les ressources mises en œuvre pour arriver aux résultats sont cohérents avec les objectifs de la réponse.

II.1 État de l’art sur les ontologies

Cette première section propose dans un premier temps de faire un état de l’art portant sur les connaissances et les différentes manières qui existent pour les représenter informatiquement avec une attention plus particulière pour les ontologies. Dans un second temps, un état de l’art est dressé sur les ontologies liées aux crises rencontrées dans la littérature.

II.1.1 De la nécessité d’un réceptacle de connaissance

II.1.1.1 Distinction entre donnée, information et connaissance

Avec la numérisation croissante du monde physique, les décideurs sont amenés à traiter un nombre considérable de données et sont parfois submergés par celles-ci. Un des principaux enjeux des systèmes d’information réside ainsi dans leur capacité à pouvoir les *traiter*, les *contextualiser*, et les *rendre exploitables* pour les décideurs. Ce constat nous amène à faire une distinction entre *donnée*, *information* et *connaissance* [Nonaka, 1994].

La donnée Elle est le résultat d’une mesure, c’est un fait, une observation, un élément brut [Blumentritt et Johnston, 1999]. Les données sont des éléments qui n’ont que très peu de signification s’ils ne sont pas traités. Par exemple, *50 km/h* est une donnée transmise par un appareil à même de mesurer une vitesse. Cependant, fournie en tant que telle on ne sait pas à quoi elle correspond. S’agit-il d’une limitation de vitesse, de la vitesse moyenne d’un véhicule, ou de la vitesse du vent ? Il manque donc un contexte à cette donnée pour être intelligible pour un être humain. Par ailleurs, le capteur qui mesure la vitesse et l’outil qui l’affiche et l’exploite ne sont pas, non plus, à même de savoir qu’il s’agit d’une vitesse.

L’information Elle correspond au stade suivant dans l’évolution cognitive. Il s’agit d’une donnée qui a été interprétée. Elle est dorénavant porteuse de sens. Elle doit son état d’information à la contextualisation de la donnée [Blumentritt et Johnston, 1999]. De manière générale, les informations permettent de répondre aux questions « Qui ? Quoi ? Quand ? Où ? » Ainsi, si la vitesse de 50 km/h est une donnée fournie par le compteur kilométrique d’un cycliste alors elle passe à l’état d’information en tant que « vitesse instantanée du cycliste = 50 km/h ». L’information, bien qu’utile dans la prise de décision à « petite échelle » (décisions opérationnelles), n’est pas suffisante pour les horizons de décision stratégique et tactique. Une expertise est alors nécessaire pour assurer son passage à l’état de connaissance.

La connaissance Elle naît donc de la compréhension, de l’agrégation et de l’assimilation des diverses informations par les individus. Il s’agit donc de réfléchir à leur articulation en y ajoutant une ou plusieurs expertises pour aboutir à la genèse d’un élément de connaissance. Finalement, cette assimilation de l’information sous forme de

connaissance doit conduire à son exploitation pour notamment générer une action de décision. L'exploitation de l'information, génératrice de connaissance apparaît donc comme un élément important pour supporter l'aide à la décision.

Toutefois, le processus de passage de l'information à la connaissance amène une part de subjectivité dans l'exploitation de l'information. Aussi, la création de connaissance est définie dans [Nonaka, 1991] comme « un processus humain dynamique de justification de croyances personnelles tendant vers la vérité ». Il convient donc de distinguer la connaissance *explicite* de la connaissance *tacite* [Polanyi, 1967]. Si la première peut être formalisée dans un langage et donc partageable (sous la forme de modèles, formules ou encore schémas), la seconde prend en compte des éléments cognitifs qui ne sont pas facilement codifiables. Si l'on reprend l'exemple du cycliste roulant à une vitesse de 50 km/h et que cette information est croisée avec le fait que le cycliste circule dans une descente sinueuse d'un col alors l'information « vitesse instantanée du cycliste = 50 km/h » devient la connaissance « vitesse instantanée du cycliste de 50 km/h trop rapide et risque de chute, ralentir ». La figure II.1 propose d'illustrer le mécanisme de transformation du savoir, de la donnée à la connaissance.

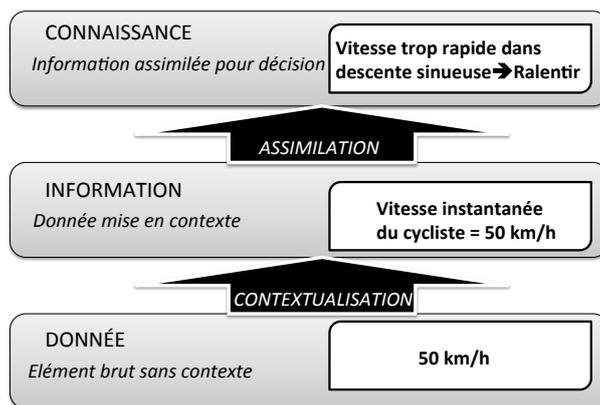


FIGURE II.1 – Le passage de la donnée à la connaissance d'après [Blumentritt et Johnston, 1999]

II.1.1.2 La représentation des connaissances

Les concepts de donnée, information et connaissance ayant été définis, il nous faut à présent nous interroger sur la manière de les recueillir et de les formaliser. Notre objectif étant de proposer une aide à la décision, nous ne nous focaliserons donc que sur les connaissances, élément de savoir le plus pertinent pour la prise de décision. Un des enjeux principaux réside alors dans la recherche d'une manière judicieuse de représentation de connaissances afin d'en faciliter l'exploitation.

La représentation des connaissances se trouve à l'intersection entre le domaine à représenter (monde réel) et le domaine représenté (modèle du monde réel). Selon [Brachman et Levesque, 2004], elle est « la discipline s'intéressant à la manière de représenter

symboliquement les connaissances pour en faciliter leur manipulation et leur réutilisation par des systèmes informatiques ». Ceci trouve alors un écho particulier dans le domaine de la gestion des connaissances (Knowledge Management) définie comme « la façon dont les organisations rassemblent, gèrent et utilisent la connaissance » [Zorn et Taylor, 2004]. Parmi les outils et technologies de la connaissance, on retrouve [Belser, 2008] :

- *L'ingénierie des connaissances* qui traite de la conception de systèmes d'information pour la résolution de problèmes en se basant sur les travaux de l'Intelligence Artificielle (IA).
- *L'ingénierie basée sur la connaissance* qui vient en support du travail de conception de l'ingénieur en offrant des solutions de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).
- *L'ingénierie ontologique* qui se trouve à la croisée de l'ingénierie des connaissances, de la philosophie et de l'informatique et qui permet la construction de structures de connaissances pour assurer l'interopérabilité de systèmes informatiques hétérogènes.

Le tableau II.1 [Belser, 2008], [Milton, 2008] propose une synthèse des usages et objectifs des technologies de la connaissance.

Usage	Technologie	Objectifs
Capitaliser et partager l'expertise d'une organisation	Portail Internet de Connaissances	Améliorer l'efficacité en apportant aux non-experts l'expertise nécessaire pour mieux réaliser une tâche
Automatiser des tâches normalement réalisées par des experts	Systèmes à Bases de Connaissances	Réduire le coût et le temps des processus métiers et permettre aux experts d'être plus efficaces
Assurer l'interopérabilité de Systèmes d'Information hétérogènes	Ontologies, Technologies sémantiques	Réduire les inefficacités engendrées par plusieurs bases de données et systèmes hétérogènes
Capitaliser et stocker la connaissance pour des besoins futurs	Portail Internet des Connaissances	Stopper la perte des connaissances quand les experts quittent l'organisation et mieux prendre en compte les leçons apprises
Donner des moyens d'accès intelligent à l'information stockée dans les bases de données et le web	Ontologies, Technologies sémantiques	Apporter une utilisation efficace des technologies de l'information et des ressources web en filtrant et en présentant l'information de manière spécifique pour chaque utilisateur

TABLE II.1 – Différentes technologies de l'information en fonction de leurs usages et objectifs d'après [Belser, 2008]

II.1.1.3 Vers un choix

Les besoins soulevés par la caractérisation d'une crise routière sont (1) de fournir un vocabulaire suffisamment couvrant pour formaliser la connaissance (2) d'intégrer des données et des informations issues d'acteurs et de systèmes hétérogènes, (3) d'effectuer des raisonnements pour aider la cellule de crise dans ses prises de décision. Si l'on replace ces enjeux par rapport aux différentes technologies de l'information présentées dans le

tableau II.1, les ontologies apparaissent comme l'option la plus convaincante. En effet, elles permettent de formaliser un domaine particulier de manière explicite, formelle et partagée. De plus, il est possible de mener des raisonnements d'inférence sur les ontologies permettant ainsi leur enrichissement. La partie suivante présente un état de l'art sur les ontologies.

II.1.2 Les ontologies

II.1.2.1 Définition des ontologies

Les ontologies constituent une théorie de la connaissance permettant de formaliser et de synthétiser des connaissances issues d'un domaine particulier [Chandrasekaran *et al.*, 1999] [Gruber, 1993]. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines afin de faciliter l'échange d'information et leur traitement a posteriori. Au début des années 1990, les travaux de [Neches *et al.*, 1991] présentent les ontologies comme « la définition des termes basiques et de leurs relations composant le vocabulaire d'un domaine particulier ». Par la suite, [Gruber, 1993] la définit comme « la spécification explicite d'une conceptualisation ». C'est un mode de représentation de connaissances utile tant pour la définition d'un vocabulaire de référence que pour la création de connaissances. [Jean *et al.*, 2007] définit l'ontologie comme une « représentation formelle, référençable et consensuelle de l'ensemble des concepts partagés d'un domaine sous forme de classes, de propriétés et de relations qui les lient ». Cette définition souligne qu'une ontologie est une représentation qui permet des raisonnements automatiques (*formelle*), qui est admise par l'ensemble d'une communauté (*consensuelle*) et utilisable à partir de tout type d'application ou contexte (*référençable*).

Nous déduisons donc de cette définition les avantages suivants dans l'utilisation des ontologies [Charlet, 2003] :

- *La définition d'un vocabulaire.* Les ontologies permettent la modélisation d'un domaine en définissant un vocabulaire spécifique (termes et relations entre termes) ainsi que des règles permettant d'étendre ce vocabulaire en combinant les différents termes.
- *La réutilisation.* Il s'agit de créer et de conserver des bases de connaissances réutilisables pour faciliter la création de nouvelles bases de connaissances à partir d'autres ontologies.
- *Le partage de la connaissance.* L'utilisation d'ontologies apporte une première réponse à la problématique d'interopérabilité entre les systèmes. Elle permet l'échange de connaissances entre systèmes hétérogènes par une vision consensuelle d'un domaine.

De par leur définition, les ontologies répondent aux besoins de *formalisation*, *recueil* et *exploitation* de la connaissance que nous cherchons à remplir pour caractériser une situation de crise routière. Nous allons maintenant nous intéresser à leur structuration.

II.1.2.2 Structuration des ontologies

La connaissance dans les ontologies est formalisée à partir des éléments suivants [Gómez-Pérez, 1999] :

- *Les concepts ou classes.* Ce sont des représentations d'objets et de leurs propriétés. Ils sont désignés par un *terme*, associés à une *notion* (sémantique) et renvoient à un *ensemble d'objets* définis par le concept. Par exemple, le terme « *cycliste professionnel* » renvoie à un sportif professionnel pratiquant le cyclisme ainsi qu'à l'ensemble des objets ayant cette description. De la bonne définition et désignation d'un concept dépend ainsi la reconnaissance par la machine de ce dernier (et notamment l'absence d'ambiguïté). De ce fait, un concept peut être identifié par plusieurs termes pour gérer la synonymie.
- *Les relations.* Il s'agit de la traduction des associations entre les concepts. On trouve les associations classiques suivantes : généralisation, agrégation, association... Les relations permettent d'assurer la structuration de l'ontologie en reliant les concepts les uns par rapport aux autres. Par ailleurs, ces relations peuvent être d'ordre sémantique comme les liens « proche de » (*near by*) ou « identique à » (*same as*). Par exemple, le concept de *Vélo* est identique à celui de *Bicyclette* et le concept *Sprinteur* est proche de celui de *Poisson-Pilote*.⁴
- *Les axiomes.* Ce sont des assertions considérées comme vraies dans l'ensemble de l'ontologie. Ils ont pour but de définir la signification des composants, définir les restrictions existantes sur les valeurs des attributs ou encore de définir les arguments d'une relation. Par exemple, l'expression « tout *VTTiste a pour vélo un VTT* » peut constituer un axiome de la base de connaissances.
- *Les instances.* Ce sont les individus qui peuplent l'ontologie. Ces objets correspondent au niveau le plus basique de l'ontologie et sont l'instanciation des concepts définis précédemment. Par exemple, l'individu « *Alberto Contador* » est une instance du concept « *Cycliste Professionnel* ».

II.1.2.3 Exploitation des ontologies

La représentation de connaissances grâce à une ontologie s'accompagne de mécanismes de raisonnement. Il s'agit de manipuler les instances déjà présentes dans l'ontologie afin d'en créer de nouvelles ou de nouvelles relations. Le but étant de produire de la connaissance à partir de connaissances déjà existantes dans l'ontologie.

Les travaux de thèse de [Bahloul, 2006] recensent les raisonnements suivants qui peuvent être menés sur les bases ontologiques :

- *Le raisonnement logique.* Il s'agit d'utiliser des mécanismes amenant à la déduction de nouveaux faits à partir de faits existants et connus. Le raisonnement logique permet de réaliser de l'inférence dans la base de connaissances grâce aux raisonnements de *modus ponens* et de *modus tollens*. Le raisonnement de *modus*

4. Le poisson-pilote est dans le vocabulaire du cyclisme le coureur qui permet d'amener le sprinteur dans un sprint massif jusque dans les derniers hectomètres. Il doit donc avoir une bonne pointe de vitesse.

ponens se déroule en deux temps. À partir d'une règle d'implication énoncée sous la forme SI-ALORS (« si P alors Q ») on établit l'existence de l'antécédent (« P ») pour en déduire le conséquent (« Q »). Le raisonnement de *modus tollens* (contraposition) est appliqué en partant de la négation d'un conséquent (« non-Q ») pour établir la négation de l'antécédent (« Non-P »). L'implication résultante est alors de la forme « si Non-Q alors non-P ». La logique permet une formalisation sans ambiguïté des règles de raisonnement à partir d'une description claire et riche du monde donnée par les connecteurs logiques et les quantificateurs. Pour illustrer notre propos, prenons la proposition « *les cyclistes professionnels possèdent des licences sportives* » et considérons le fait que « *Alberto Contador est un cycliste professionnel* », un raisonnement de type *modus ponens* nous amène à déduire « *Alberto Contador possède une licence sportive* ». Si au contraire, on considère le fait que « *Ibrahim Maalouf ne possède pas de licence sportive* », alors un raisonnement de type *modus tollens* nous amène à conclure que « *Ibrahim Maalouf n'est pas cycliste professionnel* ».

- *Le raisonnement par classification.* Il s'agit de confronter une nouvelle connaissance avec des connaissances déjà existantes dans la base pour en déduire des nouvelles propriétés. Cette méthode [Napoli, 1992], basée sur les expériences vécues, classe la nouvelle connaissance par similarité avec des connaissances de la base. Dès que la nouvelle connaissance a trouvé sa place dans la hiérarchie, on en déduit par analogie de nouvelles propriétés. Par exemple, si l'on considère les paramètres physiologiques (poids, mensurations, fréquence cardiaque maximale...) d'un nouveau coureur cycliste au sein d'une équipe professionnelle et que l'on confronte ces connaissances avec les paramètres physiologiques de coureurs déjà existants dans la base de connaissance, alors, par analogie, il va être possible de déduire le profil du nouveau coureur (sprinteur, grimpeur, rouleur, puncheur...).
- *L'héritage.* Cela consiste en la récupération d'informations d'un concept général pour l'utiliser dans le cadre de concepts plus spécialisés. Il s'agit de la représentation de l'inclusion ensembliste, c'est-à-dire que toute spécialisation d'un concept récupère les informations et les attributs du concept parent. Par exemple, si l'on considère le concept de *Vélo de Contre-La-Montre* comme une spécialisation de celui de *Vélo*, alors par héritage, *Vélo de Contre-La-Montre* recevra les mêmes attributs que *Vélo* (nombre de roues, guidon, cadre, selle...).

Intéressons-nous plus particulièrement au raisonnement logique. Les règles permettent de tirer des *conclusions* (les termes de *conséquences* ou *actions* sont également employés) à partir de la vérification d'une ou plusieurs *condition(s)* (appelée(s) *prémisse(s)* ou *antécédent(s)*). Les travaux de [Chniti, 2013] proposent la taxonomie suivante des règles :

- *Les règles logiques.* Elles permettent d'inférer de nouvelles connaissances dès lors que les conditions de la règle sont vérifiées.
- *Les règles de production.* Elles permettent l'exécution d'une opération si les prémisses de la règle sont vérifiées. Lorsqu'elle est exécutée, la règle vient modifier l'ensemble des connaissances déjà inscrites dans la base.
- *Les règles probabilistes.* Elles amènent une part d'incertitude dans l'expression

des conditions de la règle logique par la présence d'une *probabilité* (appelée aussi *facteur de certitude*) portant sur les prémisses. Les conclusions ainsi déduites sont donc incertaines.

- *Les règles floues*. Elles permettent la représentation d'ensembles flous par l'utilisation de termes pouvant être interprétés différemment selon le contexte.

II.1.2.4 Les types d'ontologie

Les ontologies sont classées en plusieurs niveaux en fonction de l'utilité recherchée. Ces différents types d'ontologie sont rappelés dans [Gómez-Pérez *et al.*, 2004] :

- *Ontologie de représentation*. Il s'agit de la représentation des primitives nécessaires à la formalisation de connaissances. C'est le cas par exemple de Ontolingua [Farquhar *et al.*, 1997] qui comprend les éléments de représentation des langages (classes, instances, propriétés, relations...).
- *Ontologie de haut niveau*. C'est une ontologie organisée autour de concepts généraux qui doivent s'appliquer, quelque soit le domaine étudié. Ces ontologies ne sont pas instanciables en tant que telles, mais doivent être étendues pour relever d'un domaine particulier. Parmi les ontologies de haut niveau nous pouvons citer SUMO (Suggested Upper Merged Ontology) [Niles et Pease, 2001] ou DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering) [Gangemi *et al.*, 2002].
- *Ontologie de domaine*. Il s'agit de conceptualiser les objets d'un domaine d'étude particulier (santé, biologie, crise...). Elles définissent le vocabulaire (termes et relations) d'un domaine générique. L'ontologie SNOMED (Systematized Nomenclature of MEDicine) [Stearns *et al.*, 2001] est un exemple d'ontologie dans le domaine clinique.
- *Ontologie de tâches*. Au même niveau que les ontologies de domaine, il s'agit de décrire les tâches ou activités génériques liées au domaine en spécialisant les concepts d'une ontologie de haut niveau [Guarino, 1998]. On retrouve aussi dans la littérature le terme « ontologie du domaine de la tâche » [Hernandez, 2005].
- *Ontologie d'application* : elle fait référence à une application particulière. Il s'agit d'une ontologie plus spécifique. Elle contient tous les éléments de modélisation requis pour le fonctionnement d'une application.

La figure II.2 présente l'héritage qu'il existe entre ces différents niveaux.

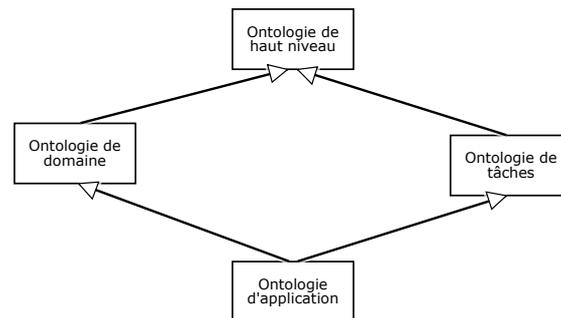


FIGURE II.2 – Les différents types d'ontologie d'après [Guarino, 1998]

II.1.2.5 Les formats d'ontologies

Il existe plusieurs formats d'ontologies, chacun ayant ses spécificités avec plus ou moins d'information contenue dans les concepts et les relations :

- *Resource Description Framework (RDF)* est à la base un langage utilisé pour représenter les informations inhérentes aux ressources [Manola et Miller, 2004]. Le W3C l'a retenu comme base du Web sémantique et il s'exprime la plupart du temps sous la forme de fichiers XML. Chaque fichier RDF est composé d'un ensemble de triplets (*sujet, prédicat, objet*), le sujet représentant la ressource à décrire, le prédicat étant un type de propriété applicable à cette ressource et l'objet étant la valeur de la propriété.
- *Ontology Inference Layer (OIL)* [Fensel et al., 2001] est un langage de représentation et d'échange pour les ontologies basées sur les standards RDF et XML. L'ontologie y est décrite en trois couches : la couche objet (instances de l'ontologie), la couche de premier méta niveau (structure de l'ontologie) et la couche de second méta niveau (caractéristiques de l'ontologie).
- *DARPA Agent Markup Language - Ontology Inference Layer (DAML-OIL)* [Horrocks et al., 2002] permet de formaliser les ontologies. Il s'agit d'une combinaison du langage DAML (Darpa Agent Markup Language) et de OIL (Ontology Inference Layer). C'est une extension de RDF et il utilise la syntaxe XML. On trouve à l'origine de DAML+OIL un groupe de travail du W3C en 2001.
- *Ontology Web Language (OWL)* [McGuinness et al., 2004] est un langage basé sur RDF-S et dérivé de DAML+OIL. Il se présente sous la forme de fichier XML (extension .owl). Par rapport aux langages précédents, OWL ajoute les notions de cardinalité, équivalence, inverse, restriction, version et intersection. OWL se décline en trois sous-langages :
 - *OWL-Lite* permet les raisonnements les plus rapides, mais est celui qui est le moins expressif. Il interdit notamment la notion d'union et interdit des cardinalités supérieures à 1.

- *OWL-DL* est plus expressif qu'*OWL-Lite* tout en restant décidable⁵.
- *OWL-Full* est le moins restrictif des langages OWL. Il permet l'utilisation de toutes les propriétés OWL, mais son utilisation reste limitée, car il n'existe pas de raisonneur qui en supporte la totalité des fonctionnalités.

II.1.2.6 Cycle de vie des ontologies

En tant que composants logiciels à part entière, les ontologies doivent faire l'objet de développements informatiques. Par conséquent leur cycle de vie suit les mêmes méthodologies que celles appliquées dans le génie logiciel. Toutefois, et par essence, les ontologies sont amenées à être partagées ce qui implique la participation de différents acteurs dans leur construction. [Mendes, 2003] recense plus de trente méthodes pour la création d'ontologies, mais identifiées selon quatre grandes approches :

- Construction d'ontologies à partir de zéro ;
- Fusion d'ontologies ;
- Réingénierie d'ontologies ;
- Construction collaborative d'ontologies.

Dans le cadre spécifique de nos travaux (construction d'une ontologie dédiée à la gestion des crises routières), il apparaît indéniable que l'ontologie recherchée va être construite à partir de zéro⁶. Parmi les méthodes de construction d'ontologies à partir de zéro ou « from scratch », nous avons ainsi pu recenser les méthodes remarquables suivantes :

- *METHONTOLOGY* [Fernández-López *et al.*, 1997] est une méthode développée par l'équipe du LIA (Laboratorio de Inteligencia Artificial) de Madrid prenant en charge le cycle de vie l'ontologie par une construction en dix étapes : glossaire des termes, taxinomie des concepts, diagramme des relations binaires, définition des attributs des concepts, description des relations, description des attributs d'instances, description des attributs de classes, description des constantes, description des axiomes formels et description des contraintes sur les valeurs d'attributs.
- *ARCHONTE* [Bachimont *et al.*, 2002] est une méthode de construction d'ontologie ascendante (« bottom up ») développée par l'INA (Institut National de l'Audiovisuel). Elle se fait à partir de textes en trois étapes : choix des termes pertinents du domaine et définition des liens de similarité / différence, formalisation des connaissances par ajout des propriétés et définition des domaines de valeurs, opérationnalisation de l'ontologie dans un langage de représentation.
- *ENTREPRISE* [Uschold, 1996] est un méthode de construction d'ontologies semblables aux méthodes de conception issue du génie logiciel. Elle se réalise en quatre étapes :

1. Définition du périmètre et de l'objectif de l'ontologie (pourquoi construire une

5. Un problème est décidable s'il existe un mécanisme pour en trouver une solution en un nombre fini d'étapes.

6. Dans le sens où il n'existe pas d'ontologies formalisées, mais des sources de connaissances établies (bases de données, rapports, normes...)

- ontologie ? Quels sont les utilisateurs de l'ontologie ?)
2. Construction de l'ontologie (identification de concepts et de relations, organisation des concepts et formalisation du modèle)
 3. Évaluation de l'ontologie en utilisant les critères définis dans [Gómez-Pérez *et al.*, 1995]
 4. Documentation de l'ontologie.

II.1.2.7 Vers un choix

Les ontologies constituent une bonne méthode de capitalisation et de formalisation de la connaissance. L'intérêt reste dans la possibilité de réutiliser et de partager des connaissances admises par l'ensemble d'une communauté. Leur structuration permet d'y appliquer des raisonnements logiques pour déduire de nouvelles connaissances. Par ailleurs, les différents formats présentés nous amènent à choisir OWL-DL pour formaliser notre ontologie, car il est le plus expressif. En effet, il fournit le plus grand nombre d'éléments nécessaires à la modélisation (cardinalité, équivalence, inverse...) ce qui en fait un langage idéal tout en garantissant la décidabilité des problèmes considérés.

En outre, notre choix de construction de l'ontologie s'est portée sur la méthode ENTERPRISE, car, même si elle est identifiée comme une méthode partant de zéro, elle propose la réutilisation de connaissances d'ontologies déjà existantes dont le domaine est proche du domaine étudié. Or, même si le caractère spécifique de la gestion de crise routière en France est indéniable, il n'en reste pas moins une spécialisation de la gestion de crise « en général » domaine dans lequel l'ingénierie ontologique se trouve bien implantée comme le montre la section II.1.4. Pour appliquer la démarche prescrite dans ENTERPRISE nous allons donc chercher :

- Une ontologie de haut niveau.
- Une ontologie de domaine de crise.

II.1.3 Présentation d'ontologies de haut niveau

Les ontologies de haut niveau sont des ontologies génériques comportant des concepts abstraits et dont le but est de servir de support aux ontologies de domaine. L'enjeu principal associé à leur définition et à leur conception est de pouvoir être réutilisées par la suite. Elles sont donc indépendantes d'un domaine ou d'un problème en particulier. Il existe dans la littérature de nombreuses ontologies de haut niveau (appelées également en anglais « Upper Level Ontology ») comme en témoignent les états de l'art réalisés sur le sujet [Noy et Hafner, 1997], [Noy, 2004], [Mascardi *et al.*, 2007]. Nous retenons ci-après les cinq principales qui sont le plus réutilisées.

II.1.3.1 GFO

L'ontologie GFO (General Formal Ontology) [Herre *et al.*, 2006] est une ontologie de haut niveau développée par le groupe de recherche Onto-Med⁷. Bien qu'elle serve

7. <http://www.onto-med.de/>

essentiellement de support à l'élaboration d'ontologies dans le domaine médical, GFO se veut une ontologie généraliste dont l'universalité des concepts décrits peut servir de support au développement d'ontologies dans d'autres domaines (économie ou sociologie) [Herre, 2010].

Dans l'ontologie GFO, tous les concepts héritent de *Entity* et sont tout d'abord distingués en *Set* et *Item* en fonction du caractère unitaire du concept auquel il est fait référence. Les *Items* sont ensuite divisés en deux catégories : les *Categories* (entités au caractère universel) et les *Individuals* (entités définies dans l'espace et le temps). Les *Individuals* sont alors naturellement divisés en deux catégories : *Abstract* et *Concrete* selon leur existence physique. Au sein des entités *Concrete*, une distinction est faite entre les *Occurrent* et les *Presential* (fonction de leur dépendance au temps) d'une part, et les *Property* et *Relator* (fonction de leur dépendance à d'autres concepts). D'autre part, la figure II.3 montre le métamodèle de l'ontologie GFO.

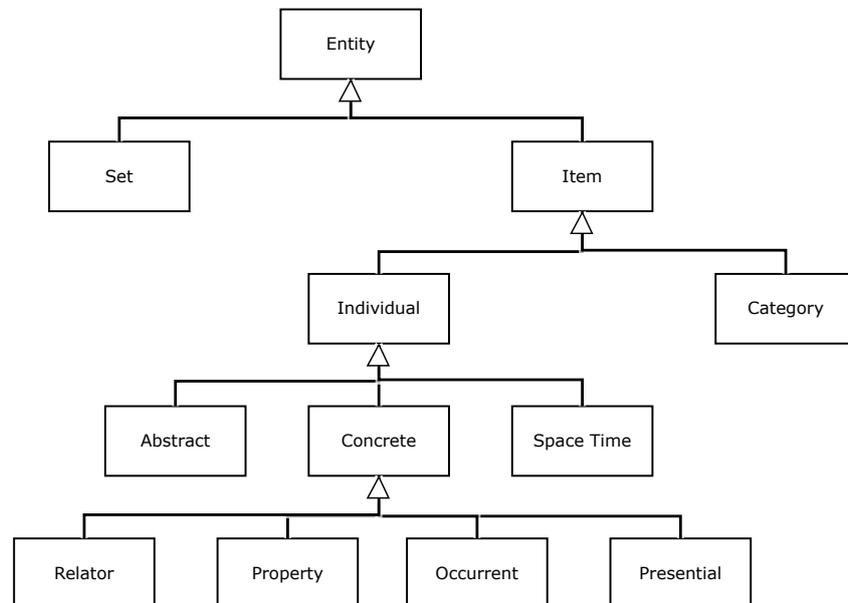


FIGURE II.3 – Structure du métamodèle de GFO

II.1.3.2 SUMO

L'ontologie SUMO (Suggested Upper Merged Ontology) [Niles et Pease, 2001] est une ontologie de haut niveau développée au début des années 2000 par le « Standard Upper Ontology Working Group » composé de chercheurs d'horizons différents tels que l'ingénierie, la philosophie ou l'informatique. Elle propose une série de termes généraux destinés à être étendus pour des domaines plus spécifiques.

Chaque concept hérite du concept *Entity*. Une première distinction est faite entre les concepts *Physical* (qui ont une location dans l'espace et dans le temps) et les concepts

Abstract (qui n'en ont pas). Parmi les concepts physiques, une distinction est faite entre les *Object* (Entités qui ont une localité spatiale) et les *Process* (Entités qui ont une localité temporelle). Les entités abstraites sont quant à elles divisées en quatre familles : *Set Class*, *Proposition*, *Quantity* et *Attribute*.

La figure II.4 reprend le métamodèle de l'ontologie SUMO.

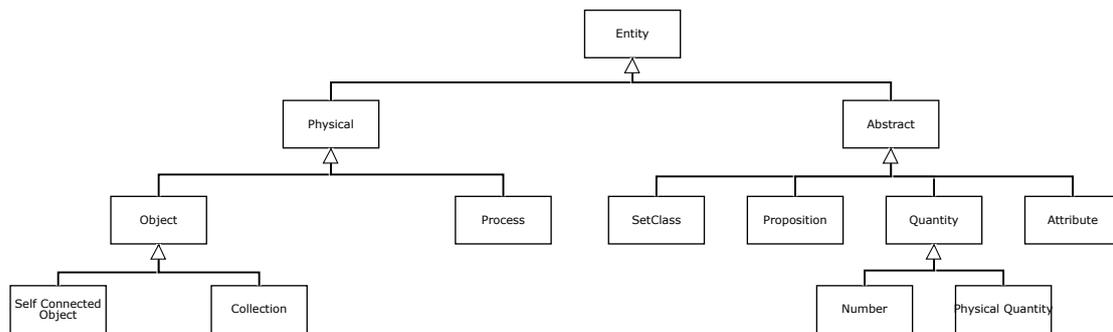


FIGURE II.4 – Structure du métamodèle de SUMO

SUMO sert d'ontologie haut niveau pour de nombreuses ontologies dans de nombreux domaines : militaire [Andersen et Peterson, 2001], biomédical [Burhans *et al.*, 2003], financier [Chen *et al.*, 2003], gestion de la propriété intellectuelle [Delgado *et al.*, 2002].

II.1.3.3 BFO

Le projet BFO (Basic Formal Ontology) a débuté en 2002 et est toujours maintenu à ce jour [Stenzhorn, 2014]. Cette ontologie a pour but d'être utilisée en tant que support à des ontologies de domaine. La figure II.5 donne la structure du métamodèle BFO. Tous les concepts de l'ontologie héritent du concept *Entity*. La spécialisation des concepts se fait autour des trois dichotomies suivantes :

- *Continuant vs Occurrent*. Les entités continues sont insensibles à la notion de temps et restent immuables au cours de leur existence contrairement aux entités ponctuelles qui sont temporelles et n'existent que pour une durée ou date donnée. Par exemple le concept de *Tour de France* (en tant qu'institution) est un concept qui hérite de *Continuant* tandis que celui de *Chute* hérite de *Occurrent*.
- *Dependant vs Independant*. Cette distinction n'a de sens que pour les concepts héritant de *Continuant*. La notion d'indépendance fait référence à un concept qui peut exister par lui-même tandis que celle de dépendance indique que l'objet ne peut exister que par sa relation avec d'autres objets du monde. Par exemple, la notion de cycliste est un concept indépendant tandis que celle de victoire n'a de sens que si elle est rattachée à une personne.
- *Type vs Instance*. Il s'agit d'une distinction traditionnelle entre le concept (*Type*) et l'objet représenté par ce concept (*Instance*). Par exemple, *Cycliste* correspond au *Type* et *Raymond Poulidor* à l'*Instance* de ce type.

L'ontologie BFO est très utilisée pour la spécification d'ontologies dans le domaine médical. On peut citer à titre d'exemple l'Alzheimer Disease Ontology [Malhotra *et al.*, 2014], l'ontologie OncoCL (cellules cancéreuses) [Rasmussen et Dolan, 2013], ou encore Blood Ontology (domaine de l'hématologie) [Almeida *et al.*, 2011].

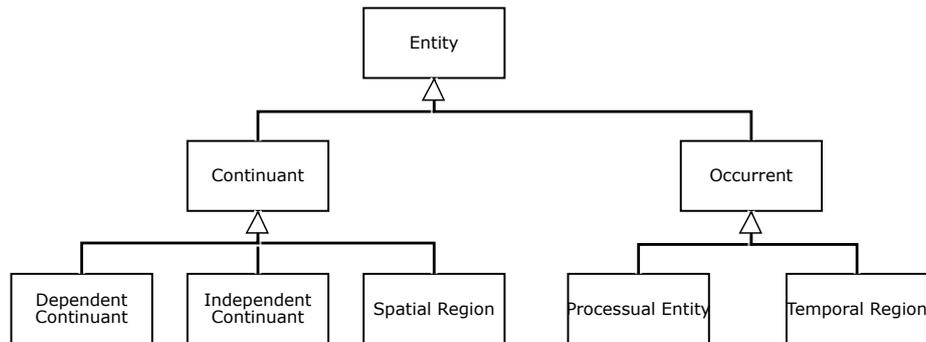


FIGURE II.5 – Structure du métamodèle de BFO

II.1.3.4 Knowledge Representation Ontology ou Sowa

L'ontologie « Knowledge Representation » [Sowa, 1999] est une ontologie de haut niveau à visée universelle. Elle est le fruit de réflexions philosophiques. Tous les concepts héritent de *Entity* et sont classifiés selon les trois distinctions suivantes :

- *Physical* vs *Abstract* : il s'agit de distinguer les entités physiques (c'est à dire qui ont un emplacement dans l'espace et dans le temps), des entités abstraites (information « pure » totalement détachée de son support). Les concepts abstraits sont donc éternels tandis que les concepts physiques ont une durée de vie.
- *Continuant* vs *Occurrent* : on retrouve ici la même distinction que pour l'ontologie BFO. Les concepts continus font référence à des entités s'inscrivant dans le temps, qui n'en dépendent pas. A contrario, les concepts ponctuels (« *Occurrent* ») sont dépendants du temps et n'existent que pour un intervalle donné.
- *Independent* vs *Relative* vs *Mediation* cette distinction fait apparaître le degré des relations qu'il existe entre les différents concepts. Un concept indépendant peut être défini sans prendre en considération d'autre concept. Par exemple le concept de « *Cycliste* » n'est pas rattaché à un autre concept. Un concept relatif existe de par sa relation avec un autre concept. Par exemple, le concept de « *Carrière Cycliste* » dépend du concept « *Cycliste* ». Enfin la troisième catégorie concerne les concepts de médiation qui sont le résultat d'une association entre deux autres concepts. Par exemple le concept de « *Contrat de Travail* » est un concept association entre le « *Cycliste* » et son « *Équipe professionnelle* ».

À partir de ces trois catégories de concepts, on trouve à l'intersection de chaque dimension douze concepts centraux. La représentation graphique en forme de diamant (figure II.6) permet de faire apparaître des catégories intermédiaires entre ceux-ci.

	Physical		Abstract	
	Continuant	Occurrent	Continuant	Occurrent
Independent	Object	Process	Schema	Script
Relative	Juncture	Participation	Description	History
Mediating	Structure	Situation	Reason	Purpose

TABLE II.2 – Les douze catégories de concepts de KR Ontology

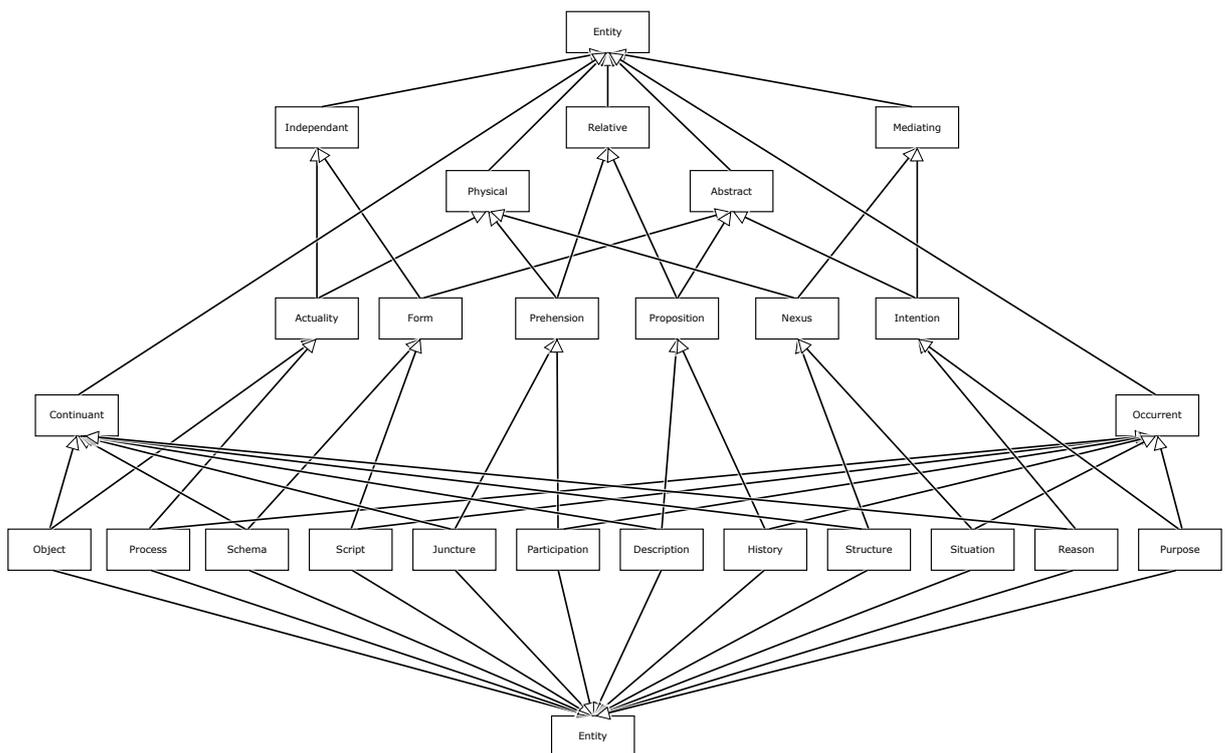


FIGURE II.6 – Structure en diamant du métamodèle de KR Ontology [Sowa, 1999]

II.1.3.5 Upper Cyc Ontology

Cyc (nom reprenant une syllabe du mot « encyclopédie ») est un projet initié en 1984 proposant le développement d’une ontologie générale dont le but est d’avoir un raisonnement qui soit le plus proche de celui d’un être humain. La base de connaissances reprend plus d’un million d’assertions censées représenter une connaissance consensuelle du monde. La base de connaissance est propriété de l’entreprise Cycorp, Inc. mais une version de la base a été rendue publique sous le nom OpenCyc.

La figure II.7 reprend la structure haut niveau du métamodèle Cyc.

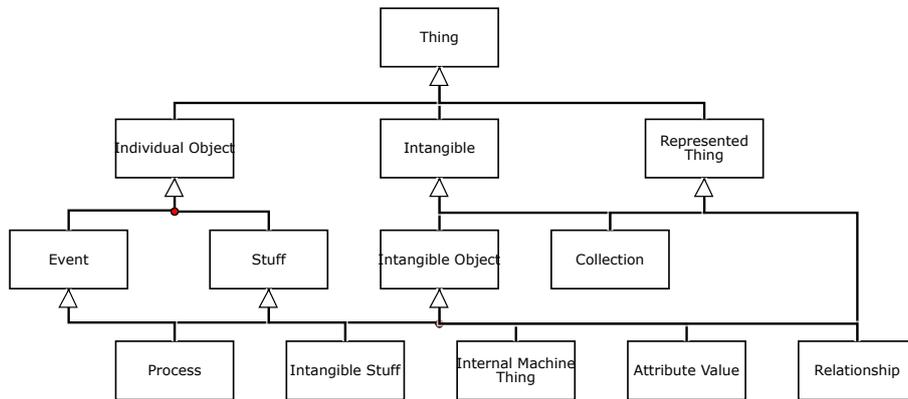


FIGURE II.7 – Structure du métamodèle de Cyc [Lenat *et al.*, 1990]

On trouve dans l'ontologie des règles représentant les connaissances présentes dans le monde. La figure II.8 propose un exemple de règle dans le langage propriétaire CycL. Elle stipule que pour tout animal il existe un animal de genre féminin qui est la mère de celui-ci.

```
(forall ?A
  (implies
    (isa ?A Animal)
    (thereExists ?M
      (and
        (mother ?A ?M)
        (isa ?M FemaleAnimal))))))
```

FIGURE II.8 – Exemple de règle dans le formalisme CycL

Il existe des mises en œuvre de Cyc dans différents domaines comme les études cliniques [D Pierce *et al.*, 2012] ou la linguistique [Coppock et Baxter, 2010].

II.1.3.6 DOLCE

DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering) [Gangemi *et al.*, 2002] est une ontologie de haut niveau développée dans le cadre de la bibliothèque d'ontologie WFOL (WonderWeb Foundational Ontologies Library). En tant que premier module de cette librairie, elle sert de référence pour les futurs modules (développés ou en cours de développement). Elle propose de diviser le monde en quatre familles de concepts principaux héritant tous de *Particular* :

- Les *Endurants* (ED) sont des concepts qui existent dans le temps. Une distinction est faite entre les *Physical Endurants* et les *Non-Physical Endurant* en fonction de leur existence spatiale ou non. Par exemple, le concept de *Bicyclette* hérite de

Physical Endurants tandis que celui de *Palmarès* hérite de *Non-Physical Endurant*.

- Les *Perdurants* (PD) correspondent à des concepts qui se produisent dans le temps. On y distingue les *Statives* (états) des *Events* (événements) en fonction de leur caractère cumulatif ou singulier. Par exemple le concept de *Blessure* hérite de *Stative* alors que celui de *Chute* hérite de *Event*.
- Les *Qualities* (Q) correspondent aux propriétés qui caractérisent les *Endurants* et les *Perdurants*. Elles sont divisées en *Temporal Qualities*, *Physical Qualities* et *Abstract Qualities* selon qu'elles qualifient respectivement les *Perdurants*, les *Physical Endurants* ou les *Non-Physical Endurants*. Par exemple, *Nombre de semaines* est une *Temporal Quality* du *Perdurant Blessure*.
- Les *Abstracts* (AB) correspondent à des concepts qui n'ont pas de qualités spatio-temporelles. Par exemple, la notion de *Marque de cadre* hérite de *Abstract*.

La figure II.9 reprend la structure du métamodèle de l'ontologie DOLCE.

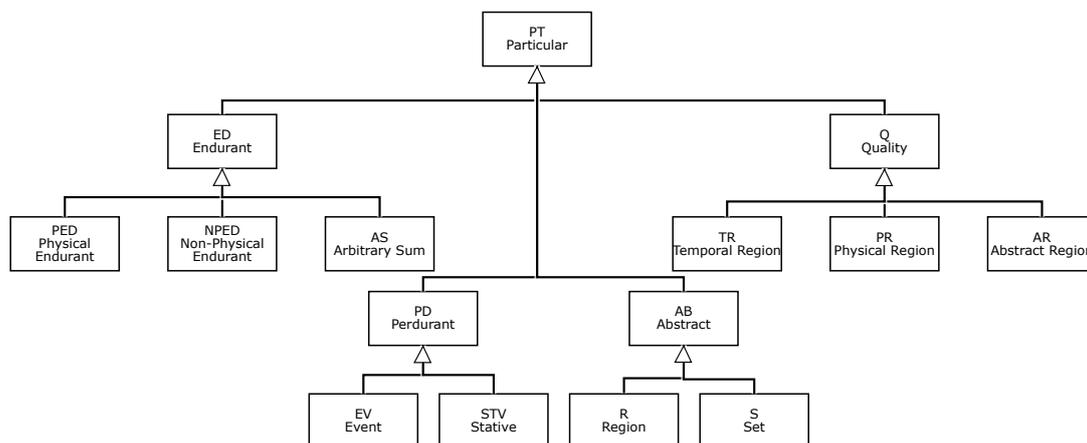


FIGURE II.9 – Structure du métamodèle DOLCE

DOLCE trouve sa place dans de nombreuses applications dans des domaines très différents : juridique (projet ICT4Law, [Francesconi *et al.*, 2010]), textile (projet AsIsKnown, [Valtinat *et al.*, 2006]), linguistique (projet LT4eL, [Monachesi *et al.*, 2006]).

II.1.3.7 Vers un choix

La table II.3 propose une synthèse des éléments développés précédemment.

Nom de l'ontologie	URL	Développeurs	Langage	Nombre de concepts	Application
BFO	www.ifomis.org/bfo	Smith, Grenon, Stenhorn, Spear	OWL	36	Médical
Cyc	www.cyc.com	Cycorp	CycL, OWL	300000	Linguistique, médical
DOLCE	www.loa-cnr.it/DOLCE.html	Guarino et al.	KIF, OWL	100	Juridique, commerce médical...
GFO	www.onto-med.de/ontologies/gfo.html	Onto-Med Research Group	KIF, OWL	170	Médical
Sowa	www.jfsowa.com	Sowa	KIF	30	Philosophie
SUMO	www.ontologyportal.org	Niles, Pease, Menzel	KIF, OWL	1000	Militaire, médical finance...

TABLE II.3 – Synthèse des ontologies de haut niveau présentées précédemment

Parmi les candidates possibles, nous cherchions tout d'abord une *ontologie exprimée en OWL*. Ce critère permet d'éliminer Sowa. Ensuite, afin d'en garantir une réutilisation dans le domaine académique, l'utilisation de cette ontologie ne devait pas se faire à partir d'un langage propriétaire. Ceci disqualifie Cyc. Enfin, l'ontologie recherchée doit être étendue vers une ontologie de crise, ce qui élimine GFO et BFO, orientées vers le médical. Parmi celles restantes, *notre choix s'est porté sur SUMO* par rapport au nombre de concepts qu'elle propose, plus importants que ceux présents dans l'ontologie DOLCE. Pour poursuivre la construction de notre ontologie de crise routière, il nous faut maintenant choisir une ontologie de domaine dédiée à la crise.

II.1.4 Les ontologies de domaine orientées crise

Dans le domaine de la gestion de crise, de par l'hétérogénéité des acteurs impliqués dans la réponse, il existe plusieurs vocabulaires utilisés par différents systèmes d'information pour décrire une situation de crise donnée. Pourtant, un des enjeux majeurs est de rendre ces systèmes interopérables [Di Maio, 2007] pour qu'ils soient à même de communiquer entre eux et d'avoir la capacité de partager des informations. Ce besoin majeur peut être en partie couvert par l'usage d'ontologies dédiées à la gestion de crise. La table II.4 reprend ces ontologies existantes et propose une classification en fonction des sujets couverts par chacune de celles-ci.

Sujet abordé	Nom de l'ontologie	Format	Réutilisable
<i>Ressource</i>	SOKNOS	OWL-DL	Oui
	MOAC	RDF	Oui
	SIADEx	RDF	Oui
<i>Processus</i>	ISyCri	OWL-DL	Oui
	WB-OS	XML	Oui
<i>Personnes</i>	FOAF	RDF	Non
	BIO	RDF	Non
<i>Organisations</i>	IntelLEO	RDF	Non
	Organisation Ontology	RDF	Non
<i>Dégâts</i>	HXL	RDF	Oui
<i>Désastres</i>	EM-DAT	N/A	Non
	UNEP-DTIE	N/A	Non
	Canadian Disaster Database	N/A	Non
<i>Infrastructures</i>	PSCAD	N/A	Non
	EPANET	N/A	Non
	OTN	OWL	Non
<i>Géographie</i>	GeoNames	RDF	Non
<i>Hydrologie</i>	Ordonance Survey Hydrology Ontology	OWL	Non
<i>Topographie</i>	USGS CEGIS	OWL	Non
	E-response Building Pathology Ontology	OWL	Non

TABLE II.4 – Différentes ontologies de gestion de crises d'après [Liu *et al.*, 2013]

Parmi toutes les ontologies décrites dans le tableau précédent, notre attention s'est focalisée sur les ontologies portant sur la gestion de crise (vues ressource, processus ou dégâts) et dont le domaine d'application n'est pas unique (ontologies réutilisables). Nous avons donc extrait les six ontologies suivantes : SOKNOS, MOAC, SIADEx, ISyCri, WB-OS et HXL. Chacune de ces ontologies est présentée dans la suite.

II.1.4.1 SoKNOS

SoKNOS (Service-Oriented architecture zur Unterstützung von Netzwerken im Rahmen Öffentlicher Sicherheit) [Babitski *et al.*, 2011] est une ontologie développée par les équipes de recherche allemandes de SAP. Elle s'attache à aider les équipes opérationnelles déployées sur le terrain en leur évitant de les noyer face à une surcharge d'information. L'objectif de SoKNOS est de proposer une information claire et concise. L'ontologie se base sur l'ontologie haut niveau DOLCE [Masolo *et al.*, 2002] et propose la définition d'un vocabulaire de base pour la gestion de crise. L'ontologie est structurée en trois volets relatifs aux ressources (matérielles et humaines), aux dégâts et à l'ensemble des différents capteurs disponibles sur le terrain, chacun des volets pouvant être une ontologie à part entière (ontologie d'application). La force de cette ontologie est de pouvoir s'interfacer « à moindre coût » avec des ontologies déjà existantes. Toutefois, l'ontologie ne présente pas des concepts relatifs aux crises directement instanciables et présuppose l'existence

d'ontologies d'application. La figure II.10 présente l'articulation des différentes ontologies.

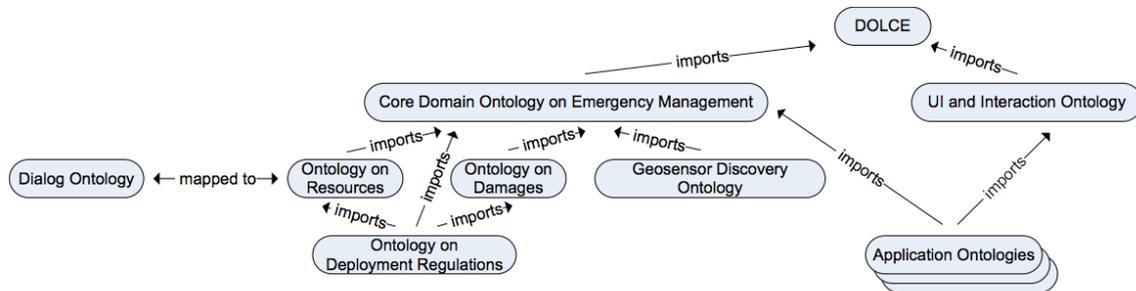


FIGURE II.10 – Méta Modèle de l'ontologie SoKNOS [Babitski *et al.*, 2011]

II.1.4.2 MOAC

MOAC (Management Of A Crisis Vocabulary) [Ortmann *et al.*, 2011] propose un vocabulaire de référence pour aider les utilisateurs finaux à décrire et exprimer les faits relatifs à la gestion d'une crise humanitaire. L'objectif de MOAC est de capitaliser l'information relative à la situation de crise provenant (1) des agences humanitaires traditionnelles (2) des bénévoles et volontaires sur place (3) des personnes touchées par la crise. Les concepts sont regroupés en trois sections :

- *Gestion de l'urgence* décrit tous les dommages imputables à la situation de crise en donnant le type de crise (tremblement de terre, incendies, inondations, glissements de terrain, pillage, urgence médicales), les événements associés (violences, émeutes...) ainsi que les populations touchées (victimes, blessés...).
- *Qui ? Quoi ? Où ?* Il s'agit d'identifier quels sont les acteurs impliqués dans la réponse (*qui ?*), les compétences qu'ils mettent en œuvre (*quoi ?*), ainsi que la localisation de leur action (*où ?*).
- *Les « clusters »* qui correspondent à des groupes d'experts dans les différents secteurs d'activité impliqués dans la réponse à la situation de crise (Eau, Télécommunications, Santé, Nourriture...).

II.1.4.3 SIADEX

SIADEX [de la Asunción *et al.*, 2005] présente un framework de planification et d'aide à la conception de plans de réponse face à des feux de forêt. Ce framework se base sur une ontologie structurée autour de deux grandes familles de concepts : les ressources (personnes, véhicules, utilités...), les activités (transports, extinction d'incendie...) auxquelles sont ajoutées des informations (position géographique, informations météorologiques). Le déploiement de l'ontologie permet aux décideurs de suivre l'évolution et la consommation des ressources (humaines et matérielles) pendant la phase de réponse. L'exploitation de l'ontologie SIADEX se fait par couplage avec un moteur de planification HTN (Hierarchical Task Network) [Erol *et al.*, 1994] afin de planifier de manière

efficace et efficiente la réponse à la situation. La figure II.11 présente le métamodèle de l'ontologie SIADEX. Le double avantage de cette ontologie réside dans son utilisabilité immédiate et dans son exploitation via un outil de planification. Toutefois cette ontologie n'est que partiellement réutilisable. En effet, même si le volet ressource est générique, les concepts décrivant les problèmes liés aux incendies semblent difficilement réutilisables dans le cadre d'une crise générique.

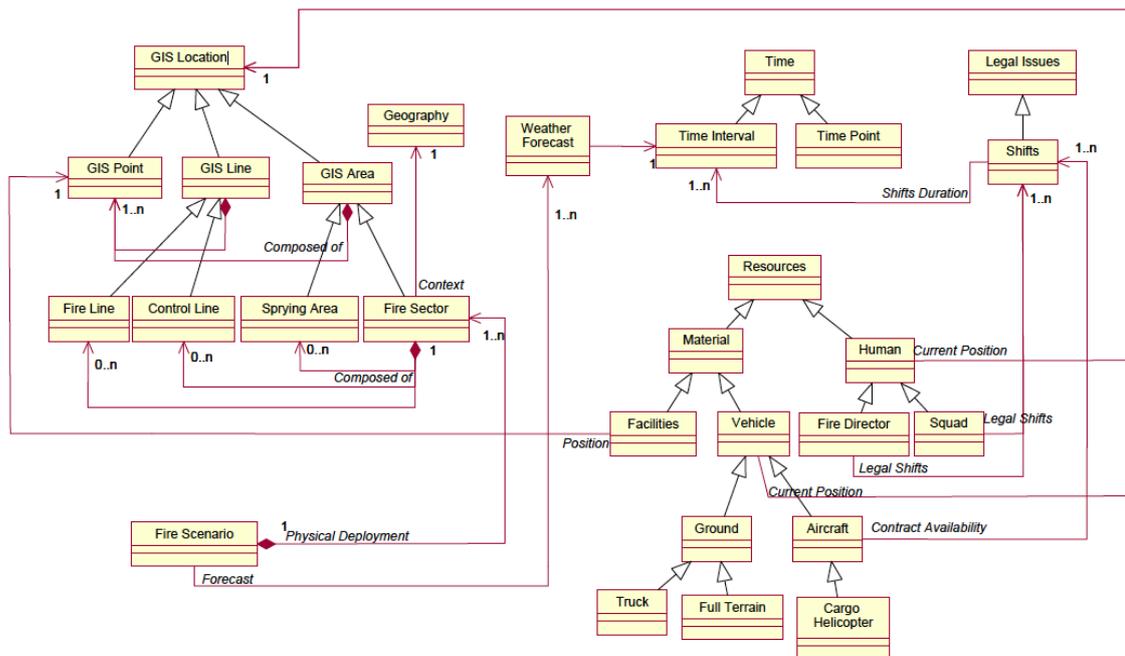


FIGURE II.11 – Métamodèle de l'ontologie SIADEX [Fdez-Olivares *et al.*, 2006]

II.1.4.4 ISyCri

ISyCri [Truptil, 2011] est le résultat du projet ANR français du même nom proposant d'apporter une réponse aux problèmes d'Interopérabilité des Systèmes en situation de Crise. L'ontologie est structurée en quatre parties :

- *Le système d'étude* : décrit le « monde » impacté par la crise en termes de biens, personnes, société civile et populations.
- *Les problèmes de la crise* : dans cette partie sont recensés les dangers, risques et faits concernant la situation de crise et qui impactent les composants du système d'étude.
- *Le système de traitement de la crise* reprend une description des forces en présence pour résoudre la situation de crise en donnant des informations sur les acteurs et les compétences qu'il sont à même de mettre en œuvre.
- *Le processus collaboratif de réponse* décrit les concepts relatifs à la dynamique collaborative de réponse en reprenant une partie du métamodèle de BPMN 2.0.

La figure II.12 détaille ce métamodèle.

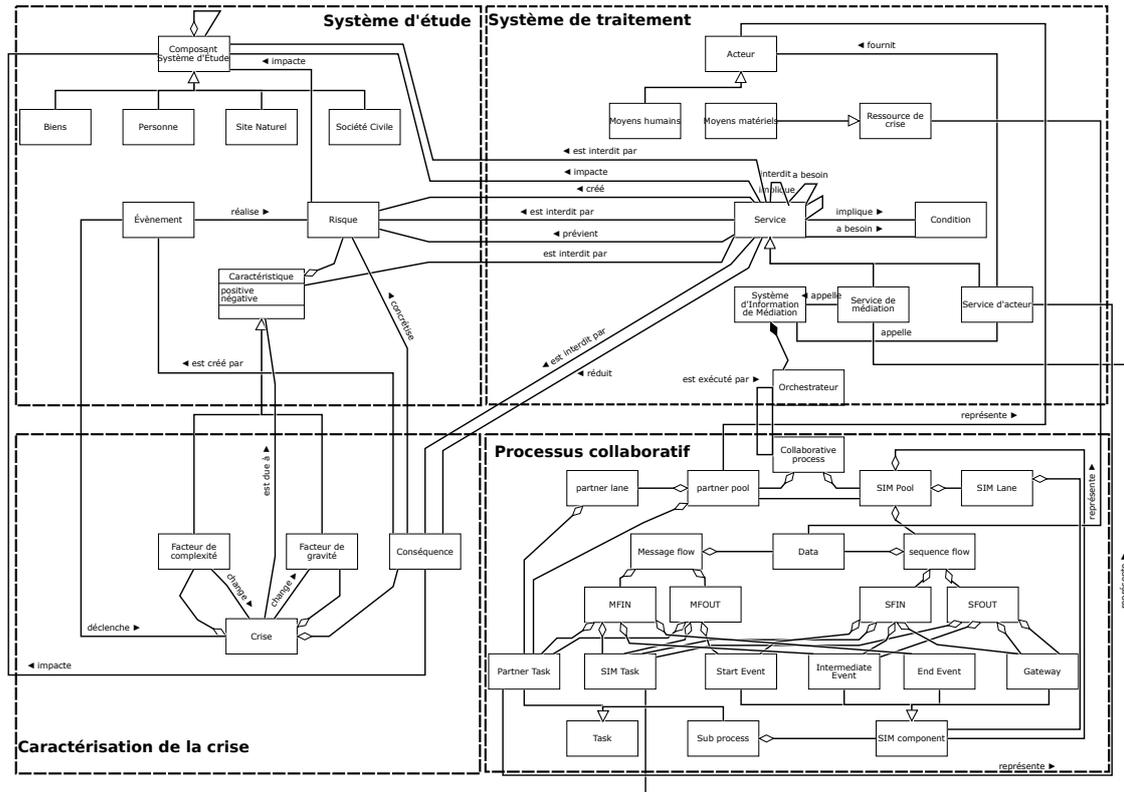


FIGURE II.12 – Le métamodèle ISyCri [Truptil, 2011]

II.1.4.5 WB-OS

WB-OS (Web-Based Ontology Structure) [Chou *et al.*, 2011] est un projet de génération de sites internet pour les situations de crise internet qui est basé sur une ontologie. La construction de l'ontologie se base sur une analyse de sites internet dédiés à la gestion de crise. La base de connaissance est structurée autour des différents stades d'évolution de crise [Pearson et Mitroff, 1993] :

- *Préparation (avant la crise)* : les connaissances sont capitalisées autour d'un historique des catastrophes (déroulement, impact), de la préparation (définition de plans de réponse), de la formation des différentes populations (civils, entreprises, autorités publiques) et de la définition de seuils d'alertes.
- *Préparation à une catastrophe imminente (juste avant la crise)* : il s'agit de récupérer des connaissances concernant une crise sur le point de survenir. Des informations sont capitalisées sur la nature de la catastrophe ainsi que sur les premiers secours à mettre en œuvre.
- *Réponse à la catastrophe (pendant la crise)* : ici sont renseignées des informations relatives à la crise en train de se dérouler comme les actions en cours, les acteurs offrant une première réponse, l'évolution de la situation...
- *Rétablissement (juste après la crise)* : dans cette partie on retrouve des informa-

tions concernant les actions mises en œuvre pour arriver à un retour à la normale. Les actions sont classifiées en fonction de l'horizon de temps sur laquelle elle porte (court, moyen ou long terme).

- *Capitalisation autour de la crise* : on retrouve ici tout ce qui concerne la mise à jour des plans et des bonnes pratiques de réponse.

Le métamodèle compte plus de 2000 classes organisées en 11 niveaux de granularité. La figure II.13 présente une partie de ce métamodèle

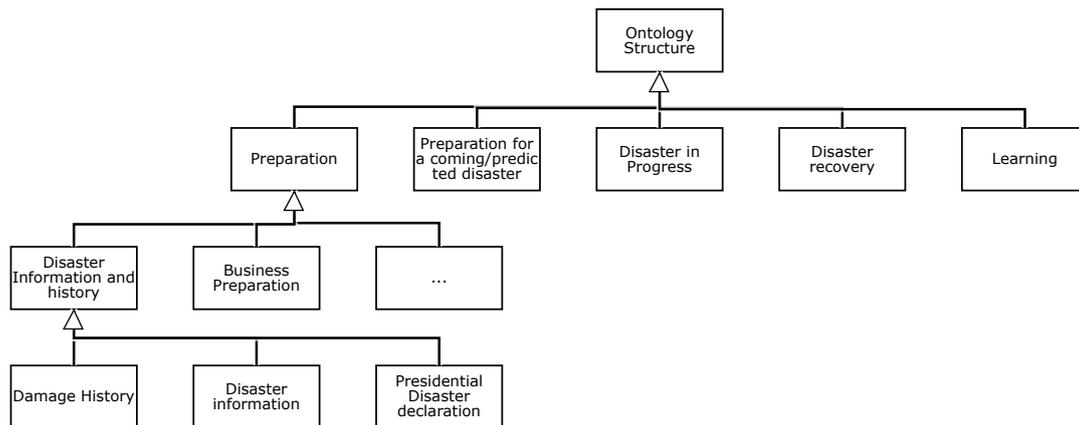


FIGURE II.13 – Une partie du métamodèle de l'ontologie WB-OS [Chou *et al.*, 2011]

II.1.4.6 HXL

HXL (Humanitarian eXchange Language) [Keßler et Hendrix, 2010] est un projet initié par le bureau de coordination des affaires humanitaires des Nations Unies ayant pour but de définir un standard d'échange et de gestion de données pour les réponses à des situations de crise. L'ontologie y est structurée autour de quatre thématiques suivantes :

- *Informations de géolocalisation* : on trouve ici tous les concepts nécessaires à la description géographique d'une ressource ou d'un enjeu. Ceux-ci sont caractérisés par une forme géométrique et repérés par des coordonnées GPS.
- *Profil des victimes* : il s'agit de caractériser les populations impactées par la catastrophe humanitaire (âge, sexe, blessés, disparus, réfugiés...)
- *Réponse à la situation* : il s'agit de recenser les activités invoquées dans le cadre d'une urgence.
- *La situation et son évolution* : c'est ici que l'on caractérise les besoins, les urgences et les incidents induits par la situation de crise.

Par souci de lisibilité pour le lecteur, il apparaît peu pertinent de faire figurer l'ensemble du métamodèle dans ce manuscrit. Une version complète du métamodèle est disponible à l'URL suivante : <http://hxl.humanitarianresponse.info/ns/hxl.dot.svg>.

II.1.4.7 Vers un choix

Parmi toutes les ontologies présentées dans la table II.4, nous avons choisi de présenter celles qui sont orientées vers l'organisation de la réponse et la gestion de crise (vues ressources, processus et dégâts) et qui sont réutilisables. Six ontologies candidates ont retenu notre attention : SOKNOS, MOAC, SIADEX, ISyCri, WB-OS et HXL. Le positionnement de nos travaux se situe au niveau de la cellule de crise et notamment autour de sa mission de pilotage de la coordination et de la collaboration multi acteurs.

SOKNOS se positionne au niveau « terrain » de la réponse à la situation de crise en proposant une aide pour les équipes opérationnelles. Il ne nous a pas semblé pertinent de la retenir pour notre application. Malgré une vue ressource et une réelle aide à la décision, SIADEX présente un profil trop appliqué à la réponse aux feux de forêt pour être retenue. Le point de vue proposé par MOAC et HXL n'est pas suffisamment orienté processus pour notre cas d'application. WB-OS propose des solutions pour chacune des phases de la gestion de crise, mais ne supporte pas les aspects collaboratifs de la réponse présents dans l'ontologie ISyCri. Notre choix s'est donc porté vers l'ontologie ISyCri qui présente les caractéristiques nécessaires (positionnement processus au niveau de la cellule de crise, aspect collaboratif de la réponse) pour servir d'ontologie de domaine.

II.1.5 Synthèse

L'objectif de notre démarche est de définir une base de connaissances structurée de telle sorte qu'elle soit capable de :

1. Recueillir de la connaissance relative à une situation de crise routière.
2. Rendre exploitable cette connaissance dans le but de déduire une dynamique collaborative de réponse à une situation de crise routière.

Au vu des éléments présentés dans la partie précédente, notre choix de base de connaissance s'est porté vers la construction d'une ontologie. Compte tenu du caractère spécifique du domaine dont nous cherchons à exploiter les connaissances (crises routières dues aux intempéries hivernales), notre objectif est de définir une *ontologie d'application* telle que définie dans la partie II.1.2.4. Cette ontologie d'application doit être construite à partir d'une ontologie haut niveau (SUMO) et d'une ontologie de domaine (ISyCri).

Toutefois, la démarche de construction de cette ontologie ne peut être vue comme l'établissement d'une simple liste exhaustive de *Concepts*, *Relations* et *Règles* relatifs au domaine de la crise routière. En effet, de par l'existence de travaux antérieurs menés au sein de l'équipe Interopérabilité des Organisations autour de la caractérisation de situation collaborative en partie par des ontologies domaines, il apparaissait naturel d'appuyer les travaux détaillés dans ce manuscrit sur les travaux déjà existants.

Ainsi, la proposition scientifique se déclinera en deux volets. Le premier s'attache à présenter un métamodèle cœur collaboratif. Le second porte plus spécifiquement sur son extension aux concepts de crise routière par une structuration en couches d'ontologies.

II.2 Construction d'un métamodèle collaboratif convergent (contribution collective)

Cette section présente la démarche et les résultats qui ont conduit à la définition d'un nouveau métamodèle collaboratif. Cette contribution s'inscrit donc dans une démarche collective à laquelle plusieurs doctorants (Guillaume Macé-Ramète, Wenxin Mu, Anne-Marie Barthe-Delanoë) de l'axe Interopérabilité des Organisations du Centre de Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux ont pris part. Cette section II.2 propose de restituer le fruit de ce travail collectif.

II.2.1 Historique et genèse des travaux

Un des objectifs du projet interne au laboratoire MISE (Mediation Information System Engineering) est de définir un système d'information de médiation capable de supporter les collaborations entre acteurs hétérogènes. Le projet a démarré en 2004 et se trouve à sa troisième itération (MISE 3.0) (le lecteur intéressé pourra se plonger dans la lecture de [Bénaben, 2012]). Cette démarche d'ingénierie dirigée par les modèles est initiée par la déduction d'un modèle de dynamique collaborative à partir de la transformation d'un modèle de collaboration. Cette transformation métier a été l'objet d'une première série de travaux menés dans les thèses de [Rajsiri, 2009], [Truptil, 2011] et [Mu, 2012]. Les paragraphes suivants synthétisent ces travaux.

II.2.1.1 MISE 1.0 et la genèse des travaux

L'ontologie de réseau collaboratif développée dans les travaux de [Rajsiri, 2009] ambitionne de fournir des éléments de définition de concepts dans le domaine de la collaboration. Elle sert de support à la mise en place d'une dynamique collaborative dans le domaine industriel en appliquant la démarche suivante :

1. Définition des partenaires de la collaboration et de leurs rôles
2. Définition des objectifs collaboratifs
3. Déduction de la dynamique collaborative

Pour cela, le métamodèle de cette ontologie est structuré autour de concepts existants dans des ontologies de domaine faisant référence à la modélisation d'entreprises comme le MIT Process Handbook [Malone *et al.*, 1999] ou ECOLEAD [Camarinha-Matos *et al.*, 2008]. L'ontologie est divisée en deux parties :

- *L'ontologie collaborative* reprend les concepts liés à la modélisation d'une collaboration inter entreprises (Participant, rôle, service, réseau collaboratif, objectif commun).
- *L'ontologie de processus collaboratif* s'attache à fournir une base de connaissance pour capitaliser autour des concepts liés à la dynamique collaborative entre acteurs (activités métiers, ressources, services de médiation, message flow, sequence flow).

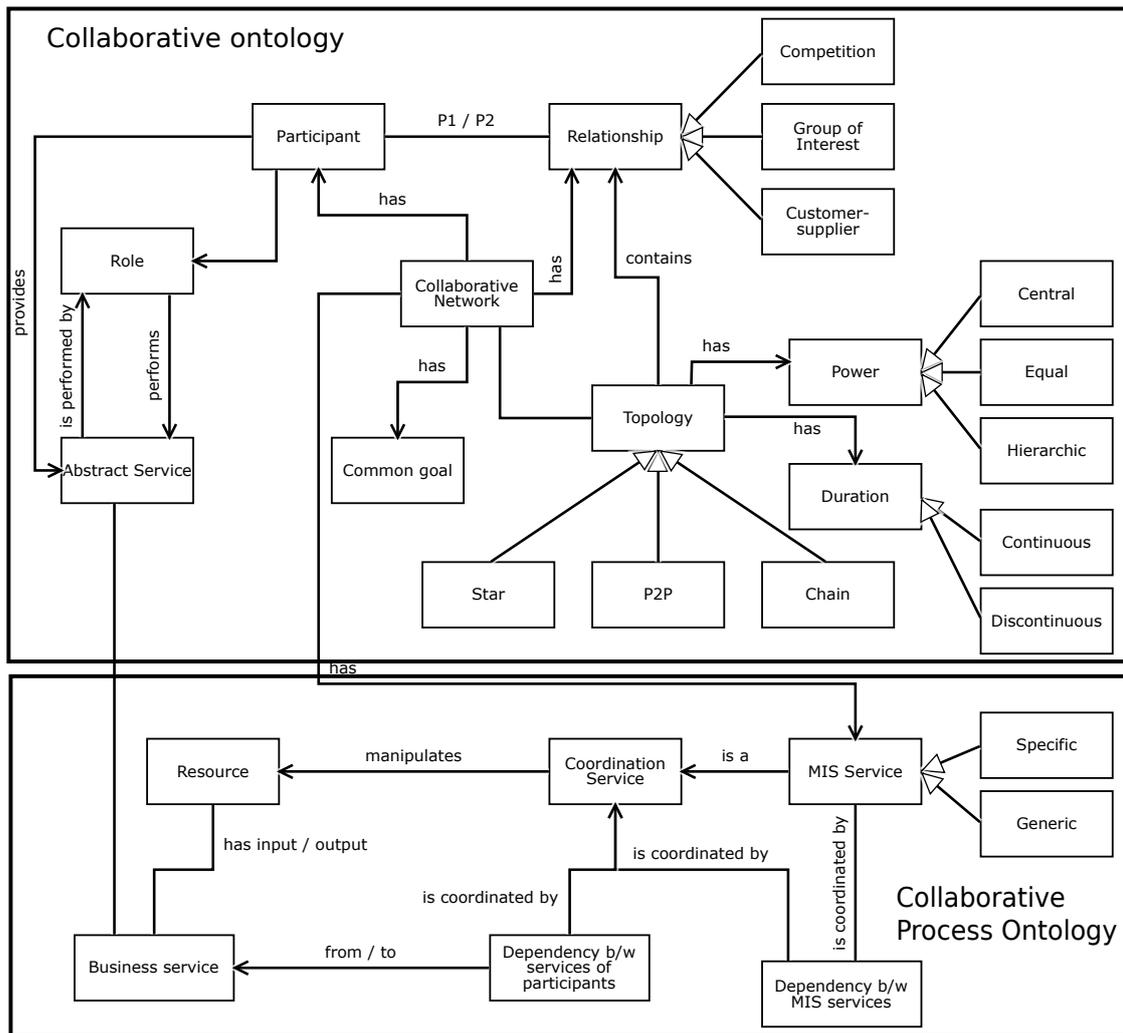


FIGURE II.14 – Le métamodèle de l'ontologie collaborative d'après [Rajsiri, 2009]

La figure II.14 présente le métamodèle de l'ontologie.

L'objectif des travaux menés par [Rajsiri, 2009] fut de déduire l'ontologie de processus collaboratif à partir d'éléments de caractérisation instanciés dans l'ontologie collaborative (définition des partenaires et des objectifs). L'étape de déduction de l'ontologie de processus se fait par application des règles suivantes sur l'ontologie collaborative (le détail des règles se trouve en annexe A) :

1. Règle 1 : Identification des services fournis par chaque acteur
2. Règle 2 : Définition des activités métiers.
3. Règle 3 : Séquencement des activités métiers.
4. Règle 4 : Sélection des services répondant à un objectif commun.
5. Règle 5 : Déduction de la topologie de la collaboration.

La figure II.15 illustre la démarche de construction d'un processus collaboratif d'après [Rajsiri, 2009] avec ces règles.

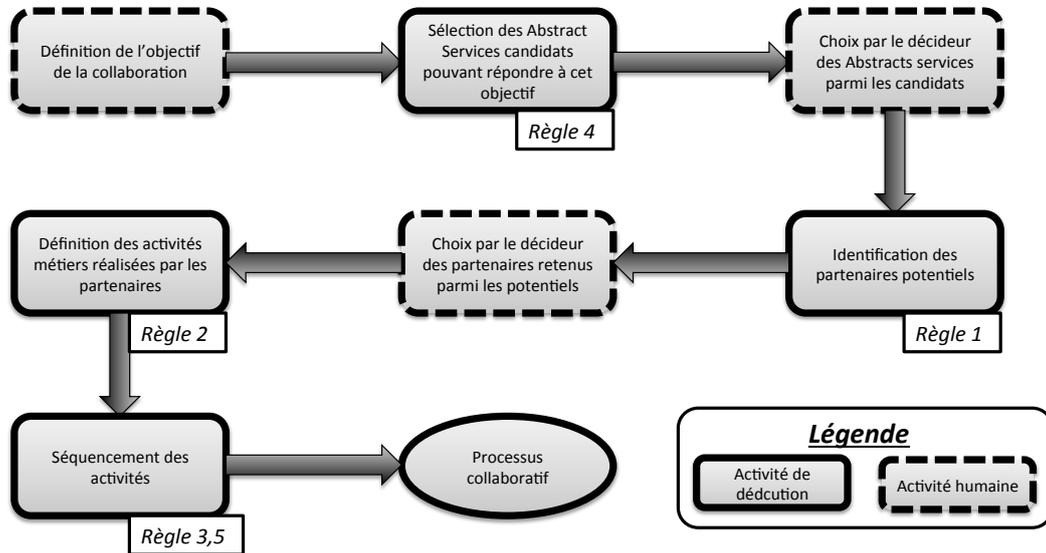


FIGURE II.15 – La démarche de construction d'une dynamique selon [Rajsiri, 2009]

II.2.1.2 IsyCri : Application au domaine de la crise

Les travaux de [Truptil, 2011] s'inscrivent en conclusion de la première itération du projet MISE. La démarche de déduction du processus collaboratif se fait en 4 étapes :

1. Modélisation des services de réponse à la situation de crise
2. Modélisation de la situation de crise à partir des informations recueillies sur le terrain.
3. Confrontation entre modèles de services et modèle de situation
4. Choix de la cellule de crise avec priorisation des objectifs à atteindre

Les deux premières étapes consistent en un peuplement de l'ontologie de gestion de crise présentée dans la partie II.1.4.4 par instantiation des concepts des systèmes d'étude et de traitement. La troisième et la quatrième étape consistent en l'exécution d'un jeu constitué de 17 règles dont la liste exhaustive est donnée en annexe A. La figure II.16 présente la démarche de construction du processus collaboratif avec les règles qui interviennent à chaque étape de cette démarche.

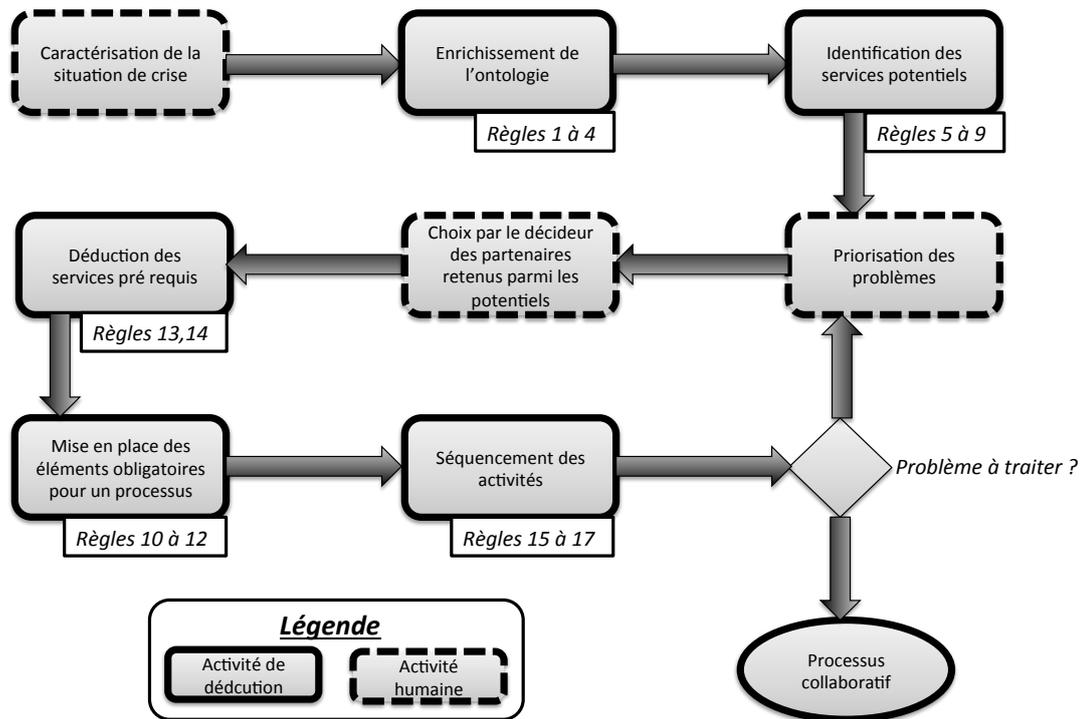


FIGURE II.16 – Construction d’un processus collaboratif de réponse à une situation de crise selon [Truptil, 2011]

II.2.1.3 MISE 2.0 : maturation des travaux

Les travaux de [Mu, 2012] se positionnent dans la continuité des travaux initiés par [Rajsiri, 2009] et viennent les enrichir. Aussi les améliorations apportées par cette nouvelle itération interviennent tant au niveau de la structure du métamodèle que des règles de déduction.

L’ontologie est structurée autour des deux familles de concepts suivants :

- *Les concepts collaboratifs* qui reprennent la plupart des concepts de l’ontologie collaborative de [Rajsiri, 2009]. Ils sont déclinés en concepts organisationnels (Partenaires, Réseau, Objectifs) et fonctionnels (Fonction principale, Fonction, Message).
- *Les concepts de médiation* sont basés sur l’ontologie de processus collaboratif de [Rajsiri, 2009] et font référence à la conceptualisation du processus collaboratif. On y retrouve les notions de Médiateur, Relation de Médiation, Fonction de médiation, Évènement.

L’objectif de la démarche n’est plus de déduire un unique processus, mais une cartographie de processus au sens de la norme [ISO, 2008], c’est-à-dire un ensemble de processus décisionnels, opérationnels et de support. L’objectif de collaboration présent dans l’ontologie MISE 1.0 laisse donc sa place à un ensemble d’objectifs décisionnels,

opérationnels et de support. Cette décomposition d'objectifs s'accompagne également de la décomposition du réseau collaboratif qui est composé de sous-réseaux. [Mu, 2012] propose également une classification des relations de médiation en *ordre*, *feedback* et *moyen*. La figure II.17 reprend la structure de ce métamodèle.

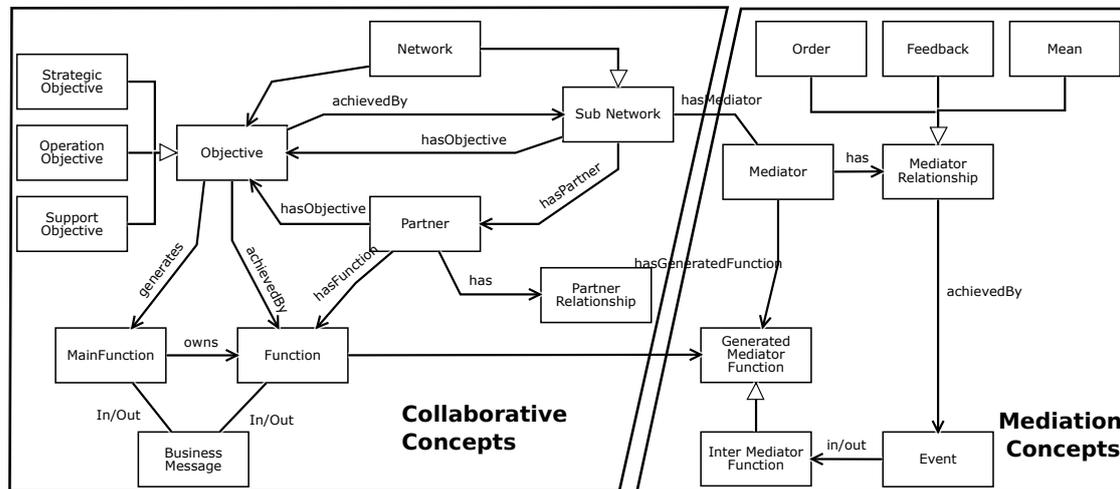


FIGURE II.17 – Le métamodèle MISE2.0 d'après [Mu, 2012]

Là où l'ontologie de [Rajsiri, 2009] faisait état de 5 règles, l'ontologie proposée par [Mu, 2012] en comprend 11. Celles-ci sont regroupées en cinq familles dont le détail se trouve en annexe A :

1. *Groupe 1* : la création du médiateur.
2. *Groupe 2* : la création des relations entre médiateurs.
3. *Groupe 3* : la création des fonctions de médiation.
4. *Groupe 4* : la création des liens le médiateur et les fonctions de médiation.
5. *Groupe 5* : la création de fonctions entre médiateurs.

Ces règles viennent compléter la démarche de [Rajsiri, 2009] par la mise en place d'un médiateur qui garantit les échanges entre les différentes activités mises en œuvre dans un processus. En outre ces activités sont distinguées en fonction de leur nature : décisionnelle, opérationnelle ou de support.

II.2.1.4 Synthèse

L'ensemble des travaux présentés précédemment possèdent une identité génétique commune. En effet, ils proposent tous une démarche de déduction d'une dynamique collaborative par une exploitation d'ontologies réalisées au travers de mécanismes à base de règles. Nous pouvons alors souligner les points communs suivants entre les trois démarches :

- *La caractérisation d'une situation et d'un besoin* : dans chacun des cas présentés auparavant, la première étape permet de faire émerger des objectifs à partir de

la description d'une situation. Par exemple, la caractérisation de la situation de crise génère des risques et des conséquences qu'il va falloir traiter.

- *L'identification de services pouvant répondre au besoin* : à partir des liens existants entre les acteurs, leurs services et les besoins caractérisés, chacune des démarches propose une méthode d'identification de services potentiels.
- *La sélection par l'utilisateur de services parmi les possibles* : c'est l'étape où le décideur vient valider les choix que lui propose la machine.
- *La construction du processus collaboratif* : une fois le choix de l'utilisateur renseigné, des règles permettent de déduire⁸ des processus collaboratifs administrés par un Médiateur.

Dès lors, il est légitime de vouloir capitaliser sur ces travaux pour développer un outil générique capable de supporter ce type de démarche. C'est ce que propose la section suivante avec la construction d'un métamodèle de collaboration.

II.2.2 Construction d'un métamodèle de collaboration

Ce métamodèle a été conçu pour répondre à la question de la « récolte » du savoir dans un contexte collaboratif. Ce métamodèle est organisé autour des questions inhérentes à la caractérisation d'un contexte collaboratif. Ainsi il répond aux questions classiques de définition d'une situation : « Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Combien ? Pourquoi ? » Afin d'assurer une couverture suffisante de toutes ces interrogations, le métamodèle est organisé autour de cinq familles de concepts présentés ci-après. La figure II.18 illustre la structuration du métamodèle par un diagramme de classes UML.

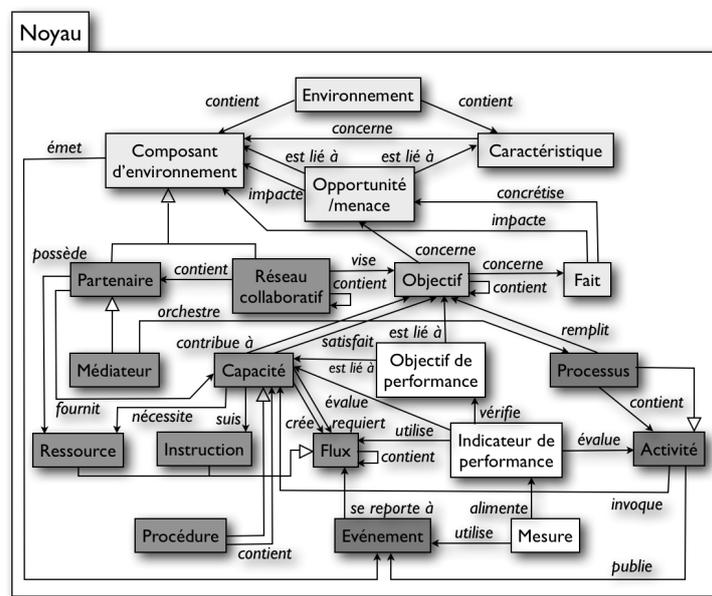


FIGURE II.18 – Structure du métamodèle de collaboration

8. la déduction est de plus en plus élaborée en fonction de l'itération du projet MISE de laquelle relèvent les travaux.

II.2.2.1 L'environnement de la collaboration

Il s'agit de définir le contexte de la collaboration en le caractérisant par ses composantes physiques et ses caractéristiques intrinsèques. L'*Environnement* dans lequel se déroule la collaboration est fait de *Composants d'Environnement* (entité physique) et de *Caractéristiques* (entité abstraite). Ainsi, cette partie répond aux questions d'ordre spatio-temporelles (*où* et *quand* se déroule la collaboration) et vise à décrire les enjeux de la collaboration.

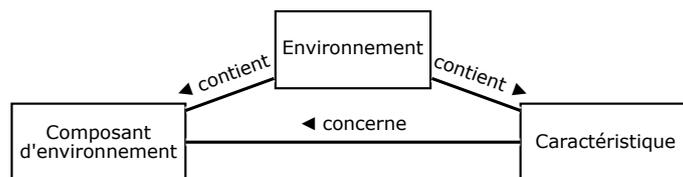


FIGURE II.19 – Partie environnement du métamodèle de collaboration

II.2.2.2 L'objet de la collaboration

Dans cette partie se trouve la définition du « *pourquoi* » de la collaboration. De la caractérisation précédente de l'environnement peut naître des *menaces* ou des *opportunités*, qui, lorsqu'elles sont concrétisées, peuvent impacter (positivement ou négativement) l'environnement de la collaboration. Dès lors, ces éléments peuvent être concernés par des *objectifs* de collaboration, éléments incontournables pour assurer le développement de la situation collaborative. Les objectifs globaux de la collaboration peuvent être décomposés en sous-objectifs. .

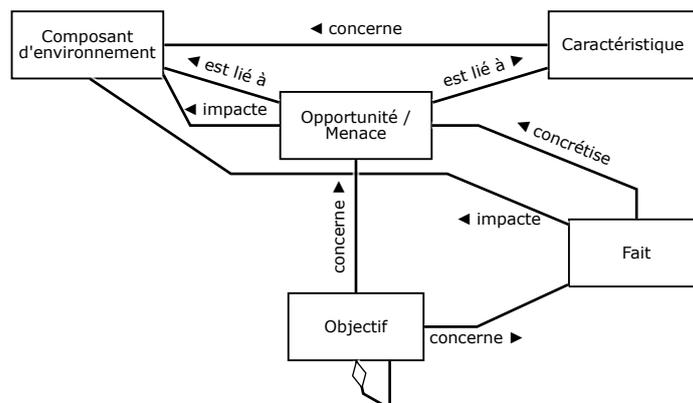


FIGURE II.20 – Partie objectif du métamodèle de collaboration

II.2.2.3 Les partenaires de la collaboration

Cette partie concerne les acteurs du *réseau collaboratif*. Chaque *acteur* se définit « publiquement » en fournissant des informations relatives aux *services* qu'il est capable d'assumer. Chaque service peut être vu comme une fonction au sens de IDEF 0 [Force, 1981] transformant des *flux d'entrées* en *sorties* conformément à des *instructions* et en étant supporté par l'usage de *ressources*. Les partenaires de la collaboration, en fonction de la place qu'ils occupent au sein de l'organisation peuvent assumer des activités décisionnelles, opérationnelles ou de support. Aussi le flux de sortie d'une activité décisionnelle peut être considéré comme une instruction pour une autre activité de même que le flux de sortie d'une activité support peut se trouver être la ressource d'une autre activité.

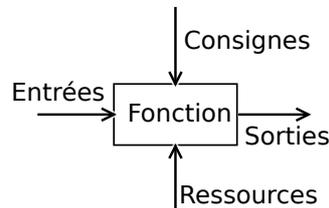


FIGURE II.21 – La vision d'une fonction d'après [Force, 1981]

Parmi les acteurs de la collaboration, on trouve le *Médiateur*. C'est un acteur spécifique qui propose uniquement des services de médiation afin de garantir la collaboration entre les différents acteurs. Cette notion de médiation entre les acteurs d'une même collaboration trouve son origine dans les travaux de [Wiederhold, 1992].

Les *services* proposés par les différents acteurs peuvent être regroupés dans des *procédures*. Il s'agit de bonnes pratiques génériques inscrites dans des manuels ou des plans de gestion de crise. Le MIT Process Handbook [Malone *et al.*, 1999] et les plans de gestion de crise sont des exemples de procédures.

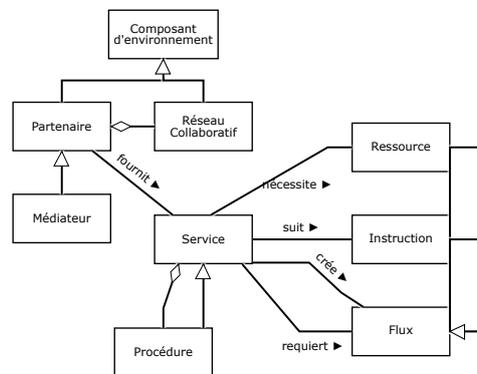


FIGURE II.22 – Partie partenaires du métamodèle de collaboration

II.2.2.4 La dynamique de la collaboration

L'objectif de cette partie du métamodèle est de spécifier le comportement du réseau collaboratif au niveau de l'enchaînement des *activités* pour remplir les objectifs de la collaboration. Cette partie est déduite à partir de la confrontation entre les services fournis par les différents acteurs et les objectifs de la collaboration. Aussi, les activités spécifiées dans cette partie de *processus* collaboratif correspondent à l'invocation des services décrits dans la partie des partenaires de la collaboration. Le séquençement des activités conduit à l'élaboration de *processus* (décisionnels, opérationnels, support). Pendant la phase d'orchestration du processus par le médiateur (Run Time), les activités publient des *Évènements* qui caractérisent leurs flux d'entrée et de sortie.

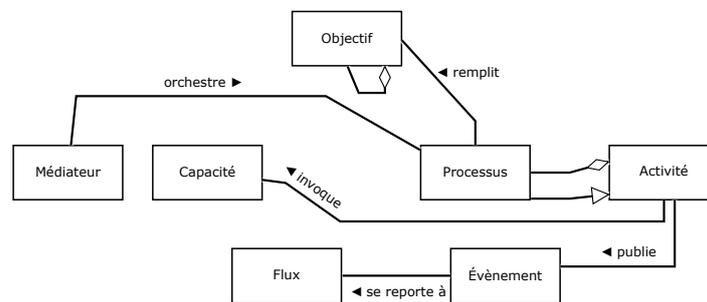


FIGURE II.23 – Partie processus du métamodèle de collaboration

II.2.2.5 La mesure de la performance

Cette partie du métamodèle comprend les concepts relatifs à la mesure de performance du processus collaboratif. L'objectif est de permettre l'évaluation des activités du processus. Pour permettre l'évaluation de performance, des *mesures* sont réalisées pour quantifier les données relatives aux flux des activités (entrées, sorties, consignes, ressources). Ces données sont ensuite contextualisées pour servir de base au calcul des *indicateurs de performance*. Les indicateurs de performance correspondent à des formules permettant d'évaluer la performance des activités en jeu. Celle-ci peut se décliner selon les trois dimensions suivantes [Jacot, 1990] : efficacité, efficacité et pertinence (voir figure II.24). L'efficacité sert à identifier si les sorties d'une activité sont conformes aux instructions assumées par celle-ci. L'efficacité permet de caractériser que l'activité est menée de manière à consommer le moins de ressources possible. La pertinence évalue le dimensionnement des ressources par rapport aux instructions qui ont été données.

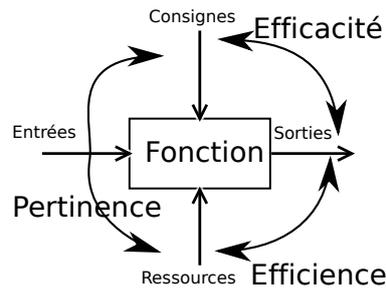


FIGURE II.24 – Les dimensions de la performance selon [Jacot, 1990]

L'information ainsi issue de l'indicateur de performance est comparée à une valeur qui représente *l'objectif de performance*. Il s'agit de la cible vers laquelle doit tendre la valeur de l'indicateur de performance. La comparaison de la valeur de l'indicateur de performance avec celle de l'objectif de performance doit amener le décideur à envisager de prendre des actions pour corriger d'éventuelles dérives de performance. Il existe ainsi un parallèle entre les notions de données informations et connaissances exposées dans la partie II.1.1.1 et celles de mesure, indicateur de performance et objectif de performance.

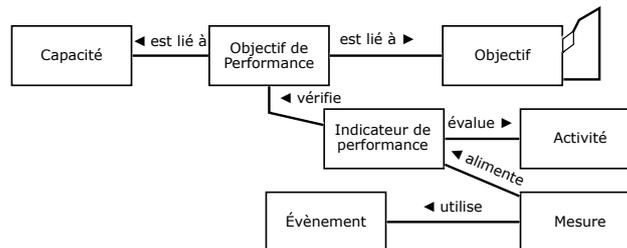


FIGURE II.25 – Partie performance du métamodèle de collaboration

La structuration de cette ontologie (concepts et relations entre les concepts) laisse ainsi apparaître une division entre les concepts liés à la collaboration (contexte, objectifs et partenaires) qui servent de « brique » à la construction de la deuxième partie liée à la dynamique de la collaboration (processus et performance). De fait, l'objectif recherché consiste en ce que l'élaboration de la partie processus se fasse par l'exécution de règles portant sur les concepts de la première partie. C'est l'objet de la section suivante.

II.2.3 Exploitation de l'ontologie

En tant que support d'une ontologie de type core, le métamodèle collaboratif convergent n'a pas pour but d'être instancié, mais doit servir de base à la construction d'ontologies de domaine ayant un objet dans le domaine de la collaboration. Toutefois, il est possible de définir une manière d'exploiter cette ontologie pour bâtir un processus collaboratif. Cette exploitation se fait en suivant les quatre étapes suivantes :

1. *Identification des objectifs de la collaboration* : la définition du ou des objectifs de collaboration est le point de départ de la construction d'un réseau de partenaires. En effet, la mise en place d'une collaboration n'existe que par la volonté d'acteurs de répondre à un besoin, une nécessité. L'identification se fait en deux phases : l'émergence des opportunités, des menaces et des faits qui donne naissance aux objectifs de la collaboration.
2. *Construction d'un réseau de partenaires* : il s'agit de sélectionner les partenaires qui vont être à même de former un réseau de partenaires pour atteindre les objectifs de la collaboration. Ce choix des partenaires se fait par une réconciliation entre les compétences des acteurs, leur prérequis et les objectifs de la collaboration.
3. *La construction du processus collaboratif* : l'objectif de cette étape est de construire la séquence des activités à mettre en œuvre pour mener à bien l'objectif de la collaboration. Les activités correspondent à l'invocation des compétences des différents acteurs.
4. *La mise en place d'un système de performance* : à partir des activités et des processus déduits précédemment, il s'agit de définir un triptyque mesures/indicateur de performance/objectif de performance permettant d'assurer un suivi de la performance du processus selon les dimensions d'efficacité, d'efficience et de pertinence.

La figure II.26 donne une vision de l'ensemble de la démarche d'exploitation proposée pour l'ontologie Core.

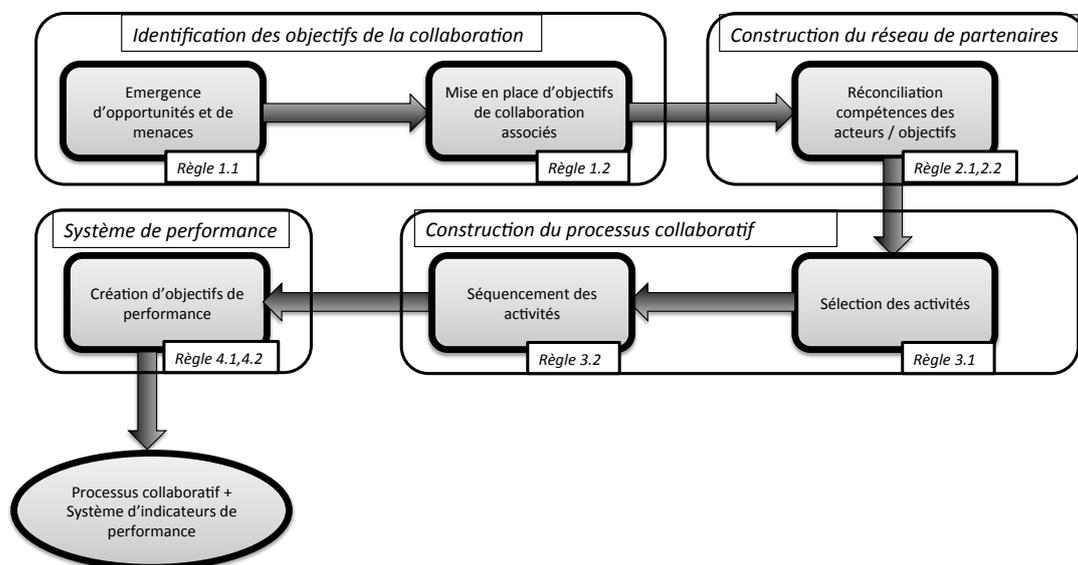


FIGURE II.26 – Démarche d'exploitation du métamodèle convergent

L'ensemble de la démarche fait appel aux huit règles présentées ci-après. Ces règles sont exprimées dans le langage SWRL (Semantic Web Rule Language) compatible avec les ontologies exprimées dans le format owl.

Règle 1.1 : Création des objectifs de la collaboration depuis une opportunité ou une menace

$$\text{OpportunitéMenace}(?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{Objectif}(?a) \wedge \text{concerne}(?a, ?x)$$

Cette règle stipule que si une opportunité ou une menace « x » se présente dans le contexte de la collaboration, alors un objectif « a » la concernant est créé.

Règle 1.2 : Création des objectifs de la collaboration depuis un fait

$$\text{Fait}(?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{Objectif}(?a) \wedge \text{concerne}(?a, ?x)$$

Cette règle s'attache à déduire la création d'un objectif « a » suite à l'apparition d'un fait « x ».

Règle 2.1 : Création du médiateur et du réseau collaboratif

$$\text{Objectif}(?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?b, ?a) \rightarrow \text{ReseauCollaboratif}(?a) \wedge \text{vise}(?a, ?x) \wedge \text{Mediateur}(?b) \wedge \text{estAggregéA}(?b, ?a)$$

Cette règle stipule que si un objectif collaboratif « x » a été défini, cela implique la mise en place d'un réseau collaboratif « a » et d'un médiateur « b » visant cet objectif.

Règle 2.2 : Sélection des partenaires potentiels du réseau collaboratif

$$\text{ReseauCollaboratif}(?w) \wedge \text{vise}(?w, ?x) \wedge \text{Objectif}(?x) \wedge \text{Capacité}(?y) \wedge \text{contribueA}(?y, ?x) \wedge \text{Partenaire}(?z) \wedge \text{fournit}(?z, ?y) \rightarrow \text{estAggregéA}(?z, ?w)$$

Cette règle permet la sélection des Partenaires « z » dans le réseau collaboratif « w » si les capacités « y » qu'il propose contribuent à l'objectif « x » du réseau collaboratif.

Règle 3.1 : Sélection des activités du processus

$$\text{ReseauCollaboratif}(?w) \wedge \text{vise}(?w, ?x) \wedge \text{Objectif}(?x) \wedge \text{Capacité}(?y) \wedge \text{contribueA}(?y, ?x) \wedge \text{Partenaire}(?z) \wedge \text{fournit}(?z, ?y) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{Activité}(?a) \wedge \text{invoque}(?a, ?y) \wedge \text{remplit}(?a, ?x)$$

Cette règle vise à créer une activité « a » à partir de l'invocation d'une capacité « y » fournie par un partenaire « z » dans le réseau collaboratif « w » par rapport à l'objectif « x » qu'elle remplit.

Règle 3.2 : Séquencement des activités

$$\text{Capacité}(?a) \wedge \text{flux}(?b) \wedge \text{créé}(?a, ?b) \wedge \text{Capacité}(?c) \wedge \text{requiert}(?c, ?b) \wedge \text{Activité}(?x) \wedge \text{Activité}(?y) \wedge \text{invoque}(?x, ?a) \wedge \text{invoque}(?y, ?c) \rightarrow \text{précède}(?x, ?y)$$

Cette règle permet de séquencer deux activités « x » et « y », invocations de capacités « a » et « c » par rapport au flux « b » que requiert « c » en entrée et qui est créé par « a ».

Règle 4.1 : Création des objectifs de performance

$$\begin{array}{l} \text{Objectif}(?x) \wedge \text{Activité}(?y) \wedge \text{remplit}(?y, ?x) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?y) \wedge \\ \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?b, ?c) \rightarrow \text{ObjectifDePerformance}(?a) \wedge \\ \text{IndicateurdePerformance}(?b) \wedge \text{Mesure}(?c) \wedge \text{estLiéA}(?a, ?x) \wedge \text{value}(?b, ?y) \wedge \\ \text{alimente}(?c, ?b) \wedge \text{vérifie}(?b, ?a) \end{array}$$

Cette règle propose que pour une activité « y » qui remplit un objectif « x » soient définis un triptyque mesure « c », indicateur de performance « b », objectif de performance « a » permettant l'évaluation de l'activité par rapport à l'objectif fixé.

Règle 4.2 : Affectation de la dimension de la performance

$$\begin{array}{l} \text{IndicateurdePerformance}(?x) \wedge \text{Mesure}(?y_1) \wedge \text{alimente}(?y_1, ?x) \wedge \\ \text{Evènement}(?z_1) \wedge \text{utilise}(?y_1, ?z_1) \wedge \text{Instruction}(?a) \wedge \text{seReporteA}(?z_1, ?a) \wedge \\ \text{Mesure}(?y_2) \wedge \text{alimente}(?y_2, ?x) \wedge \text{Evènement}(?z_2) \wedge \text{utilise}(?y_2, ?z_2) \wedge \\ \text{Flux}(?b) \wedge \text{seReporteA}(?z_2, ?b) \rightarrow \text{type}(?x, \text{"Efficacité"}) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{IndicateurdePerformance}(?x) \wedge \text{Mesure}(?y_1) \wedge \text{alimente}(?y_1, ?x) \wedge \\ \text{Evènement}(?z_1) \wedge \text{utilise}(?y_1, ?z_1) \wedge \text{Ressource}(?a) \wedge \text{seReporteA}(?z_1, ?a) \wedge \\ \text{Mesure}(?y_2) \wedge \text{alimente}(?y_2, ?x) \wedge \text{Evènement}(?z_2) \wedge \text{utilise}(?y_2, ?z_2) \wedge \\ \text{Flux}(?b) \wedge \text{seReporteA}(?z_2, ?b) \rightarrow \text{type}(?x, \text{"Efficacité"}) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{IndicateurdePerformance}(?x) \wedge \text{Mesure}(?y_1) \wedge \text{alimente}(?y_1, ?x) \wedge \\ \text{Evènement}(?z_1) \wedge \text{utilise}(?y_1, ?z_1) \wedge \text{Instruction}(?a) \wedge \text{seReporteA}(?z_1, ?a) \wedge \\ \text{Mesure}(?y_2) \wedge \text{alimente}(?y_2, ?x) \wedge \text{Evènement}(?z_2) \wedge \text{utilise}(?y_2, ?z_2) \wedge \\ \text{Ressource}(?b) \wedge \text{seReporteA}(?z_2, ?b) \rightarrow \text{type}(?x, \text{"Pertinence"}) \end{array}$$

Cette règle se rapporte au type d'indicateur de performance. Si un indicateur de performance « x » est alimenté par des mesures « y_1 » et « y_2 » faisant respectivement référence à une instruction « a » et à un flux « b » alors il s'agit d'un indicateur d'efficacité. Symétriquement si « a » est une ressource alors il s'agit d'un indicateur d'efficacité. Si « a » fait référence à une instruction et « b » à une ressource alors il s'agit d'un indicateur de pertinence.

Le tableau II.5 positionne l'organisation des règles du métamodèle convergent dans la démarche d'exploitation de l'ontologie en décrivant l'origine de la règle considérée.

Etape	Règle	Objectif	Origine
Identification des objectifs de la collaboration	1.1	Création des objectifs de la collaboration depuis une opportunité	Nouvelle règle
	1.2	Création des objectifs de la collaboration depuis un fait	[Truptil, 2011]
Construction du réseau de partenaires	2.1	Création du médiateur	[Mu, 2012]
	2.2	Sélection des partenaires	[Rajsiri, 2009]
Construction du processus collaboratif	3.1	Sélection des activités du processus	[Mu, 2012]
	3.2	Séquence des activités	[Truptil, 2011]
Mise en place du système de performance	4.1	Création des objectifs de performance	Nouvelle règle
	4.2	Affectation de la dimension de la performance	Nouvelle règle

TABLE II.5 – Organisation des règles du métamodèle convergent

II.2.4 Application à un cas d'école

Prenons l'exemple d'une course cycliste (*Environnement*) dont une *Caractéristique* est d'être une étape de montagne. De la confrontation entre ces deux concepts naît l'*Opportunité* d'une étape potentiellement gagnée par un grimpeur. Soit maintenant une équipe cycliste (*Réseau Collaboratif*) inscrite à la course devenant au passage un *Composant d'Environnement*, et dont l'*Objectif* va être de remporter cette étape de montagne. Cette déduction est obtenue à partir de l'application des règles 1.1 et 1.2. La figure II.27 illustre ce mécanisme.

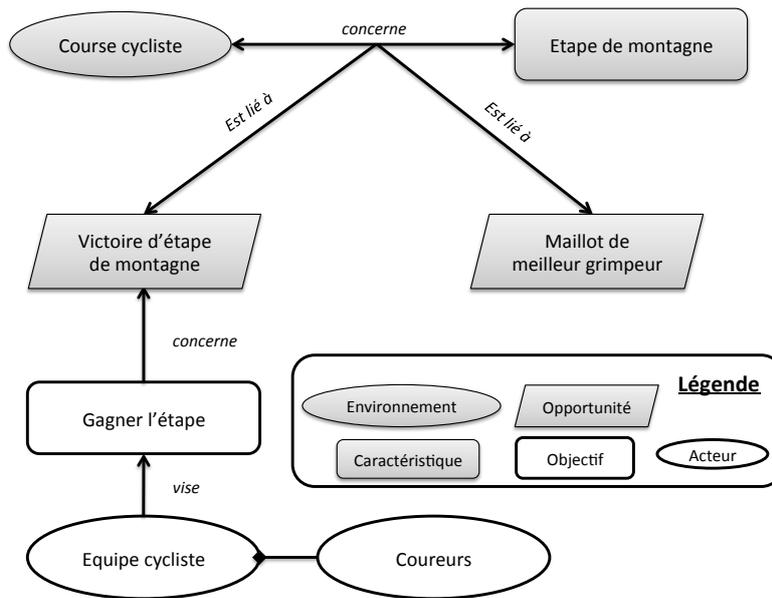


FIGURE II.27 – Exemple de composants d'environnement

L'équipe cycliste est composée d'un directeur sportif, d'un leader/grimpeur et d'équipiers (standard et de luxe) constituant les *Partenaires* de la collaboration chacun pouvant assumer une ou plusieurs tâches (*Compétence*) ; le directeur sportif élabore la stratégie pour donner des consignes (*Instructions*) aux coureurs ; tous les coureurs peuvent (ont les *Capacités*) ravitailler (apporter des *Ressources*) et rouler en tête du peloton ; le leader, en tant que coureur spécial peut attaquer pour remporter la victoire finale. La table II.6 détaille les compétences.

Compétence	Entrée	Sortie	Acteur
Ravitailler	N/A	Eau, énergie	Équipier
Écrémer	Eau, énergie, col	Peloton réduit	Équipier de luxe Grimpeur
Attaquer	eau, énergie, final d'étape, peloton réduit	Victoire	Grimpeur

TABLE II.6 – Tableau des compétences

Dès lors, il faut effectuer une réconciliation entre les compétences des acteurs et les objectifs de la collaboration pour construire le réseau de partenaires. L'application de la règle 2.2 permet de déduire que le grimpeur de l'équipe entre dans le réseau collaboratif, sa *Capacité* Attaquer contribuant à l'objectif de Gagner l'étape. L'application de la règle 3.1 permet de déduire que les *Capacités* Ravitailler et Rouler en tête du peloton entrent en compte dans le processus collaboratif par le jeu des entrées / sorties pour chacune des activités. Enfin l'application de la règle 3.2 permet de déterminer l'ordre d'invocation des activités : 1. Ravitailler, 2. Rouler en tête du peloton, 3. Attaquer.

Le *Processus* collaboratif suivant est alors mis en place : le directeur sportif ordonne à l'équipier 1 de ravitailler et à l'équipier 2 de rouler pour effectuer un écrémage progressif du peloton puis lorsque le peloton est suffisamment réduit (*Évènement*) le leader passe à l'attaque *Activité*. La figure II.28 propose un schéma BPMN de ce processus.

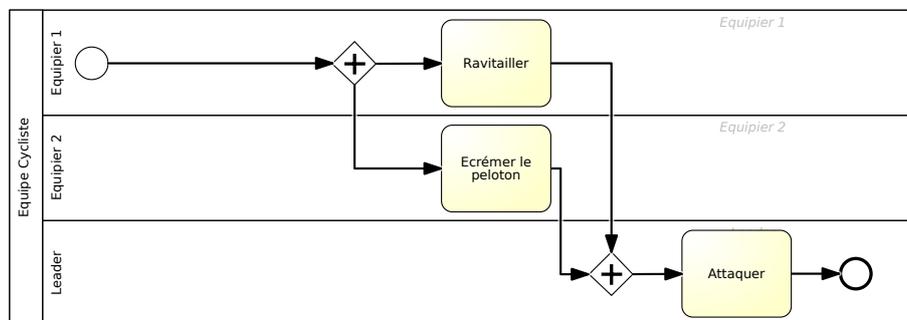


FIGURE II.28 – Processus collaboratif déduit

Afin de mettre le leader dans les meilleures conditions pour qu'il place une attaque, le directeur sportif considère que le peloton ne doit compter au maximum que 20 coureurs (120 initialement) à 3 kilomètres du sommet (ascension totale de 13 km). Intéressons-nous maintenant à la mesure de la performance sur l'activité « Rouler en tête du peloton ». Il est possible de mesurer les trois dimensions classiques de la performance (efficacité, efficience, pertinence).

Un premier indicateur d'efficacité serait de compter le nombre de coureurs « éjectés » du peloton par hectomètre au cours de la montée. Ainsi tous les 100 mètres, une *Mesure* du nombre de coureurs restant dans le peloton est faite et de cette mesure est calculé

l'indicateur de performance nombre de coureurs sortis du peloton lors des 100 derniers mètres et de le comparer à l'objectif de performance qui est de 1 coureur en moins tous les 100 mètres. Un autre indicateur d'efficacité est de calculer le pourcentage de diminution du nombre de coureurs dans le peloton.

Un indicateur d'efficacité de cette activité serait de calculer la puissance moyenne mise en œuvre pour éjecter un coureur du peloton. La valeur de cet indicateur correspond à la puissance totale (en Watt) développée par l'équipier 2 divisé par le nombre total de coureurs sortis du peloton.

Enfin, un indicateur de pertinence serait de calculer le rapport entre la puissance instantanée de l'équipier 1 et la puissance maximale qu'il peut atteindre. Si ce rapport est trop bas alors cela signifie que l'équipier 2 est « trop fort » pour cela (équipier de luxe?) et a contrario si le rapport est trop important, cela signifie que l'équipier 2 est en surrégime par rapport à ce qui lui est demandé.

II.3 Vers une ontologie de crise routière

II.3.1 Une ontologie structurée en couches

Rappelons que notre objectif est de créer une ontologie dédiée à une utilisation en situation crise routière. Celle-ci se positionne comme une ontologie d'application au sens de [Guarino, 1997]. De ce fait, il est intéressant de baser sa construction en plusieurs couches ontologiques, avec un héritage de concepts et de règles entre celles-ci. C'est ce que propose la présente section.

II.3.1.1 Choix d'une ontologie haut niveau

Dans la section II.1.3, nous nous sommes attachés à décrire des ontologies de haut-niveau et nous avons choisi de retenir l'ontologie SUMO comme référence pour la suite de nos travaux. Le premier travail que nous avons donc du effectuer a été de réaliser une correspondance entre les concepts du métamodèle de collaboration convergent et ceux présents dans l'ontologie de haut niveau SUMO. Le métamodèle de SUMO est rappelé dans la figure II.29.

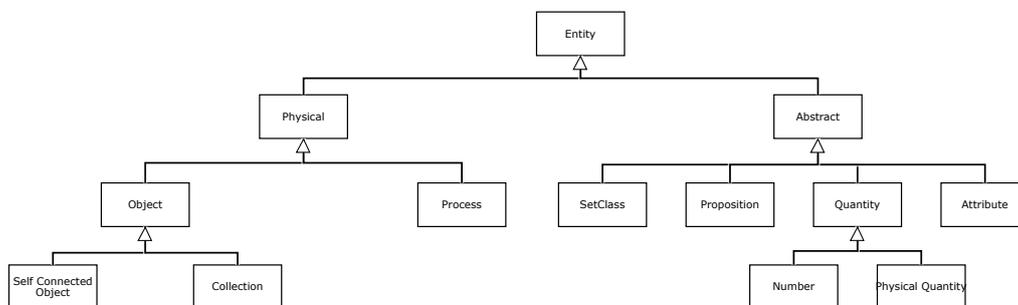


FIGURE II.29 – Structure du métamodèle de SUMO

Pour des soucis de lisibilité, l'héritage entre les concepts du métamodèle collaboratif convergent et ceux de l'ontologie de haut niveau SUMO sont présentés sous la forme d'un tableau (table II.7).

Concept Métamodèle Collaboratif	Concept SUMO
Environnement	Entity
Composant d'Environnement	Object
Caractéristique	Attribute
Opportunité Menace	Abstract
Fait	Process
Objectif	Proposition
Partenaire	Object
Réseau Collaboratif	Collection
Capacité	Process
Flux	Physical
Évènement	Process
Activité	Process
Mesure	Physical Quantity
Indicateur de performance	Quantity
Objectif de performance	Proposition

TABLE II.7 – Correspondance des concepts entre l'ontologie SUMO et le métamodèle collaboratif convergent

II.3.1.2 Ajout de la couche crise

Le métamodèle collaboratif convergent décrit précédemment permet d'apporter une réponse à la capitalisation de connaissances dans le cadre d'une situation collaborative. Toutefois, il n'est pas suffisant pour construire une base de connaissances facilement exploitable en situation de crise. En effet, les concepts y figurant sont trop généraux pour pouvoir être instanciés. Une spécialisation des concepts présentés précédemment est donc nécessaire pour que l'ontologie soit utilisable en tant que base de connaissances. Celle-ci se fait donc par rapport au domaine de la situation collaborative donnée, l'objectif étant d'obtenir une ontologie qui soit suffisamment couvrante en termes de concepts et de règles pour être instanciée et exploitée. L'étude sur les ontologies conduite dans la partie II.1.4 nous a conduit à nous baser sur l'ontologie ISyCri comme ontologie de domaine de crise. En effet, celle-ci envisage la réponse à une situation de crise comme une situation collaborative dans laquelle interviennent plusieurs acteurs hétérogènes.

Comme il a été présenté précédemment, le métamodèle de l'ontologie ISyCri est organisée en quatre parties : le système d'étude, les problèmes liés à la situation de la crise, le système de traitement de la crise et le processus collaboratif de réponse à la situation de crise. Nous reprenons ici ces parties et cherchons à les lier à notre métamodèle collaboratif convergent.

La partie liée au système d'étude permet de caractériser l'environnement de la crise et ses potentielles vulnérabilités, tandis que celle liée aux problèmes s'attache à décrire les faits de la crise subie par le système d'étude (partie caractéristique de la crise). Le système d'étude regroupe les concepts relatifs aux *composants du système d'étude* regroupés en quatre catégories (les *biens* produits par les hommes, les *sites naturels*, les *populations* et les *sociétés civiles*). À ces composants du système d'étude sont adjointes des *caractéristiques* qui peuvent représenter la vulnérabilité du système et qui peuvent potentiellement engendrer des *risques*. Le volet relatif aux caractéristiques de la crise s'attache à considérer les éléments de la crise impactant le système d'étude précédemment décrit en distinguant les *conséquences* (faits de la crise) des facteurs de complexité (changeant le type de crise) et de gravité (changeant l'amplitude de la crise). Dans son positionnement par rapport au Métamodèle core collaboratif, la partie *système d'étude* étend la partie *Environnement de la collaboration*. La figure II.30 illustre cet héritage.

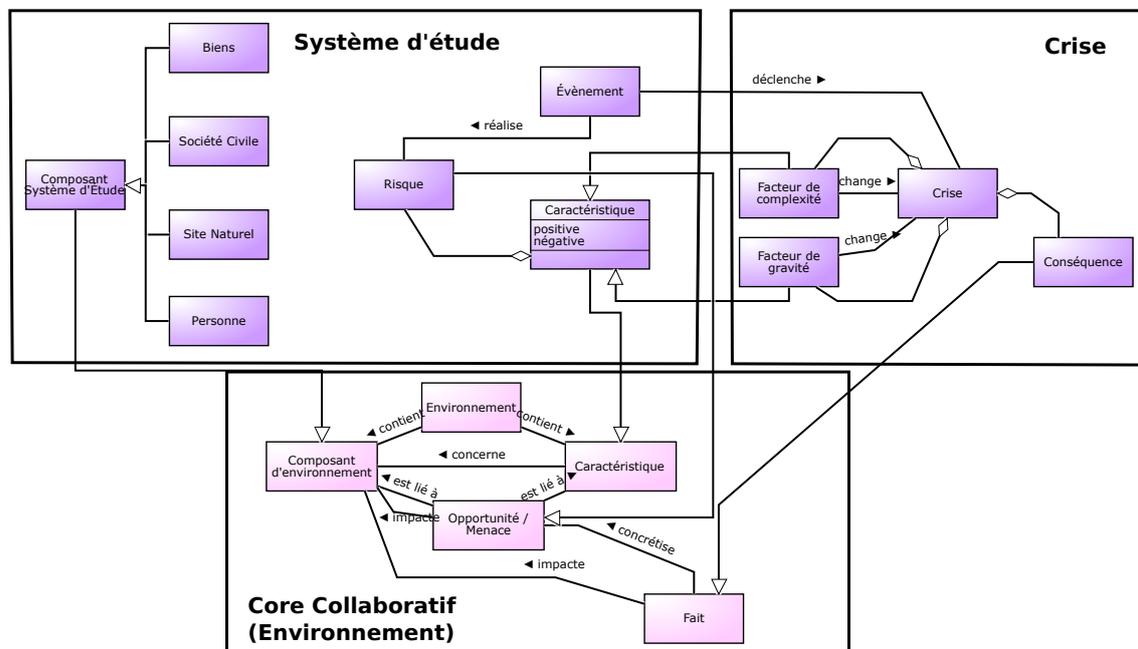


FIGURE II.30 – Les parties système d'étude et crise de la couche crise

La partie relative au système de traitement décrit les moyens déployables par les acteurs pour résoudre la situation de crise. Chaque *acteur* y est décrit par rapport au(x) *service(s)* qu'il est à même de mettre en œuvre et aux *ressources* qu'il est susceptible d'utiliser. Les services des acteurs sont reliés aux risques du système d'étude afin de pouvoir identifier les problèmes (risques et conséquences) de la crise auxquels ils répondent. Le recensement des acteurs présents pour assurer la réponse à la situation de crise et de leurs services se fait en général pendant la phase de préparation à la crise bien qu'il soit possible que cette étape soit faite au cours de la phase de réponse. Il est important de noter que les acteurs se décrivent auprès de la cellule de crise au niveau de granularité de services auxquels ils veulent être invoqués par la cellule de crise.

La figure II.31 illustre l'héritage existant entre les différents concepts du système de traitement ISyCri et ceux du métamodèle core collaboratif.

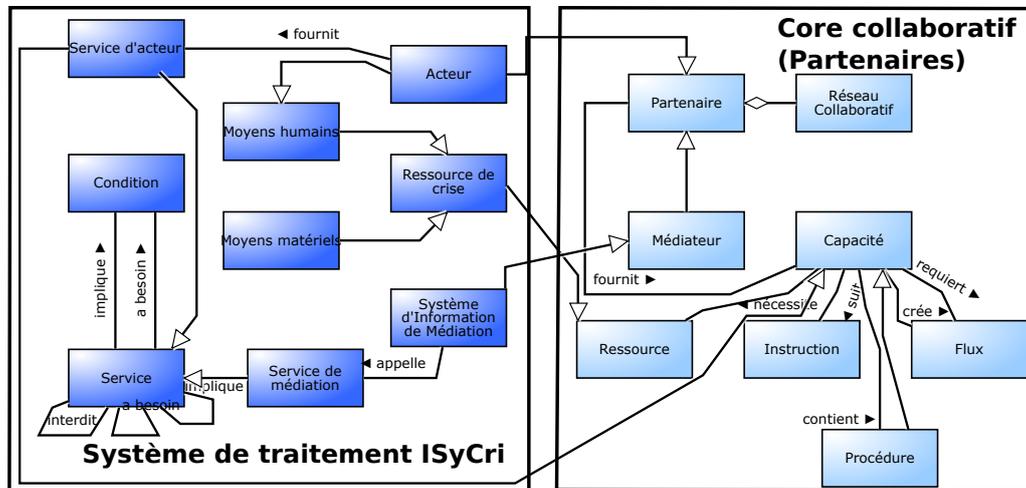


FIGURE II.31 – Partie système de traitement du métamodèle IsyCri

La troisième partie du métamodèle de crise ISyCri est relative au processus collaboratif mis en place pour assurer la réponse à la situation de crise. Le formalisme utilisé est celui de BPMN qui permet la description de processus collaboratifs. Cette partie de processus collaboratif est déduite à partir des éléments des systèmes d'étude et de traitement et des caractéristiques de la crise.

La démarche de déduction du processus collaboratif de réponse à une situation de crise se fait par confrontation des problèmes impactant la partie système d'étude avec les services des acteurs disponibles dans la partie système de traitement. Cette déduction fait appel à des règles d'inférence à quatre niveaux :

1. Les règles de propagation des liens sémantiques entre instances.
2. Les règles d'émergence des risques.
3. Les règles permettant de déduire les services utilisables pour la réponse à la situation de crise.
4. Les règles permettant un séquençement des activités déduites à l'étape précédente.

Ces règles reprennent celles issues de [Truptil, 2011] parmi lesquelles un tri a été fait, car certaines d'entre elles ont été généralisées au niveau métamodèle collaboratif convergent. Elles sont rappelées de manière exhaustive en annexe A.

II.3.2 Vers une ontologie d'application dédiée crise routière

Le métamodèle de situation de crise, bien que suffisamment couvrant pour répondre à des situations de crise génériques mérite toutefois d'être étendu pour répondre aux spécificités d'une crise routière. Le présent métamodèle est un résultat direct de ces travaux de thèse réalisés dans le contexte du projet SIMPeTra.

II.3.2.1 Métamodèle de crise routière

Les concepts du système d'étude Dans le cadre des travaux présentés dans ce manuscrit, nous nous attachons à proposer des outils et méthodes d'aide à la décision pour les crises routières. Ceci nous amène à spécifier le système d'étude de la crise grâce à des concepts relatifs aux crises routières. Pour chacun d'entre eux, il convient de distinguer les propriétés statiques des propriétés dynamiques (au sens d'évolution pendant a crise).

La cellule de crise pilotant la réponse à la situation de crise intervient au niveau zonal (échelle multi départementale). Aussi, le niveau de granularité inférieur se situe au niveau départemental avec un pilotage effectué par chaque préfecture. Ainsi, le concept de *Département* est caractérisé par son nom, sa géométrie⁹ (attributs statiques), son niveau de vigilance Météo France, son niveau PIZO et les autorisations de circulation des transports scolaires (attributs dynamiques). Si l'on change encore d'échelle et que l'on descend vers un niveau de granularité plus raffiné, on trouve le concept de *Commune* caractérisée par son nom, sa géométrie et sa capacité d'accueil en naufragés de la route (gymnase, centres d'accueil prédéfinis). Toutefois, la coordination des communes entre elles pour l'application de plans de réponse se déroulera au niveau départemental plutôt qu'au niveau zonal (échelle de notre étude).

Les concepts relatifs au réseau routier se trouvent organisés autour de la notion de *tronçon*. Un tronçon est un découpage d'un *Axe* avec la granularité la plus fine. Par conséquent, c'est celui qui porte le plus d'information. Ainsi il est caractérisé par une géométrie, un sens, des points de repère de début et de fin, un gestionnaire, une capacité maximale, une longueur (données statiques), un état de condition de conduite, des conditions météorologiques, un débit (véhicules légers et poids lourds). Les points de repère correspondent à des *Sommets* et peuvent être soit des *fins de route*, des *diffuseurs* (deux tronçons se rejoignent pour en former un) ou des échangeurs (sorties d'autoroute). L'*Axe* correspond à un ensemble de tronçons, et permet uniquement l'agrégation de données. Afin de pouvoir assurer l'interopérabilité avec les applications déjà existantes, le réseau routier respecte les normes imposées par le format DATEX¹⁰. Certains tronçons sont particuliers puisqu'ils permettent d'assurer le stockage de poids lourds en pleine voie. Ces *Zones de stockage* sont caractérisées par un identifiant unique, une géométrie, une capacité maximale, des points de repère de début et fin (données statiques), un statut (ouvert, fermé), un nombre de poids lourds stockés permettant le calcul d'un taux de remplissage. Un tronçon peut être impacté par un *danger*. Après discussion avec les experts métiers, quatre types de dangers ont été identifiés : les zones à pente, les ouvrages d'art (tunnels, pont), les zones sensibles au gel ou au vent et les zones à capacité réduite (absence de Bande d'Arrêt d'Urgence, rétrécissement).

Le diagramme de classes UML suivant (figure II.32) illustre le système d'étude SIM-

9. le terme de géométrie est entendu par rapport à la forme géométrique (ligne, polygone, point...) que prend le concept sur une carte.

10. DATEX (http://www.datex2.eu/datex-model/HTML.Version_2.0/index.htm) est un format européen de données qui normalise les échanges de données de trafic et d'information routière.

PeTra et les relations entre les différents concepts. Les classes grisées correspondent aux concepts issus de la couche crise.

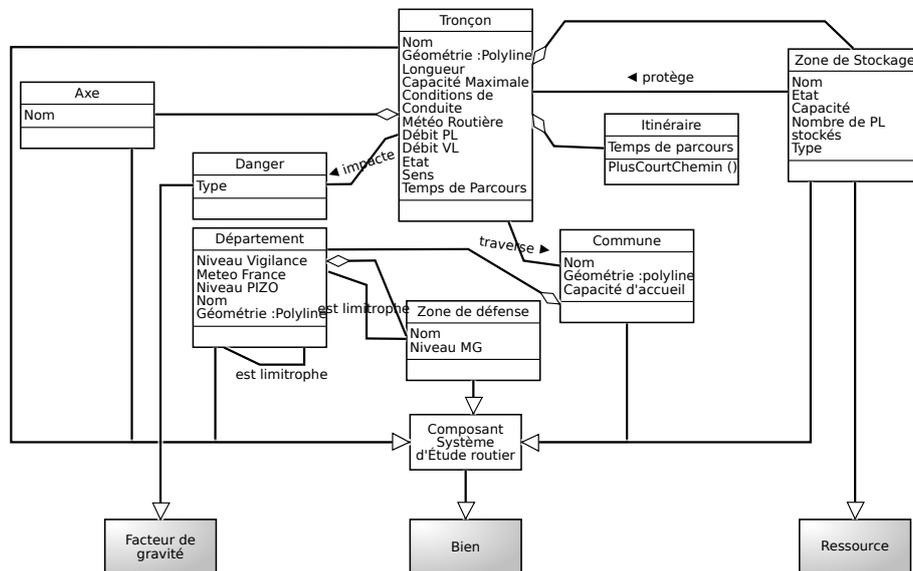


FIGURE II.32 – Système d'étude SIMPeTra

Les concepts de la crise À partir d'une étude menée avec les experts du CRICR de l'Ouest, les risques suivants ont été identifiés dans le cadre d'une crise routière due aux intempéries hivernales :

- Le risque de perturbation du trafic : il s'agit du risque le plus fréquemment rencontré dans le cadre d'une crise routière et se caractérise à l'échelle du tronçon. Il est concrétisé par une forte diminution de la vitesse moyenne des véhicules, le trafic pouvant être totalement bloqué (vitesse moyenne < 10% de la vitesse normale), bouché (vitesse moyenne < 25% de la vitesse normale) ou simplement ralenti (vitesse moyenne < 75% de la vitesse normale). Il existe une distinction entre la perturbation du trafic poids lourds et celle des véhicules légers. Les facteurs de risque identifiés pour l'apparition du risque de perturbation du trafic sont :
 - L'apparition de conditions météorologiques défavorables comme la pluie, le brouillard ou la neige entraîne une diminution de la visibilité des conducteurs et de surcroît une diminution de la vitesse moyenne des véhicules.
 - La dégradation des conditions de conduite avec notamment la présence de neige ou de verglas sur la chaussée forçant les usagers à réduire considérablement leur vitesse.
 - Le fort trafic présent sur le tronçon fait apparaître une augmentation de la charge de trafic et de son taux de saturation. Le fort trafic se retrouve souvent aux heures de pointe en semaine (7h-9h et 17h-19h) aux abords des agglomé-

rations et lors de flux migratoires importants certains week-ends de départs en vacances.

- La présence d'accidents de la circulation sur le tronçon impacté peut entraîner une forte perturbation du trafic allant jusqu'à une paralysie totale de ce dernier (poids lourd en travers de la chaussée).
- Le risque d'accident de la route : ce risque existe à tout moment sur tous les tronçons autoroutiers, mais il est accru en période de crise routière. En effet, de manière générale, les accidents de la circulation ont une probabilité d'occurrence plus importante lorsque les conditions climatiques sont considérées comme mauvaises. Il convient également de faire une distinction entre accident poids lourds et accident véhicules légers de par les conséquences que cela entraîne sur l'ensemble de la circulation routière. De même, on distingue les accidents matériels des accidents corporels et mortels, car les acteurs impliqués dans la réponse à cette situation ne sont pas les mêmes. Aussi, les facteurs de risques associés aux accidents de la route sont sensiblement identiques à ceux identifiés pour le risque de perturbation du trafic à savoir :
 - Des conditions météorologiques dégradées augmentent la probabilité d'un survenue d'un accident de la route.
 - La dégradation des conditions de conduite correspond souvent à une chaussée devenue glissante augmentant considérablement la probabilité d'apparition d'un accident de la route.
 - Plus le trafic est dense, plus le nombre de véhicules est important et mécaniquement, la probabilité d'apparition d'un accident augmente avec le trafic.
- Le risque sanitaire correspond à l'apparition de naufragés de la route sur les tronçons du système d'étude. Il s'agit d'un risque dont l'impact est très important, car s'il se concrétise, les conséquences pour la gestion de crise sont considérables. En effet, pour résoudre une situation avec des naufragés de la route, la cellule de crise routière doit se coordonner avec la cellule de crise de sécurité civile pour assurer la prise en charge des usagers bloqués en leur assurant une alimentation et un hébergement décent. La concrétisation du risque sanitaire fait suite à une circulation totalement bloquée sur le tronçon pendant une durée dépassant l'échelle de l'heure.
- Le risque de perturbation économique correspond au ralentissement de l'activité économique pendant la période de crise routière. Ce risque (contrairement aux précédents) n'impacte pas un tronçon en particulier, mais toute une zone économique (ensemble de plusieurs départements). Les échanges routiers peuvent se trouver totalement arrêtés et de nombreux retards dans les livraisons peuvent intervenir. Ceux-ci sont d'autant plus graves lorsque la crise survient au moment des fêtes de fin d'année (comme ce fut le cas en décembre 2010).
- Le risque de saturation d'une zone de stockage correspond au risque de voir une zone stockage complètement remplie et ne pouvant pas accueillir de poids lourds supplémentaires. Ce risque apparaît lorsqu'une zone de stockage a un taux de remplissage de plus de 75%.

Risque	Composant du système d'étude impacté	Facteur de risque (cause)	Composante du risque impactée
Perturbation du trafic	Tronçon	Conditions météorologiques défavorables	Probabilité
		Dégradation des conditions de conduite	Probabilité
		Trafic dense	Impact
		Accident de la circulation	Impact
Accident de la circulation	Tronçon	Conditions météorologiques défavorables	Probabilité
		Dégradation des conditions de conduite	Probabilité
		Trafic dense	Probabilité
Sanitaire	Tronçon	Circulation bloquée sur le tronçon	Impact
Perturbation économique	Zone économique	Circulation bloquée	Impact
Saturation ZDS	Zone de stockage	Trafic dense	Probabilité

TABLE II.8 – Les risques et facteurs de risques du métamodèle de crise routière

Les concepts du système de traitement Le système de traitement comprend tous les acteurs identifiés et les compétences qu'ils vont mettre en œuvre pour la résolution de crise routière. Le recensement des acteurs et de leurs services se fait en général lors de la phase de préparation à la crise routière, lors de l'élaboration des plans de réponse. Toutefois, il est possible que cette liste Acteurs/Compétences soit mise à jour pendant la réponse à la situation de crise. Les compétences apportées par un acteur sont associées au risque ou à la conséquence à laquelle ils viennent répondre. Dans une situation de crise routière, les acteurs suivants sont à même d'intervenir dans la réponse :

- Le Préfet Délégué à la Défense et à la Sécurité (PDDS) apporte une assistance au Préfet de Zone pour les missions relatives à la circulation routière. Il a une délégation de pouvoir pour valider et signer les projets d'arrêtés (fermeture d'axe, ouverture de zone de stockage) sur l'ensemble de toute la zone. Il arbitre et tranche les décisions pouvant être contradictoires entre deux départements. Son rôle est uniquement décisionnel au niveau zonal.
- Les Préfectures de Département assurent l'application des mesures de police sur leur département en coordonnant la mise en œuvre des mesures de gestion de trafic sur le réseau routier de leur département. Elles assurent également une mission de support en centralisant la surveillance du trafic sur le territoire qui leur incombe et en remontant ces informations auprès de la cellule de crise routière.
- L'Etat Major Interministériel de Zone (EMIZD) est sous la direction du PDDS et coordonne les actions de secours au niveau zonal. Il est en charge de tout le volet sécurité civile des différents plans zonaux. L'EMIZD n'intervient dans la crise routière que lorsque des mesures de secours aux usagers doivent être mises en œuvre.
- Les gestionnaires routiers (public ou privées) sont en charge de la viabilisation du réseau en réalisant des opérations de déneigement. Ils sont en charge de la signalisation et du balisage lors de mise en œuvre d'une mesure de gestion de trafic

- après publication d'un arrêté. Ils assistent la cellule de crise en surveillant l'état du réseau (conditions de conduite et de trafic) et en diffusant les informations concernant les mesures de circulation en vigueur. Leur rôle est donc à la fois opérationnel et de support dans la réponse à la gestion de crise routière.
- Météo France vient en support de la cellule de crise en fournissant des bulletins météorologiques traduisant de l'évolution possible des conditions météorologiques. Dans les situations de crise routière, un expert Météo France est mis à disposition de la cellule de crise permettant une analyse en temps réel de la situation.
 - La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) apporte son support à la cellule de crise dans la rédaction des arrêtés de prise de mesure de gestion de trafic.
 - Les forces de l'ordre (Police et Gendarmerie) mettent en œuvre les mesures de gestion du trafic, notamment les mesures de stockage des poids lourds. Ils sont également en lien direct avec la cellule de crise pour lui communiquer des informations sur d'éventuelles perturbations de la circulation (accidents) et sur l'état d'avancement des mesures de gestion de trafic (nombre de poids lourds stockés dans les zones de stockage, activation des MGT).
 - Les zones de défense limitrophes agissent en concertation avec la zone de défense Ouest pour la mise en œuvre des plans intempéries sur les axes qu'elles peuvent avoir en commun.
 - Le Centre Régional d'Information et de Coordination Routière (CRICR) est le siège de la cellule de crise. Son rôle principal est d'analyser la situation de crise et de proposer au PDDS des mesures de gestion de trafic en conséquence. Il centralise donc toutes les informations sur les conditions météorologiques et les conditions de circulation provenant du terrain. D'autre part, il organise la diffusion de l'information aux usagers.

II.3.2.2 Exploitation de l'ontologie

L'alimentation de la base de connaissance L'alimentation de l'ontologie de crise routière se fait de deux manières différentes :

- À partir d'informations récupérées depuis des systèmes d'information tiers ;
- Au travers d'une interface utilisateur (modeleur de situation de crise).

Il est évident qu'un enjeu important réside dans l'alimentation automatique de la base de connaissances depuis d'autres systèmes d'information. En effet, la lourdeur de la saisie d'information vient contraster avec l'automatisation de celle-ci. De plus ceci permet d'éviter les doubles saisies et donc les erreurs conséquentes. Le tableau II.9 reprend les systèmes d'information existants susceptibles de venir alimenter automatiquement l'ontologie et dans quelle mesure.

Le modeleur de situation de crise permet à un utilisateur au sein de la cellule de crise de rajouter de nouvelles instances dans l'ontologie de gestion de crise grâce à une interface Web. Les informations recensées peuvent provenir de sources externes (forces de l'ordre par téléphone, gestionnaires routiers par fax) ou internes (instanciation d'un

Système d'information	Acteur	Connaissance capitalisée
OPTICCO	CRICR	Structure du réseau routier
		Structure des départements
		Structure des zones de stockage
Vigi Météo	Meteo France	Niveau de vigilance météo des départements
SERPE-VH	Gestionnaires routiers	Conditions de conduite
OPTIMA	Meteo France	Conditions météorologiques

TABLE II.9 – Liste des systèmes d'information interfacés avec l'ontologie de gestion de crise routière

risque ou d'un fait) à la cellule de crise. La figure II.33 est une capture d'écran de ce modèleur.

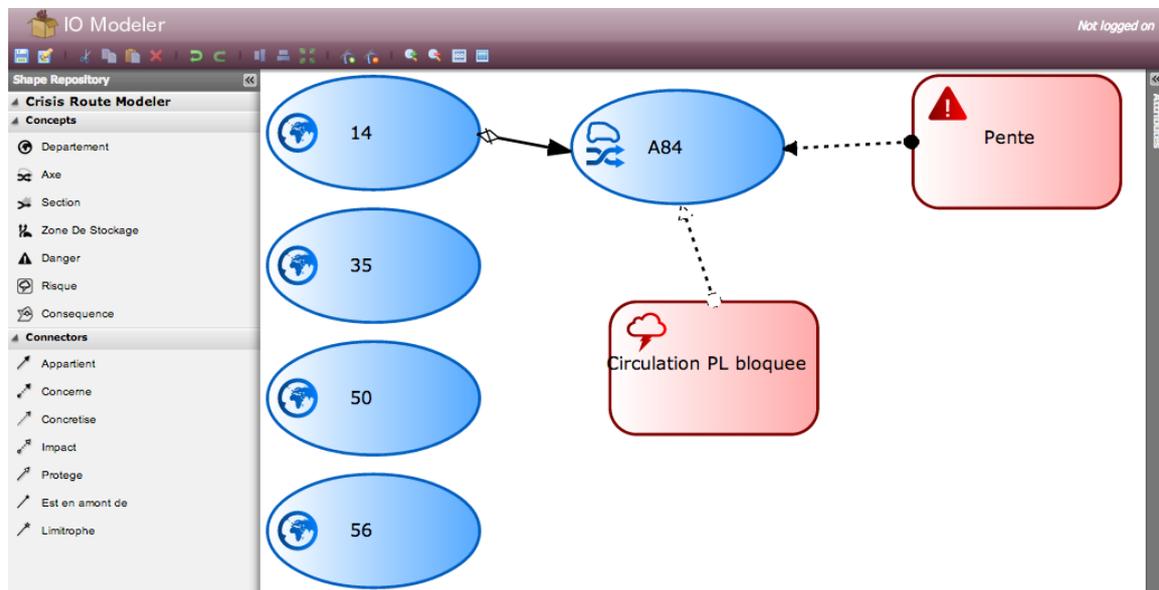


FIGURE II.33 – Modèleur de situation de crise routière

L'enrichissement de la base de connaissance L'enrichissement de la base de connaissance se fait en menant des raisonnements d'inférence sur les instances déjà présentes au sein de la base de connaissance. Ces mécanismes permettent de faire émerger de nouvelles connaissances en se basant sur des règles de production de connaissance. Ainsi, à partir de conjonctions de faits, ces règles d'inférence permettent la création de nouvelles connaissances dans l'ontologie.

Règle 1 : Apparition du risque d'accident de poids lourds

$Tronçon(?x)$	\wedge	$ConditionsMeteo(?x, "neige")$	\wedge
$(ConditionsConduite(?x, "C2")$	\wedge	$Danger(?y)$	\vee
$ConditionsConduite(?x, "C3"))$	\wedge	$concerne(?y, ?x)$	\wedge
$swrlx$	$:$	$makeOWLThing(?a, ?x)$	\rightarrow
$impacte(?a, ?x)$		$RisqueAccidentPoidsLourds(?a)$	\wedge

Cette règle repose sur le fait que, sur un tronçon « x », si les conditions météorologiques sont hivernales et que les conditions de conduite sont identifiées comme « $C3$ » ou « $C2$ » avec un danger « y » concernant ce tronçon, alors un risque d'accident poids lourds « a » impactant ce tronçon apparaît.

Règle 2 : Lien entre accident de la circulation et perturbation du trafic

$Tronçon(?x) \wedge AccidentDeLaCirculation(?y) \wedge Impacte(?x, ?y) \wedge swrlx$	$:$
$makeOWLThing(?a, ?x)$	\rightarrow
$impacte(?a, ?x)$	\wedge
	$RisquePerturbationDuTrafic(?a)$

Cette règle met en évidence le fait qu'un accident de la circulation « y » impactant un tronçon « x » engendre un risque de perturbation du trafic « a » sur ce tronçon.

Règle 3 : Apparition du risque de perturbation du trafic

$Tronçon(?x) \wedge Trafic(?x, "dense") \wedge (ConditionsConduite(?x, "C2") \vee$	\vee
$ConditionsConduite(?x, "C3")) \wedge swrlx$	$:$
$makeOWLThing(?a, ?x)$	\rightarrow
$RisquePerturbationDuTrafic(?a) \wedge impacte(?a, ?x)$	

Cette règle affirme que si les conditions de conduite sont « $C2$ » ou « $C3$ » sur un tronçon « x » et que le trafic y est identifié comme « $dense$ » alors il existe un risque de perturbation « a » du trafic impactant ce tronçon.

Règle 4 : Apparition du risque sanitaire

$Tronçon(?x) \wedge ConditionsConduite(?x, "C4") \wedge swrlx$	$:$
$makeOWLThing(?a, ?x)$	\rightarrow
$RisqueSanitaire(?a) \wedge impacte(?a, ?x)$	

Cette règle illustre le fait que si la circulation est bloquée (conditions de circulation « $C4$ ») sur un tronçon « x » alors il existe un risque sanitaire « a » (naufragés de la route) impactant ce tronçon.

Règle 5 : Apparition d'un risque d'accident de la circulation

$Tronçon(?x) \wedge Trafic(?x, "dense") \wedge (ConditionsConduite(?x, "C2") \vee$	\vee
$ConditionsConduite(?x, "C3")) \wedge ConditionsMeteo(?x, "neige") \wedge swrlx$	$:$
$makeOWLThing(?a, ?x)$	\rightarrow
$impacte(?a, ?x)$	\wedge
	$RisqueAccidentDeLaCirculationVL(?a)$

Cette règle s'applique lorsque les conditions de conduite sont « $C2$ » ou « $C3$ » et que le trafic est « *dense* » et que la météo routière est « *neigeuse* » sur un tronçon « x » alors il existe un risque d'accident de la circulation « a » sur ce tronçon.

Règle 6 : Apparition du risque de perturbation économique

$$\begin{array}{l} \text{Departement}(?x) \quad \wedge \quad \text{Tronçon}(?y) \quad \wedge \quad \text{Appartient}(?y, ?x) \quad \wedge \\ \text{ConditionsConduite}(?y, "C4") \quad \wedge \quad \text{swrlx} \quad : \quad \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \\ \rightarrow \text{RisquePerturbationEconomique}(?a) \wedge \text{impacte}(?a, ?x) \end{array}$$

Cette règle illustre le fait qu'une circulation bloquée (conditions de conduite « $C4$ ») sur un tronçon « y » appartenant à un département « x » induit un risque de perturbation économique sur ce tronçon.

Règle 7 : Apparition du risque de saturation d'une zone de stockage

$$\begin{array}{l} \text{ZoneDeStockage}(?x) \quad \wedge \quad (\text{TauxDeRemplissage}(?x) \geq 0.75) \quad \wedge \quad \text{swrlx} \quad : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{RisqueSaturationZDS}(?a) \wedge \text{concerne}(?a, ?x) \end{array}$$

Cette règle stipule que si le taux de remplissage d'une zone de stockage « x » est supérieur 75 % alors un risque de saturation « a » de cette zone apparaît.

Règles de déduction d'objectif et de mesures de gestion de trafic Dans cette partie sont décrites les règles qui permettent, à partir des risques identifiés précédemment de déduire les objectifs associés à la réduction de ces risques. Les mesures de gestion de trafic viennent alors contribuer à ces objectifs et sont donc déduites dans un second temps. Les règles de prise de mesure de gestion de trafic ont été identifiées à la lecture du PIZO et à la rencontre des experts métiers du CRICR. Ces règles identifient les décisions à prendre pour résoudre la situation de crise. À chacune de ces décisions est associé un processus de mise en œuvre de cette décision. Ces processus ont été formalisés depuis le PIZO dans le langage BPMN.

Règle 1 : Objectif aucun poids lourd sur un tronçon

$$\begin{array}{l} \text{Tronçon}(?x) \wedge \text{RisqueAccidentPL}(?y) \wedge \text{impacte}(?y, ?x) \wedge \text{Etat}(?x, "ouvert") \wedge \\ \text{swrlx} \quad : \quad \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{Objectif}(?a, "AucunPoidsLourds") \wedge \\ \text{concerne}(?a, ?x) \end{array}$$

Si, il existe un risque d'accident de poids lourds « y » sur un tronçon « x » dont l'état est ouvert, alors un objectif d'aucun poids lourd « a » concerne ce tronçon.

Règle 2 : Objectif d'activation d'une nouvelle zone de stockage

$$\begin{array}{l} \text{ZoneDeStockage}(?x) \quad \wedge \quad \text{ZoneDeStockage}(?y) \quad \wedge \quad \text{enAmontDe}(?x, ?y) \quad \wedge \\ \text{Etat}(?y, "Fermée") \quad \wedge \quad \text{RisqueSaturationZDS}(?z) \quad \wedge \quad \text{swrlx} \quad : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?y) \rightarrow \text{ObjectifOuvertureZDS}(?a) \wedge \text{concerne}(?a, ?y) \end{array}$$

Cette règle stipule que si une zone de stockage « x » présente un risque « z » de saturation, alors un objectif d'ouverture « a » de la zone de stockage « y » amont de « x » est créé.

Règle 3 : Objectif aucun véhicule sur un tronçon

$$\boxed{\text{Tronçon}(?x) \wedge \text{RisqueSanitaire}(?y) \wedge \text{impacte}(?y, ?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \rightarrow \text{Objectif}(?a, \text{"AucunVéhicule"}) \wedge \text{concerne}(?a, ?x)}$$

Si un risque sanitaire « y » impacte un tronçon « x » alors un objectif « Aucun véhicule » « a » apparaît sur ce tronçon.

La table II.10 lie les objectifs présentés précédemment aux différentes mesures de gestion de trafic qui peuvent être prises. La colonne « implique » traduit le lien de nécessité existant entre plusieurs mesures de gestion de trafic. Par exemple la fermeture aux poids lourds d'un axe implique l'ouverture d'une zone de stockage protégeant cet axe.

Objectif	Mesure de gestion de trafic	Implique
Aucun Poids lourds	Fermeture aux poids lourds	Ouverture Zone De Stockage
	Itinéraire conseillé de contournement	
Activation nouvelle Zone De Stockage	Ouverture Zone De Stockage	
Aucun véhicule	Fermeture tout véhicule	Ouverture Zone De Stockage
		Itinéraire obligatoire de contournement

TABLE II.10 – Lien entre objectifs et mesures de gestion de trafic

Règles de changement de niveau PIZO En situation de crise routière hivernale, il existe un cadre légal pour faciliter la prise de décision. Celui-ci est inscrit dans le Plan Intempérie Zone de l'Ouest. Aussi, le plan intempéries est organisé en 4 niveaux en fonction de l'état d'urgence dans lequel se trouve la crise. À partir du PIZO il nous a été possible de formaliser en SWRL les règles de changement de niveau.

Règle de passage en niveau 1

$$\boxed{\text{Département}(?x) \wedge \text{NiveauVigilanceMeteoFrance}(?x, \text{"vert"}) \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, \text{"1"})}$$

Cette règle stipule que si un département « x » est en niveau vigilance météo vert, alors il doit être en PIZO niveau 1.

Règles de passage en niveau 2

$$\boxed{\text{Département}(?x) \wedge \text{NiveauVigilanceMeteoFrance}(?x, \text{"orange"}) \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, \text{"2"})}$$

Cette règle stipule que si un département « x » est en niveau vigilance météo orange, alors il doit être en PIZO niveau 2.

$$\boxed{\text{Département}(?x) \wedge \text{Département}(?y) \wedge \text{estLimitrophe}(?x, ?y) \wedge \text{NiveauPIZO}(?y, \text{"3"}) \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, \text{"2"})}$$

Cette règle stipule que si un département « x » est limitrophe d'un département « y » en PIZO niveau 3, alors il doit être en PIZO niveau 2.

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Département}(?x) \wedge \text{ZoneDeDéfense}(?y) \wedge \text{estLimitrophe}(?x, ?y) \wedge \\ \text{NiveauMG}(?y, "2") \vee \text{NiveauMG}(?y, "3") \rightarrow \\ \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, "2") \end{array}}$$

Cette règle stipule que si un département « x » est limitrophe d'une zone de défense limitrophe « y » dont le niveau d'activation Mesure de Gestion est MG2 ou MG3¹¹, alors il doit être en PIZO niveau 2.

Règles de passage en niveau 3

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Département}(?x) \wedge \text{Tronçon}(?y) \wedge \text{appartient}(?y, ?x) \wedge \text{MGT}(?z) \wedge \\ \text{concerne}(?z, ?y) \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, "3") \end{array}}$$

Cette règle propose le passage en niveau 3 d'un département « x » si un tronçon « y » lui appartenant est concerné par une Mesure de Gestion de Trafic « z ».

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Département}(?x) \wedge \text{Département}(?y) \wedge \text{estLimitrophe}(?x, ?y) \wedge \\ \text{NiveauPIZO}(?y, "4") \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, "3") \end{array}}$$

Cette règle stipule que si un département « x » est limitrophe d'un département « y » en PIZO niveau 4, alors il doit être en PIZO niveau 3.

Règles de passage en niveau 4

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Département}(?x) \wedge \text{Tronçon}(?y) \wedge \text{appartient}(?y, ?x) \wedge \text{MSU}(?z) \wedge \\ \text{concerne}(?z, ?y) \rightarrow \text{ChangementNiveauPIZO}(?x, "4") \end{array}}$$

Cette règle propose le passage en niveau 4 d'un département « x » si un tronçon « y » lui appartenant est concerné par une Mesure de Secours aux Usagers (naufragés de la route) « z ».

La table II.11 propose de synthétiser ces règles.

11. La zone Ouest est un cas particulier dans les plans zonaux en France. En effet, dans la zone Ouest on parle de niveau PIZO (1 à 4) tandis que dans les autres zones on raisonne en « Mesures de Gestion » (de 1 à 9). Les niveaux MG2 et MG3 des autres zones sont équivalents au niveau 3 PIZO.

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Niveau 1		Carte de Vigilance orange Département limitrophe en niveau 3 ou 4 Zone de défense limitrophe en MG2 ou MG3	Carte de vigilance orange et (zone sensible ou conditions de conduite C3/C4) Département limitrophe en niveau 4	Blessés sur un axe Naufragés de la route Conditions de conduite C4 sur tronçon non fermé
Niveau 2	Carte de vigilance verte		Carte de vigilance orange et (zone sensible ou conditions de conduite C3/C4) Département limitrophe en niveau 4	Blessés sur un axe Naufragés de la route Conditions de conduite C4 sur tronçon non fermé
Niveau 3	Carte de vigilance verte	Aucune MGT sur le département Conditions de conduite C2		Blessés sur un axe Naufragés de la route Conditions de conduite C4 sur tronçon non fermé
Niveau 4	Carte de vigilance verte	Aucune MGT sur le département Conditions de conduite C2	Pas de mesures de secours aux usagers en cours	

TABLE II.11 – Tableau récapitulatif des changements de niveau PIZO

II.3.2.3 Synthèse

Tout au long de cette section, nous avons cherché à définir une ontologie support de la réponse à une situation de crise routière. Nous avons proposé que sa structuration soit faite en couches, à l'image d'un fruit (une pêche par exemple) : l'amande amère (intérieur du noyau) correspondant à l'ontologie SUMO, le noyau étant assimilable au métamodèle collaboratif convergent, la chair prenant le rôle de l'ontologie de crise et la peau celui de l'ontologie de crise routière. Il existe ainsi un héritage entre chacune des couches de l'ontologie définie, ce qui permet également un héritage des règles de déduction s'y appliquant. La figure II.34 propose une vue de l'ensemble de ce métamodèle.

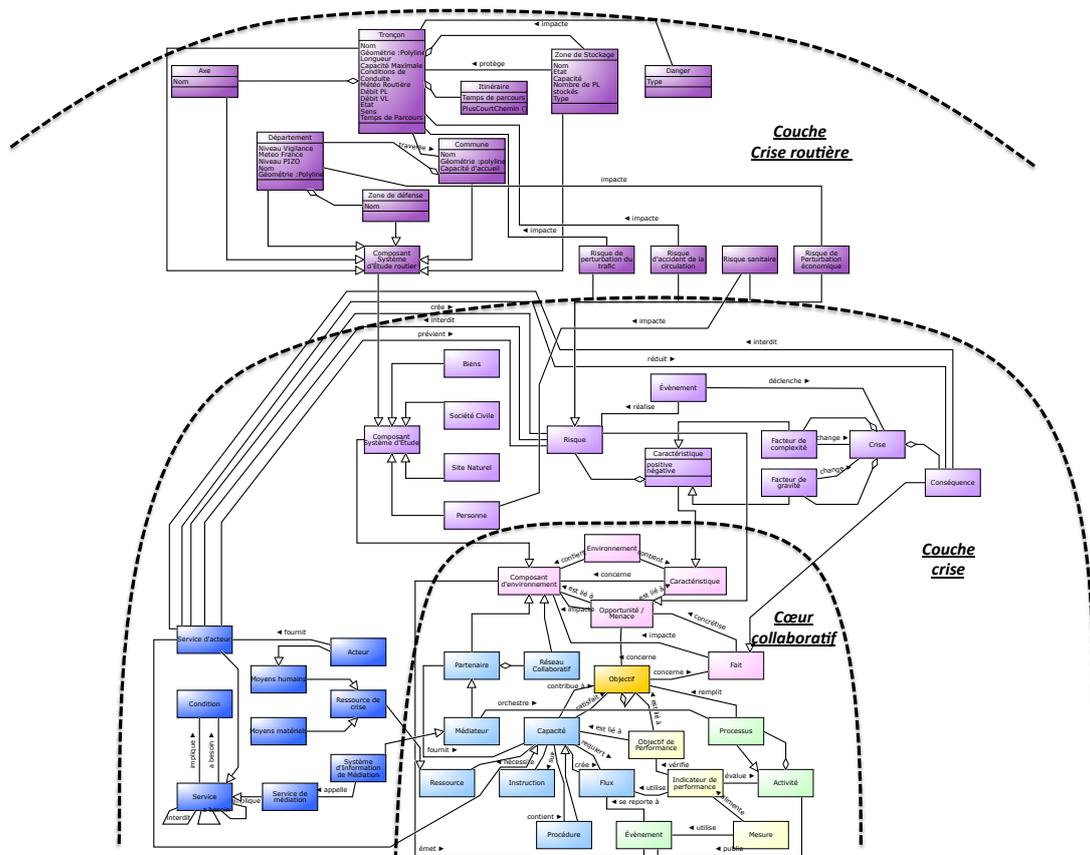


FIGURE II.34 – Le Métamodèle Core et la couche Crise Routière

II.3.3 Cas d'école

Le cas d'école présenté ci-après reprend une partie des événements de l'exercice Plan Intempéries Zone de l'Ouest réalisé en novembre 2012. Cet exercice développé par le CETE de l'Ouest présente des éléments crédibles très fortement inspirés des événements de la crise hivernale de 2010. Les épisodes neigeux qui se sont produits en décembre 2010 sur l'Ouest de la France ont été déclarés d'ampleur exceptionnelle, les deux chiffres suivants illustrant effectivement le caractère singulier des événements : jusqu'à 6000 poids

lourds ont été stockés en une journée et plus de 50 arrêtés zonaux ont été signés sur une période de 30 jours. Pour développer notre cas d'école, il ne nous a pas semblé opportun de développer l'exercice PIZO dans sa totalité, mais de simplement nous focaliser sur un évènement de cet exercice à savoir :

- À 13h00, les pluies verglaçantes sont soutenues dans les côtes d'Armor et la DIRNO (Direction Interdépartementale des Routes Nord Ouest) indique que les conditions de conduite sont « C3 » sur cet axe entre Saint-Brieuc et Montauban de Bretagne.

II.3.4 Rappel de la démarche générale

L'objectif de notre démarche est de déduire un processus collaboratif de réponse à la situation de crise proposée par la description précédemment faite. Pour cela nous allons utiliser le mécanisme décrit dans la figure II.26 construit à partir des quatre étapes suivantes :

1. Identification des objectifs de la collaboration
2. Construction du réseau des partenaires
3. Construction du processus collaboratif
4. Mise en place du système de performance

Dans le cadre du développement de notre ontologie de crise routière, nous ne nous sommes focalisés que sur les points 1 et 2, car, d'une part, les processus collaboratifs étaient déjà construits dans le PIZO, et d'autre part, nous n'avons pas développé de système de performance pour la crise routière.

II.3.4.1 Identification des objectifs de la collaboration

Cette première partie du mécanisme se fait en trois temps : (i) la caractérisation de la situation collaborative (ii) l'émergence d'opportunités et de menaces (iii) la mise en place des objectifs de collaboration associés.

Caractérisation de la situation collaborative (situation de crise) Cette première étape consiste en la description de la situation de crise. Pour cela, nous considérons l'axe RN12 entre les villes de Rennes et Guingamp avec un découpage en six tronçons orienté : Rennes-Montauban de Bretagne, Montauban-Rennes, Montauban de Bretagne-Saint Brieuc, Saint Brieuc-Montauban de Bretagne, Saint Brieuc-Guingamp et Guingamp-Saint Brieuc. Le tronçon Guingamp-Saint Brieuc possède une zone de stockage, tout comme le tronçon Rennes-Montauban de Bretagne. La figure II.35 donne le modèle de cette situation.

Émergence d'opportunités et de menaces Cette deuxième étape consiste à mener des raisonnements d'inférence sur la base de connaissances pour faire le modèle précédent pour en enrichir le contenu. Il s'agit dans notre cas de faire émerger les risques propres à

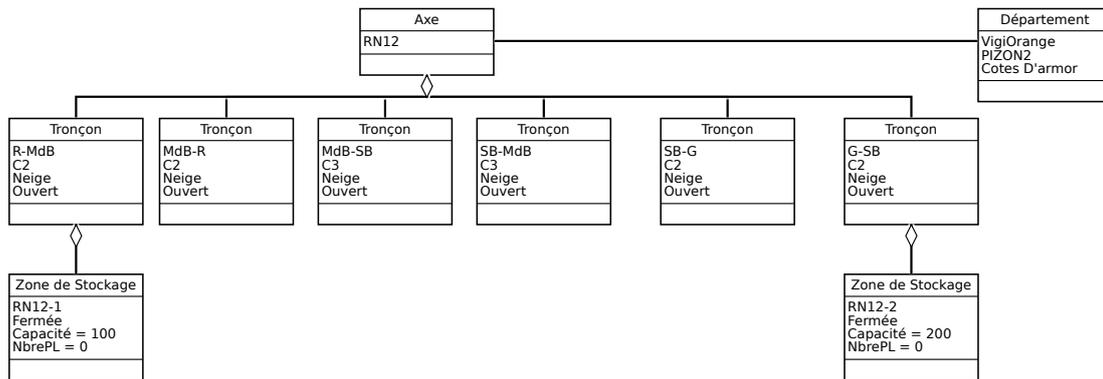


FIGURE II.35 – Modèle initial de la situation de crise routière

notre situation. L'application des 7 règles d'enrichissement présentées permettent de faire apparaître le risque d'accident poids lourds sur les tronçons Montauban de Bretagne-Saint Brieuc, Saint Brieuc-Montauban de Bretagne. En effet toutes les conditions sont réunies (neige, conditions de conduite C3) pour que le risque de poids lourds apparaisse. La figure II.36 donne le modèle de cette situation (instances des concepts de la couche crise routière).

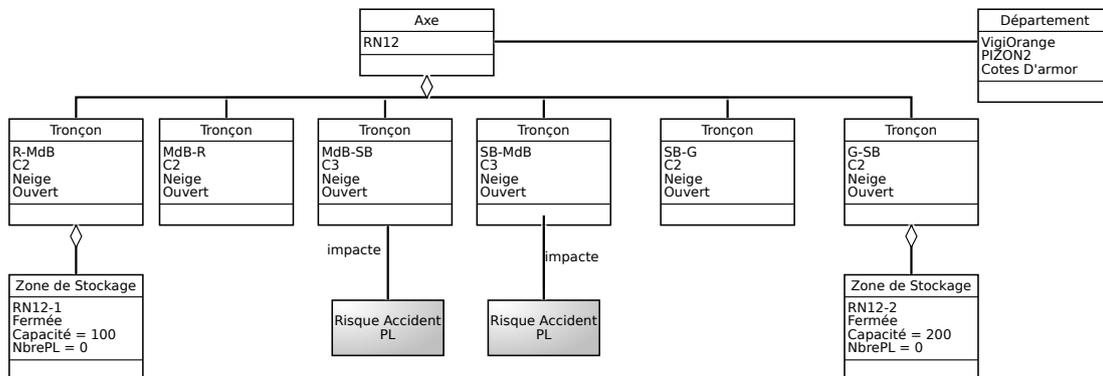


FIGURE II.36 – Modèle de la situation après enrichissement de la base de connaissances

Mise en place des objectifs À partir de la situation caractérisée à l'étape précédente, il s'agit de déduire les objectifs de la collaboration pour la mise en oeuvre des processus de réponse à la situation de crise. Cette déduction se base sur le jeu de règles relatif aux Mesures de Gestion de Trafic. L'application de ces règles permet de déduire les objectifs « Aucun poids lourd » sur les tronçons Montauban de Bretagne-Saint Brieuc, Saint Brieuc-Montauban de Bretagne. En effet, la simple présence d'un risque d'accident de poids lourds sur ces axes implique la création d'un objectif « Aucun Poids Lourd ».

En toute logique, à l'issue de cette étape se trouve le choix de priorisation des objectifs

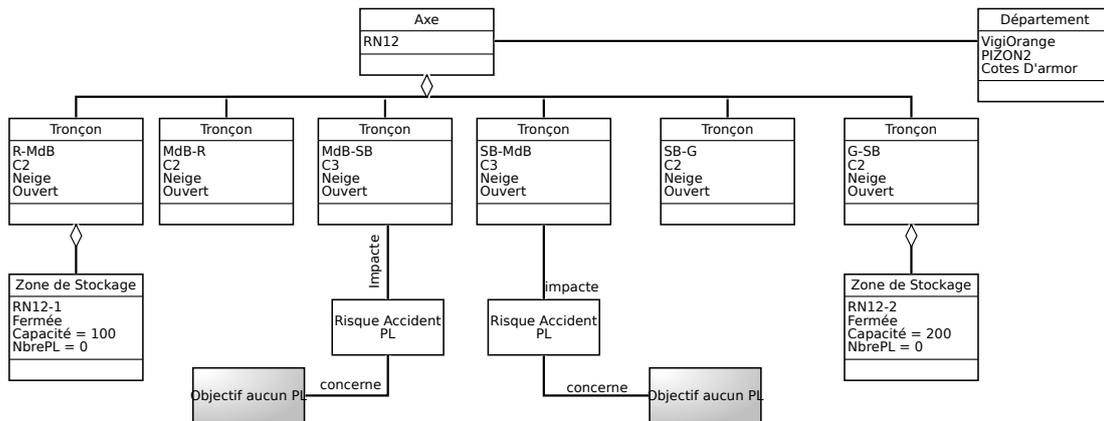


FIGURE II.37 – Modèle de la situation après la mise en place des objectifs

déduits. Il est proposé aux décideurs de se positionner quant à l'urgence des objectifs déduits. Sur notre cas d'école, cette étape ne semble que très peu opportune (deux objectifs portant sur le même tronçon), mais elle peut s'avérer beaucoup plus importante et stratégique dans le cas où les problèmes impactent plusieurs zones géographiques à la fois. De cette priorisation peut notamment découler le déploiement prioritaire de ressources dans telle ou telle zone.

II.3.4.2 Construction du réseau des partenaires

Cette étape se base sur la réconciliation entre acteurs, prérequis et objectifs de la collaboration pour déduire quelles vont être les activités sélectionnées dans la réponse. Dans notre cas, il s'agit de trouver la correspondance entre les objectifs de la collaboration et les mesures de gestion de trafic dont dispose le décideur. À l'objectif « Aucun poids lourd » sont associées les MGT de fermeture aux poids lourds et d'itinéraire conseillé de contournement. Le choix est alors laissé au décideur entre ces deux mesures. Dans notre cas, le décideur choisit l'option de fermeture PL aux poids lourds.

Cette mesure de gestion de trafic implique alors les deux prérequis suivants :

- l'ouverture d'une Zone De Stockage poids lourds.
- le passage en PIZO niveau 3 du département impacté.

La figure II.38 présente un processus de passage en PIZO niveau 3 pour un département tel qu'il a été formalisé lors de la phase de préparation de la gestion de crise. Il s'agit d'une procédure "standard" mise en œuvre lorsque la cellule de crise souhaite activer le niveau 3 du plan PIZO pour un département.

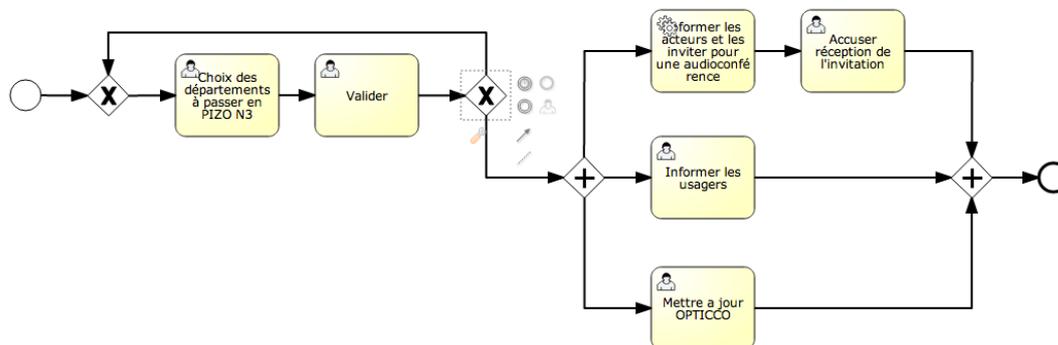


FIGURE II.38 – Processus de prise de mesure de gestion de trafic

II.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de construire un « réceptacle » de connaissances pour formaliser et exploiter la connaissance relative à une crise routière. Parmi les systèmes à base de connaissances existants, notre choix s'est porté sur les ontologies notamment grâce à leur capacité à fournir une connaissance partagée et consensuelle. La construction de notre ontologie s'est faite en couche : d'un noyau collaboratif (contribution collective) vers une couche crise (héritage des travaux de [Truptil, 2011]) et une extension finale vers une couche dédiée crise routière. Un des points forts de cette structuration est l'héritage existant entre les concepts des différentes couches, mais aussi des règles d'exploitation. Par ailleurs, l'exécution des règles présentées permet l'enrichissement de la base de connaissance puis la mise en place de processus collaboratifs. Dans le cadre spécifique lié aux crises routières, il s'agit de déduire les bonnes mesures de gestion de trafic à mettre en place.

Ce chapitre s'inscrit donc comme une réponse à la problématique de construction d'une dynamique collaborative de réponse à une situation de crise. Il s'agit uniquement de la partie de conception d'une réponse couvrante et exhaustive. Cette réponse doit alors être exécutée et pilotée par la cellule de crise. Deux modes de pilotage complémentaires peuvent être mis en œuvre : réactif (la cellule de crise traite les problèmes lorsqu'ils sont survenus) ou proactif (la cellule de crise anticipe les problèmes potentiels). La suite du manuscrit illustre ainsi ces modes de pilotage.

Chapitre III

Pilotage réactif d'une situation de crise routière : implémentation et illustration

La méthodologie exposée dans le chapitre précédent propose des éléments de conception d'un système d'information d'aide à la décision pour le pilotage des crises routières. En effet, l'objectif du chapitre II a été de définir une ontologie de crise routière pour la construction d'une réponse à une situation de crise. Cette solution doit ensuite être mise en œuvre et exécutée pour être effective. Se pose alors la question du déploiement et du mode de pilotage de cette réponse. Dans le chapitre I, nous avons défini deux modes de pilotage complémentaires pour la réponse à une situation de crise routière : réactif et anticipatif. Nous nous intéressons dans ce chapitre à l'implémentation de la boucle de pilotage réactif identifiée sur la figure III.1.

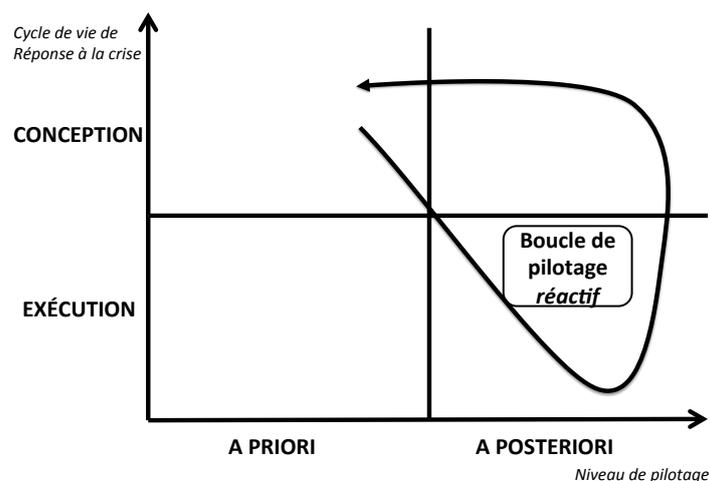


FIGURE III.1 – Positionnement de la boucle de pilotage réactif dans le cadre de travail

Cette problématique a déjà fait l'objet de développements au sein de l'axe Interopérabilité des Organisations du centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi ([Truptil, 2011], [Boissel-Dallier, 2012], [Mu, 2012], [Barthe, 2013]). Notre démarche a alors consisté à reprendre tous ces développements, à y adjoindre nos contributions pour en faire une intégration à notre cas d'étude. Dans la pratique, cette implémentation s'est faite en deux étapes. Tout d'abord, un premier démonstrateur a été réalisé dans le cadre du projet SIM-PeTra, puis un prototype « industriel » a été déployé chez les décideurs.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le démonstrateur développé dans le cadre de ces travaux puis de montrer son utilisation sur un cas permettant d'illustrer l'ensemble des étapes de la méthode. Celui-ci s'organise en quatre parties : la première, introductive, propose une grille de lecture pour la présentation des outils développés en deuxième partie, la troisième partie illustre l'utilisation de ces outils sur un cas concret de crise routière, enfin la dernière partie discute les limites et perspectives de notre outil.

III.1 Grille de Lecture

Cette section propose de positionner les éléments et modules développés lors de la réalisation du démonstrateur dans une grille de lecture. Celle-ci est construite à partir des deux constats initiaux suivants :

1. La numérisation croissante du monde physique oblige les organisations à devoir traiter une quantité importante de données et à se doter de systèmes d'information fiables et capables de les exploiter.
2. La mise en place d'une collaboration éphémère et la coordination d'acteurs hétérogènes sont deux volets importants de la gestion de crise.

Ces deux constats nous amènent à réfléchir quant à l'utilisation des données à disposition des décideurs pour les aider à supporter la collaboration induite par la réponse à une situation de crise. Cette collaboration peut être appréhendée à trois niveaux de son cycle de vie :

- *La définition de la collaboration* correspond à la conception de la dynamique collaborative. L'enjeu est ici d'alimenter facilement et rapidement les différentes couches de notre ontologie de crise développée dans le chapitre II puis d'y appliquer les règles de déduction de processus collaboratifs.
- *La réalisation de la collaboration* correspond à l'exécution de la dynamique définie lors de l'étape précédente. L'enjeu est ici d'assurer la coordination et l'exécution des différents processus collaboratifs dans l'écosystème d'applications déjà existantes, tant au niveau du pilotage par le PIZO que dans la réponse opérationnelle avec la mise en œuvre des mesures de gestion de trafic.
- *Le maintien de la collaboration* propose de s'assurer que la dynamique collaborative en cours de réalisation est toujours pertinente dans le contexte dans lequel elle évolue. L'enjeu est ici de mettre en œuvre l'agilité de la réponse à la situation de crise en permettant de détecter les changements de situation, de les prendre en compte et de fournir une réponse adaptée.

Comme nous l'avons rappelé dans le chapitre II, le spectre du savoir peut être vu comme un continuum entre données, informations et connaissances [Nonaka, 1994]. Dès lors, il est possible de positionner notre système d'information autour des trois objectifs de :

- Recueil des données ;
- Interprétation des informations ;
- Exploitation des connaissances.

Chacun de ces objectifs intervient alors dans chacune des étapes du cycle de vie de la collaboration (définition, réalisation et maintien). En effet, pour *définir* la collaboration, il faut *collecter* les données puis *modéliser* les informations et en faire une exploitation pour en *déduire* un processus. Ensuite, pour *réaliser* la collaboration, sur la base des connaissances dont il dispose, le décideur *valide* des choix dans les processus déduits. Ces derniers sont alors informatisés sous la forme de *workflows*, lesquels sont ensuite *orchestrés*. Au cours de la réalisation de la collaboration, et afin d'en assurer son *maintien*, les données sont *observées* puis les informations des modèles sont *mises à jour* afin de pouvoir *détecter* d'éventuels problèmes ou incohérences dans la dynamique collaborative et *s'y adapter*. La figure III.2 reprend ces éléments et propose une grille de lecture qui va être suivie pour l'ensemble du chapitre.

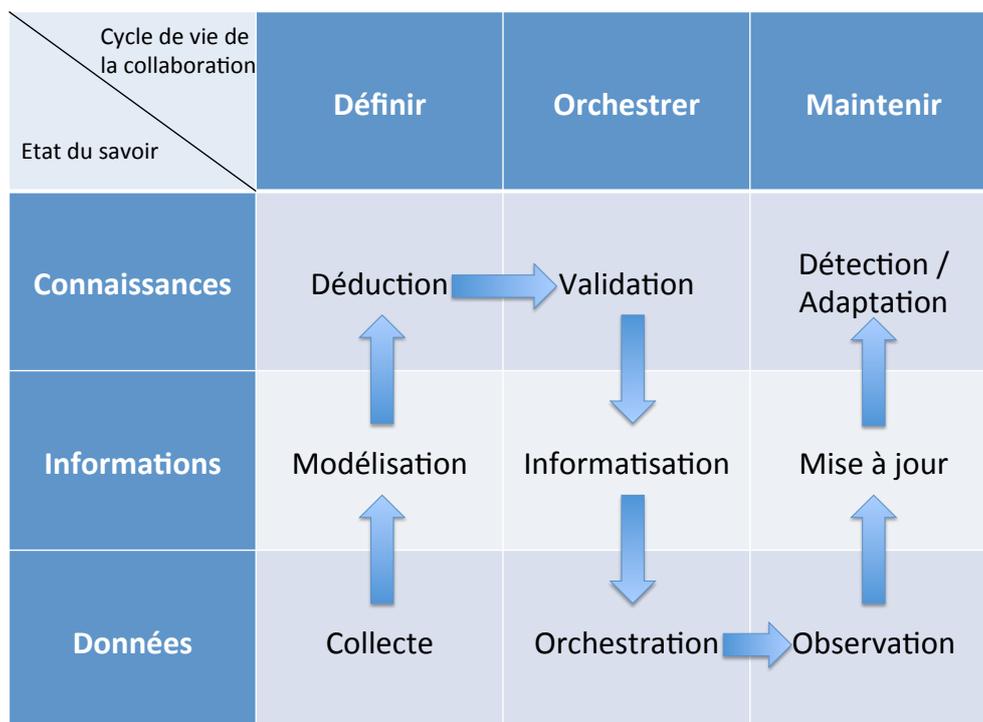


FIGURE III.2 – Grille de lecture pour le pilotage en mode réactif

III.2 Implémentation

Une partie de l'implémentation du système d'information a été réalisée dans le cadre du projet PREDIT SIM-PeTra dont une description a été donnée dans le chapitre I. Nous allons en étudier les résultats au travers du prisme donné par la figure III.2.

III.2.1 La définition de la collaboration

Cette section correspond aux éléments présents dans la première colonne (la plus à gauche) de la figure III.2. Il s'agit ici d'étudier les mécanismes de transformation du savoir (de la donnée à la connaissance).

III.2.1.1 Collecte des données

Pour mettre en place la dynamique collaborative de réponse à la situation de crise, il est nécessaire que les décideurs soient informés de la situation à laquelle ils sont confrontés. Pour y parvenir, ils disposent de systèmes d'information capables de leur fournir des données nécessaires à leur jugement. Toutefois, si ces données sont consultables par les utilisateurs (notamment au travers d'interfaces web), leur réutilisation est plus délicate. En effet, le degré d'ouverture des différents systèmes d'information dépend à la fois du bon vouloir de leur propriétaire à fournir ces données, mais aussi de leur capacité à pouvoir les interpréter et les échanger.

Dans le chapitre I nous avons dressé un état de l'art des différents systèmes d'information existants en fonction de leur utilité dans les missions du CRICR (recueil d'information, aide à la décision, diffusion de l'information). Notre attention va maintenant se porter sur les sources de données disponibles.

OPTICCO C'est l'outil cartographique d'aide à la décision développé pour le CRICR de l'Ouest afin de l'accompagner dans l'application du PIZO. L'application se présente sous la forme d'un client lourd reposant sur une base de données géographique partagée (plug-in PostGIS de PostgreSQL). Ce système sert ainsi de socle d'informations pour la gestion de crise routière. Dès lors, on y retrouve :

- Les données propres à la zone ouest (forme géographique et nom).
- Les données propres aux départements de la zone de défense « statiques » (numéro, forme géographique, nom, nom de la préfecture) et « dynamiques » (niveau de vigilance Météo, niveau PIZO, interdictions de circulation des cars scolaires, dates de changements de niveau).
- Les données propres à un tronçon routier « statiques » (identifiant, forme géographique, route de rattachement, gestionnaire, département d'appartenance, longueur, coordonnées de début et de fin) et « dynamiques » (conditions de conduite, état d'ouverture).
- les données propres aux zones de stockage « statiques » (identifiant, forme géographique, capacité, longueur, département d'appartenance, coordonnées de début

et de fin, tronçons de rattachement) et « dynamiques » (état d'ouverture, remplissage).

Il est à noter qu'une distinction est faite entre les données « statiques » (actualisées au maximum annuellement) et les données « dynamiques » (actualisées plusieurs fois par jour). Si les premières peuvent être mises à jour de façon manuelle, il apparaît plus fastidieux de mettre à jour les secondes (d'autant plus que leur dynamique est accentué en temps de crise). C'est pourtant ce qui était réalisé par les opérateurs du CRICR en période de crise. Ceci présente un double inconvénient : la mobilisation de ressources humaines à des tâches pouvant être réalisées par des ordinateurs et le risque de mauvaise saisie de l'information. Un de nos objectifs est donc de faciliter la saisie sur le terrain des données dynamiques.

La collecte de données depuis OPTICCO se résume donc à la récupération des données « statiques » relatives à la zone ouest, aux départements de la zone, au réseau routier ainsi qu'aux zones de stockage.

SERPE-VH Il s'agit d'un outil développé par le Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE, anciennement Ministère des Transports et de l'Équipement) permettant aux exploitants routiers de renseigner l'état des chaussées en temps réel. Les gestionnaires (publics ou privés) ont une obligation légale d'actualiser les conditions de conduite du réseau qu'ils exploitent avec une fréquence minimale de deux heures. La publication de ces données se fait sous la forme de deux fichiers XML qui sont accessibles à partir d'un lien intranet du MEDDE :

- Le *fichier de la structure du réseau* contient la description de tous les tronçons routiers en reprenant les caractéristiques suivantes : identifiant, axe, description, point de début et ses coordonnées géographiques, point de fin et ses coordonnées géographiques. Les tronçons sont regroupés par district (découpage administratif de l'exploitant sur son réseau), eux-mêmes regroupés par gestionnaire.
- Le *fichier de données « veille hivernale »* décrit les conditions hivernales pour chacun des tronçons de la structure réseau en reprenant les informations suivantes : identifiant (le même que celui du fichier structure du réseau), conditions de conduite (choix entre quatre niveaux : C1, C2, C3, C4), évolution à deux heures des conditions de conduite prévues, traitement (en cours, non réalisé, terminé ou non renseigné), conditions météorologiques (RAS, neige, verglas, pluie verglaçante, pluie, brouillard, non renseigné), état constaté de la chaussée (verglacé, neige résiduelle, plaques de neige, partiellement enneigée, enneigée, formation de congères, non renseigné), température constatée, présence de vent, commentaires.

L'exploitation de ces fichiers XML permet de récupérer de manière automatique les données relatives aux conditions de conduites sur les tronçons. Toutefois, le découpage adopté par SERPE-VH est plus grossier et différent de celui choisi dans OPTICCO. En outre, pour des raisons d'exploitation propres aux gestionnaires il est amené à être redéfini plus fréquemment. La collecte de données depuis SERPE-VH débute donc par une étape de mise en correspondance du réseau OPTICCO avec celui de SERPE-VH.

Elle permet alors la récupération des conditions de conduite sur le réseau routier.

VigiMeteo Il s'agit d'un outil permettant la diffusion du bulletin de vigilance par Météo France (carte de vigilance) pour les internautes. Une version de cette carte est mise à disposition par Météo France sous la forme d'un fichier XML (http://www.meteo.fr/test/gratuit/vigilance_secours/data/NXFR34_.xml). Celui-ci donne, pour chacun des départements, le niveau de vigilance (vert, jaune, orange ou rouge) ainsi que le type de risque associé à cette vigilance (vent, pluie, orages, inondation, neige, canicule, grand froid, avalanches, vagues-submersion).

L'exploitation de ce fichier XML permet ainsi la récupération du niveau de vigilance donnée par Météo France.

TUPI C'est le système d'information du MEDDE pour l'exploitation et l'information routières. Il recense des informations concernant des événements routiers (accidents, bouchons, travaux...) provenant de différentes sources (centre de gestion de trafic, gendarmeries...). TUPI possède un module d'échange de données au format DATEX 2 (fichiers XML). Cette norme européenne propose un format numérique adapté à la transmission de trafic et d'information routière. Il est alors possible de récupérer grâce à un lien intranet du MEDDE, l'ensemble des fichiers XML relatifs à l'ensemble des événements qui impactent le réseau routier. Chaque fichier est relatif à un événement du réseau et identifie la source de l'information, la nature de l'évènement, ses coordonnées géographiques, sa validité (en cours ou terminé).

L'exploitation de ces fichiers XML permet d'obtenir des informations concernant les événements du réseau routier.

OPTIMA C'est l'outil Météo France dédié à la météo routière. Il est uniquement disponible en consultation via une interface web. Les données y figurant concernent les conditions météorologiques sur l'ensemble du réseau : température de l'air, température de la chaussée, conditions atmosphériques et prévisions.

OPTIMA est un outil propriétaire de Météo France et l'abonnement dont dispose le CRICR ne permet pas d'obtenir les informations de l'interface Web de manière exploitable.

Le fichier des zones à risques Il s'agit d'un fichier XML conçu par les équipes du CETE de l'Ouest recensant l'ensemble des zones de dangers (zone à forte pente, zone à forte déclivité, ouvrage d'art, zone de sensibilité météorologique et zone à capacité réduite) présentes sur le réseau de l'Ouest de la France de façon permanente.

L'exploitation de ce fichier XML permet de collecter des données concernant l'ensemble des dangers présents sur le réseau routier.

L'humain C'est une source de données indispensable quand le besoin en information n'est pas couvert par un système informatique ou que le système informatique n'est pas exploitable en tant que tel. Par exemple, il n'existe pas à l'heure actuelle de système d'information dédié à la mise à jour du remplissage des zones de stockage, l'information étant relayé par des appels téléphoniques entre les forces de l'ordre présentes sur le

terrain et celles présentes dans la cellule de crise. Il en est de même pour les données issues du système OPTIMA qui ne peuvent pas être exploitées de manière automatique.

Le tableau III.1 donne une synthèse des sources disponibles pour l'étape de collecte de données.

Système d'information	Nature des données	Format des données
OPTICCO	Données statiques (attributs, formes géométriques) de la zone Ouest, des départements, du réseau et des zones de stockage.	Base de données PostgreSQL avec module PostGIS
SERPE-VH	Conditions de conduites sur le réseau routier	Fichiers XML
VigiMeteo	Carte de Vigilance Meteo France	Fichier XML
Zones à Risques	Liste des dangers inhérents au réseau routier	Fichier XML
OPTIMA	Conditions météorologiques sur le réseau routier	Interface Web
Humain	Conditions météo, remplissage zone de stockage...	

TABLE III.1 – Liste des sources utiles pour la collecte de données

III.2.1.2 Modélisation des informations

Dans la partie précédente, nous nous sommes intéressés à la collecte des données relatives à la situation de crise. Or, si elles ne sont pas contextualisées, ces données n'ont une utilité que très limitée pour les décideurs. En effet, le décideur doit modéliser la situation à laquelle il doit faire face en donnant un sens aux données qu'il a recueillies.

Dans le chapitre II nous avons cherché à définir une ontologie supportant la prise de décision dans un contexte de crise routière. Pour la peupler, elle doit être alimentée par les différentes sources de données. Toutefois, cette alimentation nécessite un alignement entre les concepts présents dans l'ontologie et les structures de données présentées précédemment. En d'autres termes, il s'agit de transformer les données des différents systèmes d'information pour instancier les différents concepts de l'ontologie. Pour chaque système d'information source, nous avons alors développé un connecteur en langage JAVA permettant de récupérer la donnée et de l'insérer dans le modèle de situation de crise. Pour récupérer les données, dans le cas où le type de données sources était un fichier XML nous avons utilisé la librairie *JAXB*, tandis que pour la base de données, il s'agissait de requêtes SQL. En outre, le peuplement de notre ontologie (fichier OWL) s'est fait grâce à une librairie développée en interne basée également sur le module JaxB.

La figure III.3 reprend la partie système d'étude du métamodèle SIM-PeTra et y fait figurer les sources de données pour chacun des concepts présents dans l'ontologie. Les liens limitrophes sont calculés par un programme JAVA dont la philosophie consiste dire que si deux départements ont un contour en commun, alors ils sont limitrophes.

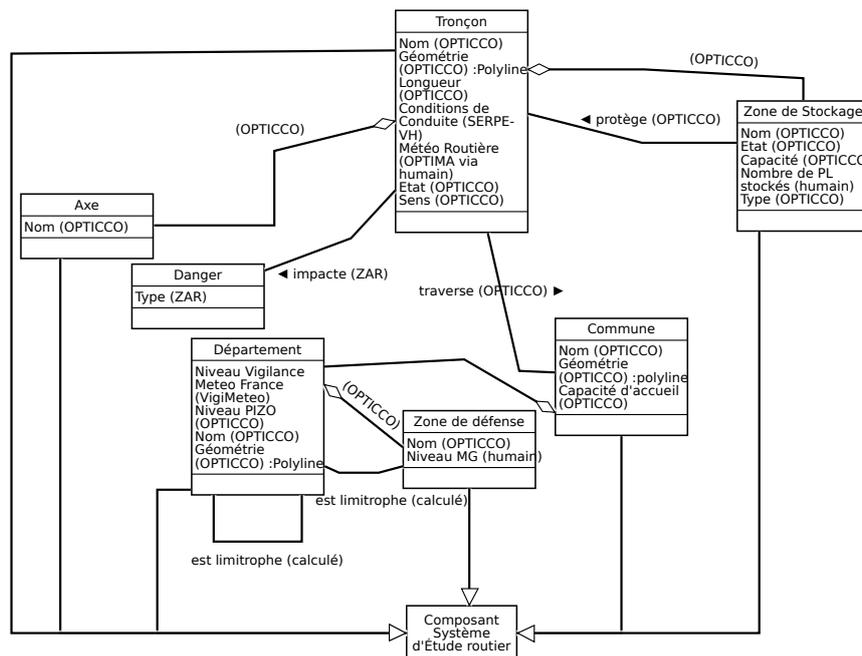


FIGURE III.3 – Système d'étude du Métamodèle SIM-PeTra et sources de données

Le modèle de crise routière contenu dans l'ontologie se présente sous la forme d'un fichier XML de plusieurs centaines de lignes, complexe à lire et à appréhender. Il est utile à la fois pour la cellule de crise dans sa prise de décisions et pour les acteurs de la gestion de crise pour avoir une représentation de la situation courante. Cette différence d'objectif d'utilisation du modèle implique de représenter le contenu du modèle selon deux points de vue donc à partir de deux interfaces de visualisation différentes.

L'interface cartographique de représentation. C'est une interface de consultation. Elle présente le modèle contenu dans l'ontologie sous la forme d'une carte OpenStreetMap sur une interface web. Elle permet d'afficher et de superposer différentes couches en fonction des informations que l'utilisateur souhaite voir apparaître : niveaux PIZO et de vigilance météo des départements, conditions de conduite sur le réseau, état de circulation sur les routes, état d'ouverture des zones de stockage. C'est un programme JAVA qui assure la transformation entre les données de l'ontologie et leur affichage sur des couches OpenStreetMap. Cette interface web (accessible depuis l'extérieur) sert également de support de communication à la cellule de crise. Cette interface (figure III.4) a fait l'objet d'une industrialisation pour la suite du projet SIM-PeTra.

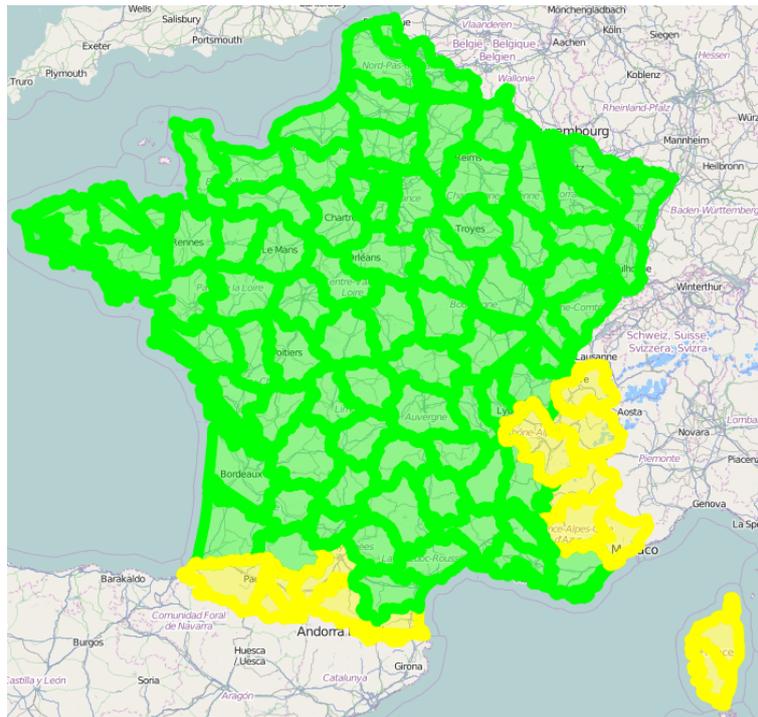


FIGURE III.4 – Capture d'écran de l'interface cartographique de représentation (couche carte de vigilance météo)

L'interface de modélisation. Elle donne une représentation du modèle présent dans l'ontologie autour des concepts de celle-ci. Compte tenu du nombre d'éléments présents dans l'ontologie (plusieurs centaines), une représentation graphique de tous les éléments serait malvenue et rendrait la lecture du modèle inaccessible. L'interface de modélisation cherche ainsi à ne présenter que les situations à problèmes. Les critères de filtres sont alors les suivants :

- Les départements affichés sont ceux dont la vigilance météo est supérieure à orange ou ceux dont le niveau PIZO est supérieur ou égal à deux.
- Les tronçons affichés sont ceux dont les conditions de circulation sont au minimum C2.
- Les zones de stockage affichées sont celles sur lesquelles une mesure de gestion de trafic est en cours.

Cette interface est également une interface d'édition sur laquelle le décideur peut ajouter de nouvelles informations qui ne sont pas remontées par les systèmes d'information présentés précédemment : le décideur dispose d'une palette dont les éléments font référence à la couche crise routière du métamodèle en couches. Dès lors, il est possible de créer, modifier ou supprimer des éléments du modèle, lesquels seront sauvegardés dans l'ontologie. La figure III.5 est une capture d'écran de cette interface.

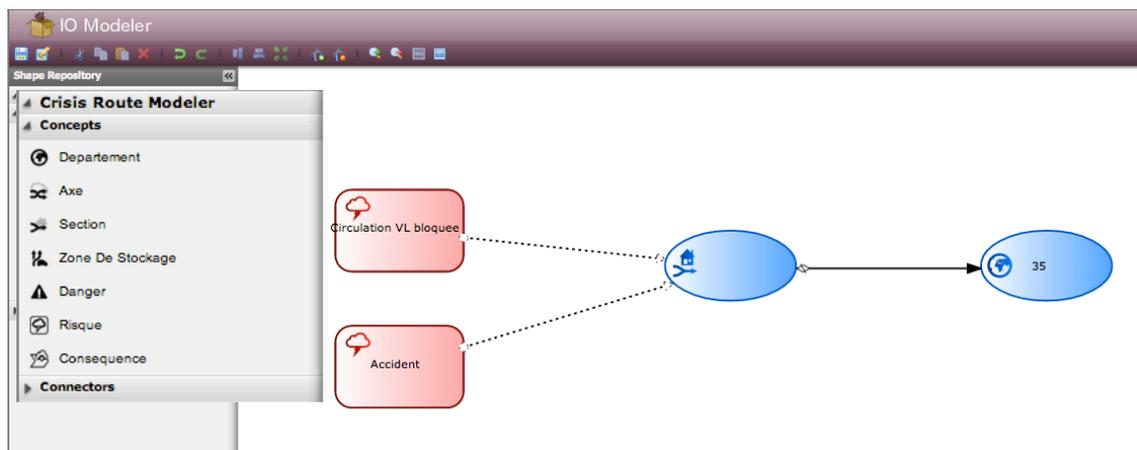


FIGURE III.5 – Capture d'écran de l'interface de modélisation

Modélisation des processus La réponse à une situation de crise routière est pilotée par le PIZO, lequel identifie les règles d'organisation et les mesures opérationnelles de réponse à la crise. Une des contributions du projet SIM-PeTra a été de formaliser l'ensemble des informations contenues dans le PIZO. En effet, une étude menée par le CETE de l'Ouest a permis la formalisation des éléments « doctrinaux » sous la forme de processus BPMN. Ici, la modélisation s'est fait grâce à l'outil Iterop Design de la société InteropSys¹.

III.2.1.3 La déduction basée sur l'exploitation des connaissances

À l'issue de l'étape de modélisation des informations, la connaissance contenue dans l'ontologie doit être exploitée pour permettre la déduction des décisions à prendre.

Les règles doctrinales Lorsque le décideur estime que le modèle de situation est suffisamment complet et représentatif de la situation sur le terrain, il peut choisir de lancer le processus de déduction. Cette déduction se base sur les règles extraites du plan PIZO et définies dans le chapitre II. Pour rappel, il existe trois jeux de règles qui sont exécutées successivement :

- *L'enrichissement de la base de connaissances* correspond aux mécanismes d'inférence et permet de faire émerger des connaissances. Elle se base sur des règles de production pour enrichir le modèle de connaissances. Il s'agit essentiellement des règles d'apparition de risques. La formalisation de ces règles est le fruit de discussions avec les experts métiers.
- *Les règles PIZO* sont les règles de déduction de prise de mesures de gestion de trafic et de changement de niveau PIZO. Elles ont été formalisées à partir des informations présentes dans le PIZO.

1. InteropSys (<http://www.interopsys.fr/>) est une société fondée en 2013. Elle fait suite aux travaux de [Boissel-Dallier, 2012] sur la Réconciliation sémantique des données et des services mis en œuvre au sein d'une situation collaborative.

D'un point de vue technique, ces règles ont été écrites en SWRL dans un premier temps. Mais les moteurs d'inférence ne supportaient pas la charge sur une ontologie composée de centaines d'instances. Dès lors, nous avons fait le choix de les écrire au sein d'un programme JAVA. Si les performances affichées sont plus élevées, l'édition des règles est beaucoup moins flexible. En effet, la mise à jour d'une règle nécessite une recompilation totale du programme JAVA tandis que dans le cas de règles SWRL, il s'agit uniquement de la mise à jour d'un fichier.

Le moteur de déduction Le moteur de déduction doit permettre l'application des règles de déduction définies précédemment. Lorsque l'utilisateur demande une nouvelle déduction, le moteur de déduction vient récupérer les éléments du modèle de situation de crise et y applique les règles. Le résultat de cette déduction est alors affiché sur une interface spécifique à la déduction. La figure III.6 est une capture d'écran de cette interface.

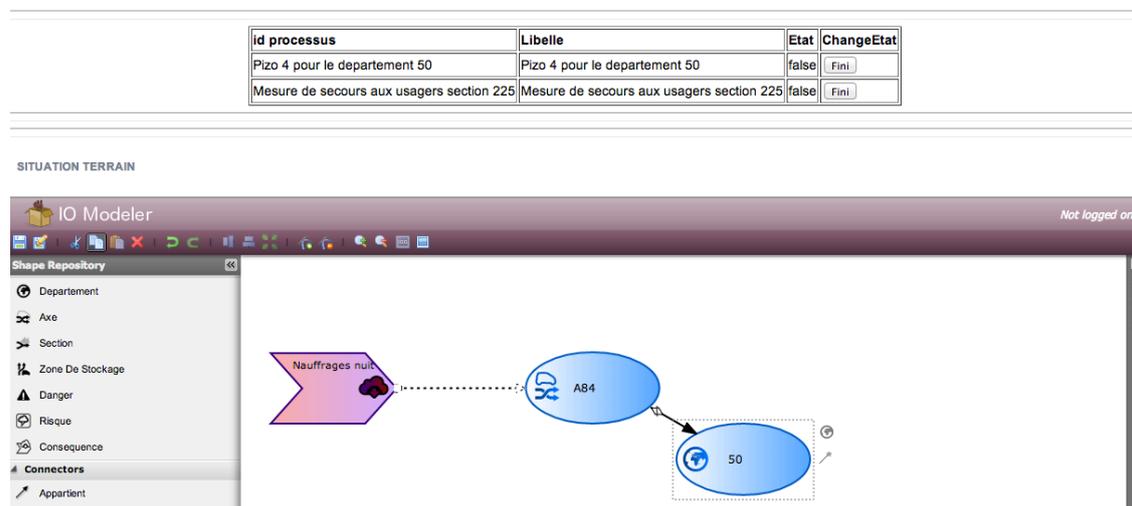


FIGURE III.6 – Capture d'écran de l'interface de déduction

III.2.2 La réalisation de la collaboration

Une fois la collaboration définie, des processus sont formalisés pour apporter une solution à la situation de crise. La phase de conception est alors finie et l'enjeu réside alors dans la bonne réalisation de la dynamique collaborative.

III.2.2.1 La prise de décision basée sur les connaissances

Lorsque la déduction de la définition de la dynamique collaborative a été réalisée, celle-ci est proposée au décideur sur l'interface de déduction. Il peut alors choisir de lancer l'exécution (totale ou partielle) de la réponse telle qu'elle lui est proposée ou bien de l'éditer (via l'outil Iterop Design) si celle-ci ne le satisfait pas. C'est à ce moment que le décideur valide les options tactiques sur la démarche à suivre.

III.2.2.2 La création d'un Workflow

La création d'un workflow pour rendre exécutable le processus impose que l'ensemble des activités présentes dans le processus défini précédemment soit informatisé. Certaines d'entre elles peuvent correspondre à des activités réalisées ou supportées par des systèmes d'information tandis que d'autres sont des activités purement métiers.

Activités SI. Une grande partie de l'enjeu réside ici dans la capacité que vont avoir les différents systèmes d'information à être invoqués pour réaliser des activités. Les systèmes d'information identifiés comme pouvant intervenir dans des processus sont :

- *Les outils de diffusion de l'information* : TIPI (information routière pour diffusion sur internet), DIRIA (information routière pour diffusion par téléphone), SYNERGI (diffusion d'arrêté sur la main courante du Ministère de l'Intérieur).
- *Les outils d'aide à la décision* : OPTICCO (outil cartographique d'aide à la décision) et l'outil d'aide à la rédaction d'arrêtés.

Pour que ces systèmes soient invocables et utilisables au sein de workflow, il faut que leur conception le permette. Pour les outils de diffusion de l'information, il nous a été impossible de les invoquer pour des raisons de sécurité (SYNERGI peut contenir des informations sensibles), et l'absence d'environnement de test (TIPI et DIRIA ne pouvaient être reliés qu'à une base opérationnelle nationale). Les outils d'aide à la décision étaient plus accessibles (accès à des bases de test), mais leur architecture (client lourd, base de données partagée) ne laissait que très peu de place à une intégration dans une architecture orientée service. Ainsi, un des apports du projet a été d'ajouter une couche autour de ces deux systèmes pour leur conférer un premier niveau d'interopérabilité.

Activités Métiers. Il est des activités métiers qui ne peuvent pas être réalisées par des systèmes d'information. Ceci se vérifie d'autant plus dans le cadre d'activités de réponse à une situation de crise. Par exemple, l'activité « Signaler une zone de stockage » est réalisée par les patrouilles d'un gestionnaire routier. Toutefois, pour assurer une coordination des opérations de réponse, il est nécessaire que la cellule de crise puisse invoquer cette activité quand il le faut (c'est à dire quand l'exécution courante du processus le réclame) et qu'elle sache quand l'activité va se terminer (notamment si cette activité est un prérequis pour d'autres activités). Pour cela, l'outil Iterop Design possède un atelier de création d'interfaces générique. Celui-ci propose de créer pour chaque activité métier une interface qui sera invoquée en même temps que l'activité. Pour chacune des activités, il est possible de spécifier des données d'entrée et de sortie. La figure III.7 est une capture d'écran de cet outil.

Informez les usagers Tâche humaine

Informations générales

Nom de la tâche (*)

Informez les usagers

Priorité de la tâche

Documentation tâche (*)

Informez les usagers via les outils TIPI et DIRIA des changements de niveau

Affectations (*)

Utilisateurs : CRICR-Operateur

Groupes : CRICR-Operateur

Edition des données de sortie

Edition des données d'entrée

Choisir les Input

FIGURE III.7 – Capture d'écran de l'interface de création d'interface
s

III.2.2.3 L'orchestration

Lorsque le workflow a été défini, celui-ci est orchestré par Iterop Play, outil d'orchestration de processus développé par la société InteropSys, en lien avec les travaux de [Boissel-Dallier, 2012]. Il permet l'exécution du processus de manière automatique en prenant en charge les échanges de données avec les différentes applications et l'affectation des tâches métiers aux acteurs concernés. Pour cela, chaque acteur du processus a une interface dédiée sur laquelle il est informé des tâches qu'il doit effectuer tout au long de l'exécution du processus. En outre, la cellule de crise peut, au titre de superviseur du processus, suivre l'exécution du processus pour en surveiller l'avancement et éventuellement en repérer les points de blocage. L'orchestrateur de processus est le garant de l'invocation des services des acteurs au bon moment et au bon format, telle qu'elle est définie dans le processus collaboratif. La figure III.8 est une capture d'écran de la supervision d'un processus dans Iterop Play.

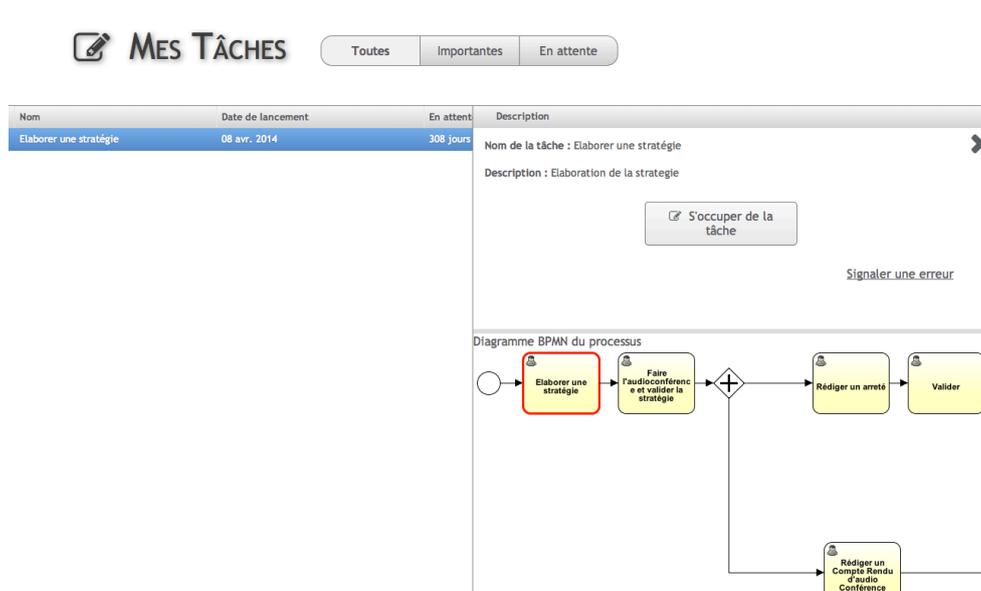


FIGURE III.8 – Capture d'écran de l'interface de supervision de processus

III.2.3 Le maintien de la collaboration

Au cours de l'exécution de la réponse, la situation peut avoir changé. En effet, l'instabilité des situations de crises les amène à être en constantes évolutions. Ces évolutions peuvent perturber le bon déroulement de la collaboration. Le décideur doit alors s'assurer du maintien de la collaboration pour savoir si la solution déployée est toujours pertinente.

III.2.3.1 L'observation des données du terrain

Le maintien de la collaboration a pour but de s'assurer que la réponse courante à la situation de crise est toujours pertinente compte des évolutions qui peuvent la caractériser. Pour l'observation des données relatives à la crise (tant au niveau de la réponse que de la situation en elle-même), l'architecture de notre système d'information suit les préceptes d'une architecture orientée services, laquelle peut être complétée par une architecture orientée événements (EDA).

L'EDA est une architecture de système d'information dans laquelle des composants sont dirigés par les événements et communiquent entre eux au moyen d'événements. Un des enjeux concerne leur recueil, lequel se fait selon un mécanisme de publication/abonnement : un système publie un événement sans se soucier du système qui va s'y abonner.

Dans le cadre du projet SIMPeTra, les systèmes d'information décrits dans la section III.2.1.1 sont émetteurs d'événements concernant l'environnement de la crise tandis que l'orchestrateur émet des événements de notifications relatives aux activités du processus (début, fin).

III.2.3.2 La mise à jour des différents modèles

Le traitement de ces événements recueillis sur le terrain va permettre la mise à jour de modèles de crise basés sur le métamodèle décrit dans le chapitre II. Notre implémentation reprend celle développée dans les travaux de [Barthe, 2013] à savoir la mise à jour des deux modèles suivants :

- *Le modèle terrain* est une photographie du théâtre de la crise à un instant donné. Il est alimenté par les événements relatifs à l'environnement de la collaboration. C'est le modèle qui doit retranscrire la situation telle qu'elle est réellement sur le terrain.
- *Le modèle attendu* est un portrait robot de la situation que la cellule de crise s'attend à avoir sur le terrain compte tenu de l'avancée du processus de réponse à la situation de crise.

Le modèle terrain est mis à jour suivant les données recueillies sur le terrain via les systèmes d'information présentés précédemment. Suite à la mise à jour des éléments du modèle, il est nécessaire d'exécuter les règles d'enrichissement de la base de connaissances pour faire émerger de nouvelles connaissances.

Le modèle attendu est mis à jour sur la base des événements concernant l'état d'avancement des services des workflows. Chaque problème de la situation de crise initiale est lié à un ensemble d'activités solutions qui lui étaient dédiées. Lorsque l'ensemble de cette solution est dans un état « terminé » alors le problème (risque ou conséquence) qui existait sur le modèle initial (modèle ayant amené la déduction du processus collaboratif) est considéré comme résolu.

D'un point de vue technique, l'implémentation de la mise à jour de modèles se base sur l'implémentation réalisée dans les travaux de [Barthe, 2013] en y apportant toutefois quelques modifications. D'une part, il a fallu adapter ce travail au contexte lié à la crise routière. D'autre part, la mise à jour du modèle attendu était fortement dépendante de l'orchestrateur choisi. Il a donc fallu s'adapter aux préceptes imposés par le produit Iterop Play. L'affichage des deux modèles pour la cellule se fait sur une interface qui est une duplication de l'interface présentée en section III.2.1.2. La figure III.9 présente cette interface.

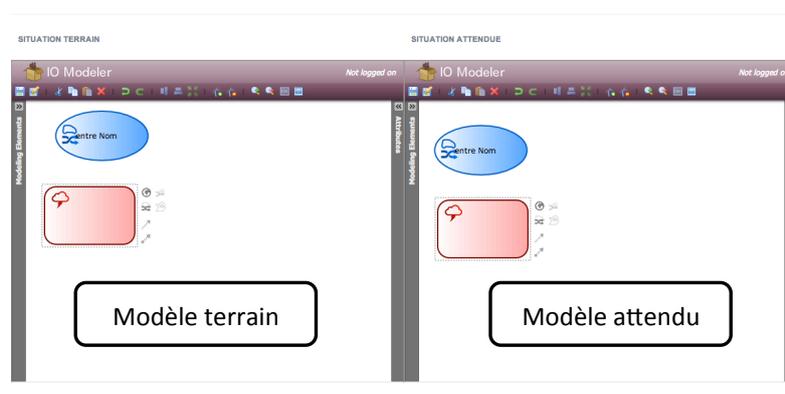


FIGURE III.9 – L'interface d'affichage des modèles terrain et attendu

III.2.3.3 Détection

L'objectif de la mise à jour continue des modèles terrain et attendu est double. Il s'agit de suivre (i) l'évolution de la situation telle qu'elle est sur le terrain ; (ii) sa perception par la cellule de crise au travers de la mise en oeuvre de la dynamique collaborative de réponse. La détection vise à quantifier les divergences entre ces deux modèles pour s'assurer de la pertinence de la réponse en cours compte tenu de la situation constatée.

Pour cela, les fichiers XML correspondant aux deux modèles sont comparés en utilisant le moteur de comparaison décrit par [Barthe, 2013]. Celui-ci a été développé en JAVA et se base sur la librairie XMLUnit. Le résultat de la comparaison fait ainsi apparaître les créations, les mises à jour et les suppressions d'éléments d'un modèle à un autre. Ce résultat est ensuite affiché à la cellule de crise qui va qualifier la dérive d'un modèle par rapport à l'autre et proposer une décision en conséquence. Il s'agit là de réfléchir à l'opportunité de redéfinir, partiellement ou totalement, la dynamique collaborative. C'est l'adaptation du processus à la nouvelle situation définie. Il est important de noter que ce mécanisme s'inscrit dans une démarche « réactionnelle », c'est-à-dire que l'on attend que les problèmes surviennent avant de proposer une action corrective. Dans le chapitre IV, nous proposons un mécanisme d'anticipation pour anticiper l'apparition des problèmes et proposer un traitement en amont.

La figure III.10 est une capture d'écran du résultat d'une comparaison entre modèle terrain et modèle attendu.

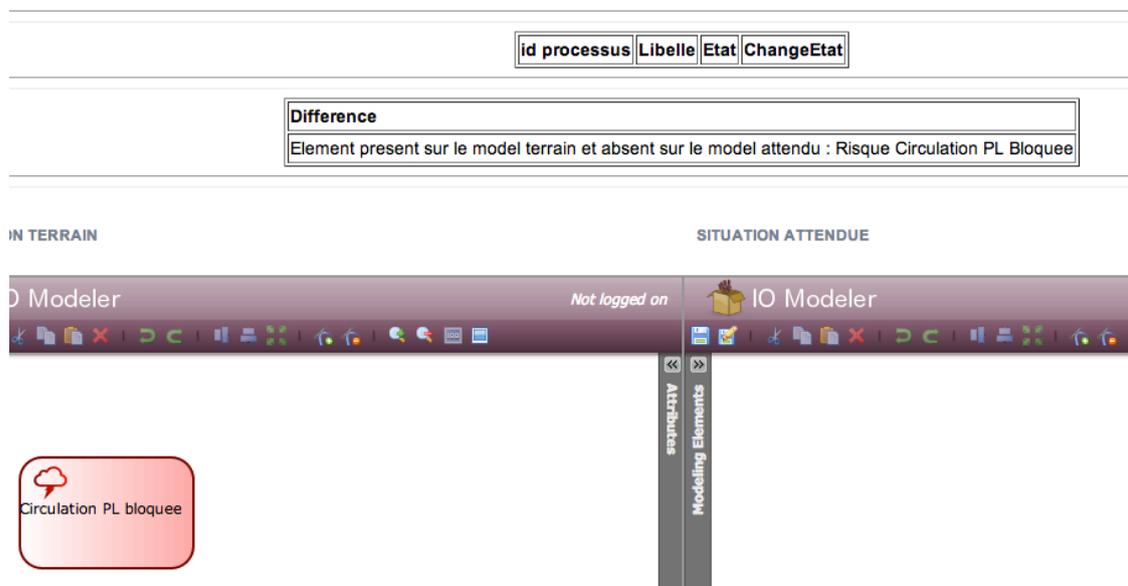


FIGURE III.10 – Capture d'écran de l'interface de résultat de comparaison

III.2.4 Synthèse

La figure III.11 propose une synthèse des éléments d'implémentation décrits tout au long de cette section en les positionnant dans la grille de lecture proposée en section III.1.

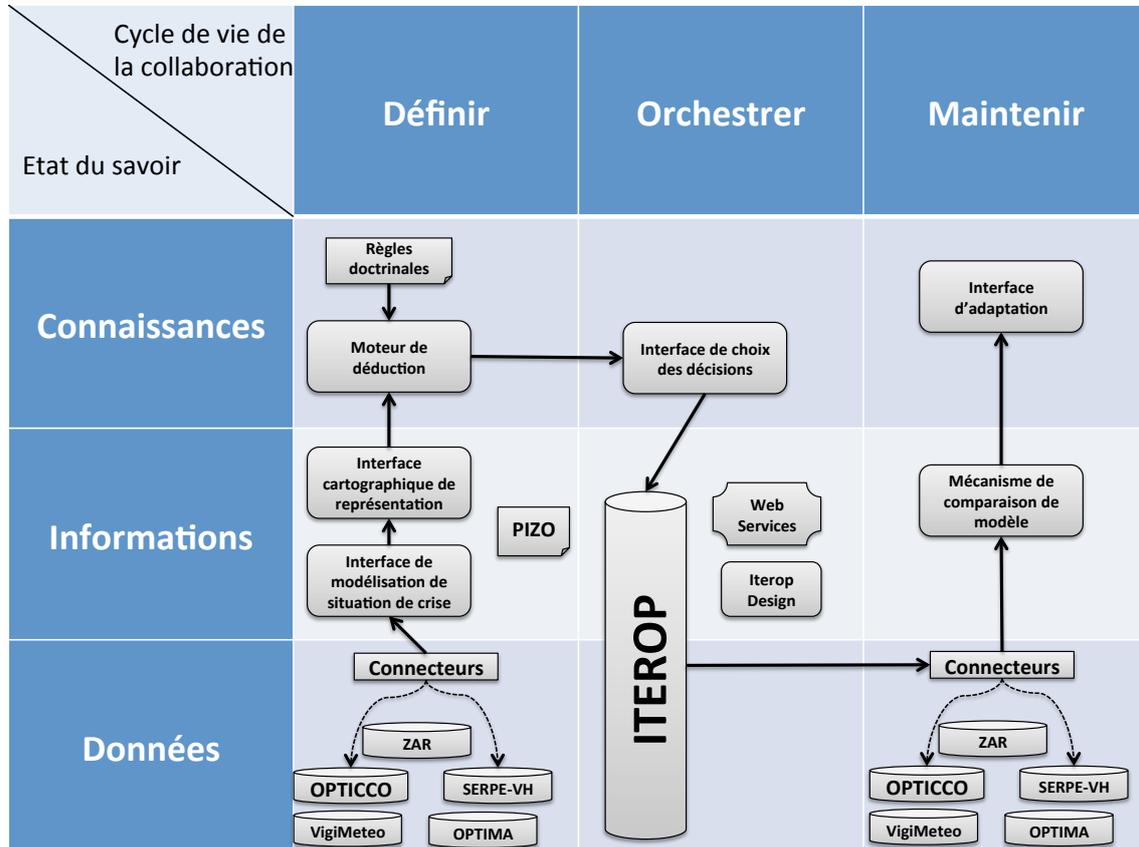


FIGURE III.11 – Les modules de l'application SIM-PeTra

Chacun des modules développés trouve alors sa place dans cette grille de lecture :

- Le développement de connecteurs avec des systèmes d'information existants permet d'assurer la *collecte* des données.
- Les interfaces de modélisation de la situation de crise et de représentation cartographique assurent la *modélisation* des informations selon des points de vue différents.
- Le moteur de déduction permet, sur la base des règles doctrinales de *déduire* la dynamique de collaboration qui est ensuite *validée* dans l'interface de choix des décisions.
- La suite logicielle Iterop garantit l'*informatisation* et l'*orchestration* du processus de réponse en invoquant des web services pour la réalisation d'activité métier.
- Les connexions à l'ensemble des systèmes d'information existants assurent l'*observation* des données du terrain.
- Le mécanisme de comparaison de modèle permet la *mise à jour* des informations

des différents modèles.

- L'interface d'adaptation affiche le résultat de la démarche de *détection / adaptation*.

La section suivante propose une illustration de l'utilisation de ces modules à partir du cas d'utilisation défini dans le projet SIM-PeTra.

III.3 Illustration

Le cas d'illustration que nous allons développer dans cette section correspond à celui présenté lors de la revue finale du projet SIM-PeTra. Il s'inspire de cas de crises routières qui ont touché la France en décembre 2010 et en mars 2013.

III.3.1 Situation initiale

Nous sommes le 11 mars 2013 à 23h, une vague de froid inattendue pour la période (printemps imminent) touche l'ensemble de la France. Des précipitations neigeuses sont attendues pour le début de matinée et le phénomène doit s'intensifier au fur et à mesure de la journée. Pour l'instant, l'ensemble des départements de l'Ouest est placé en vigilance météo jaune (« Soyez attentifs »).

III.3.2 Émission d'un bulletin d'alerte météo

Le 12 mars 2013 à 6h du matin, météo France émet un bulletin d'alerte concernant des chutes de neige et du verglas sur l'Ouest de la France. Les départements des Côtes d'Armor (22), du Calvados (14), de la Manche (50), de la Seine Maritime (76) et de l'Orne (61) sont placés en vigilance météorologique orange neige et verglas (« Soyez très vigilants »). Ce bulletin est émis via le système d'information Vigi Météo à partir du fichier XML dont l'extrait correspondant au département 22 est présenté en figure III.12.

```
<datavigilance couleur="1" dep="21">
  <crue valeur="1" />
</datavigilance>
<datavigilance couleur="3" dep="22">
  <crue valeur="1" />
  <risque valeur="5" />
</datavigilance>
<datavigilance couleur="1" dep="2210" />
<datavigilance couleur="1" dep="79">
  <crue valeur="1" />
  .....
```

FIGURE III.12 – Extrait du fichier XML vigiMétéo

Cette donnée est alors recueillie par notre système d'information grâce au connecteur JAXB de récupération de données depuis VigiMétéo. Elle est ensuite insérée dans l'ontologie puis devient visualisable sur l'interface cartographique de représentation comme le montre la figure III.13.

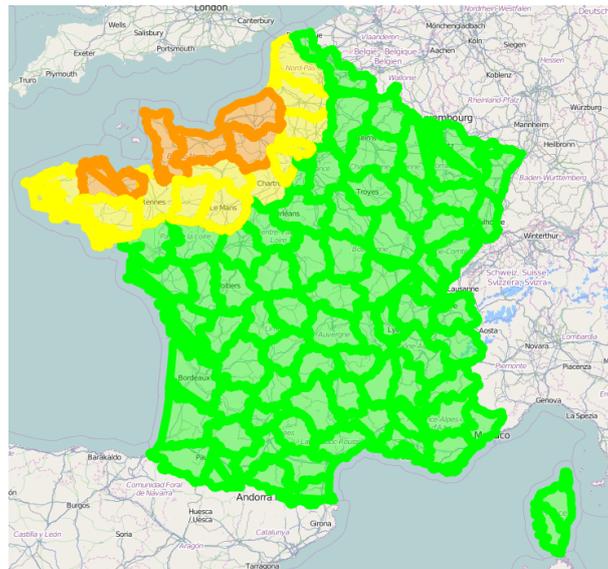


FIGURE III.13 – Couche vigilance météo de l'interface cartographique après la mise à jour du 12/03/2013 à 6h

Lorsque le contenu de l'ontologie a été mis à jour, le décideur peut alors en constater le résultat sur l'interface de modélisation (figure III.14). Les critères de filtres n'affichant que les départements concernés par des problèmes, seuls les départements en vigilance météo orange apparaissent sur cette interface.

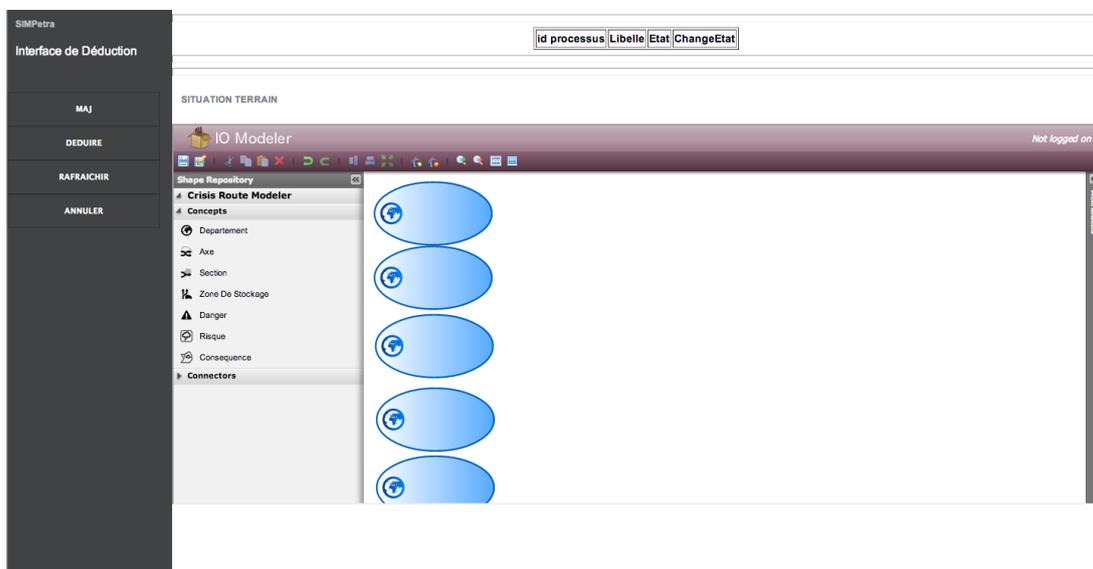


FIGURE III.14 – Interface de modélisation mise à jour à partir des informations de l'ontologie

L'actualisation de l'ontologie entraîne également le déclenchement des règles d'enrichissement puis de déduction. La mise à jour effectuée (passage de quatre départements

en vigilance orange) entraîne alors l'activation d'une seule règle de déduction. Celle-ci stipule que si un département est en vigilance orange, alors il doit passer en niveau 2 du PIZO. Cette proposition s'affiche sur l'interface de déduction (figure III.15).

SIMPeira		Interface de Déduction																									
<p>MAJ</p> <p>DEDUIRE</p> <p>RAFRAICHIR</p> <p>ANNULER</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>id processus</th> <th>Libelle</th> <th>Etat</th> <th>ChangeEtat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pizo 2 pour le departement 14</td> <td>Pizo 2 pour le departement 14</td> <td>false</td> <td>Fin</td> </tr> <tr> <td>Pizo 2 pour le departement 22</td> <td>Pizo 2 pour le departement 22</td> <td>false</td> <td>Fin</td> </tr> <tr> <td>Pizo 2 pour le departement 50</td> <td>Pizo 2 pour le departement 50</td> <td>false</td> <td>Fin</td> </tr> <tr> <td>Pizo 2 pour le departement 61</td> <td>Pizo 2 pour le departement 61</td> <td>false</td> <td>Fin</td> </tr> <tr> <td>Pizo 2 pour le departement 76</td> <td>Pizo 2 pour le departement 76</td> <td>false</td> <td>Fin</td> </tr> </tbody> </table>		id processus	Libelle	Etat	ChangeEtat	Pizo 2 pour le departement 14	Pizo 2 pour le departement 14	false	Fin	Pizo 2 pour le departement 22	Pizo 2 pour le departement 22	false	Fin	Pizo 2 pour le departement 50	Pizo 2 pour le departement 50	false	Fin	Pizo 2 pour le departement 61	Pizo 2 pour le departement 61	false	Fin	Pizo 2 pour le departement 76	Pizo 2 pour le departement 76	false	Fin
id processus	Libelle	Etat	ChangeEtat																								
Pizo 2 pour le departement 14	Pizo 2 pour le departement 14	false	Fin																								
Pizo 2 pour le departement 22	Pizo 2 pour le departement 22	false	Fin																								
Pizo 2 pour le departement 50	Pizo 2 pour le departement 50	false	Fin																								
Pizo 2 pour le departement 61	Pizo 2 pour le departement 61	false	Fin																								
Pizo 2 pour le departement 76	Pizo 2 pour le departement 76	false	Fin																								
SITUATION TERRAIN																											

FIGURE III.15 – Interface de déduction

Le décideur choisit alors de suivre la recommandation du système ce qui le conduit directement vers l'orchestrateur de processus Iterop. Il choisit ensuite d'exécuter le processus de passage en PIZO niveau 2. Ce processus a été au préalable formalisé dans la base de Processus d'Iterop durant la phase de préparation par les experts métiers du CETE de l'Ouest. Le processus de passage en niveau PIZO 2 est constitué de cinq tâches comme le montre la figure III.16.

Trois correspondent à des tâches d'invocation d'acteurs : *Choisir les départements à changer de niveau*, *Informers les usagers* (réalisées par le CRICR) et *Accuser réception* (réalisée par les acteurs concernés).

Deux correspondent à l'invocation de systèmes d'information : *Informers les acteurs* et *Mettre à jour OPTICCO*. Pour la première tâche, cela correspond à l'invocation du système d'aide à la décision de rédaction d'arrêtés qui permet également d'envoyer des messages de changement de niveau aux acteurs concernés (gestionnaires, préfetures). Pour la seconde, il s'agit de la mise à jour de la base de données de l'outil d'aide à la décision OPTICCO à partir des informations issues de la première tâche du processus (*Choisir les départements à changer de niveau*).

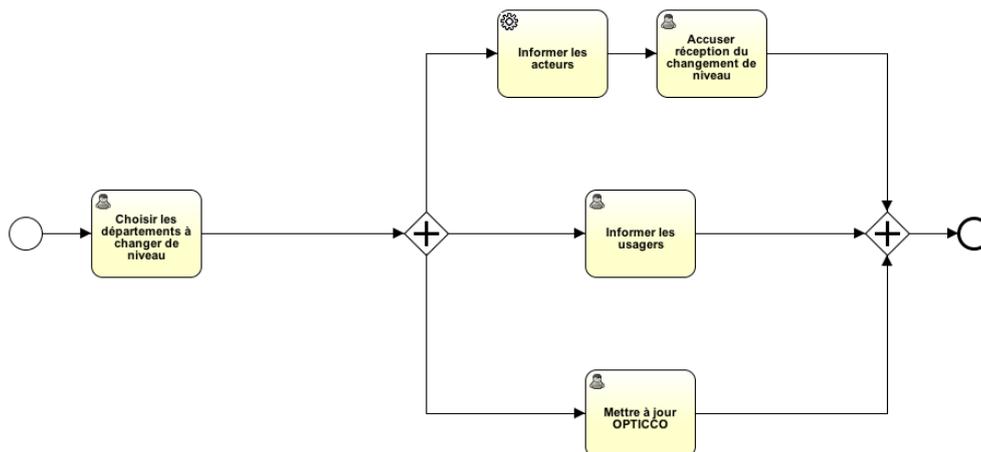


FIGURE III.16 – Processus de passage en PIZO Niveau 2

L'orchestration débute alors par l'invocation des tâches les unes après les autres, dans l'ordre imposé par le processus. Chaque acteur effectue sa tâche puis en valide l'exécution par son interface dédiée. La figure III.17 montre cette interface pour la tâche de choix des départements à changer de niveau PIZO réalisée par le CRICR.



FIGURE III.17 – Interface d'exécution de la tâche de choix des départements

Lorsque le processus est terminé, cela signifie que les départements sont bien passés en PIZO Niveau 2. L'ontologie est alors mise à jour. Cette mise à jour se matérialise également sur l'interface cartographique de représentation (figure III.18).

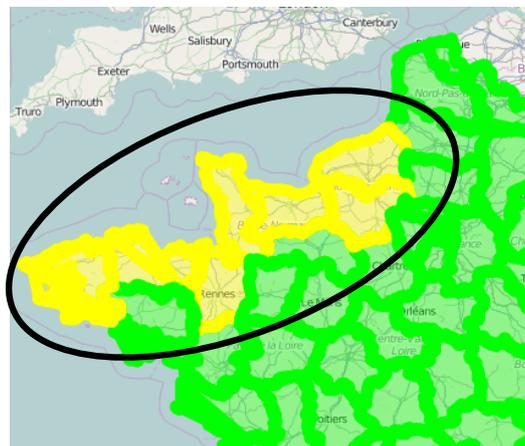


FIGURE III.18 – Mise à jour de l'interface cartographique (couche niveaux PIZO)

III.3.3 Dégradations des conditions de conduite

À 10h du matin, les conditions de conduite sont délicates sur l'autoroute A84. C'est la Direction Interdépartementale des Routes du Nord-Ouest (DIRNO, gestionnaire de l'axe), qui a saisi cette donnée dans le logiciel dédié au renseignement des conditions de

conduite, SERPE-VH. Elle a ensuite été publiée sous la forme d'un fichier XML dont un extrait se trouve en figure III.19.

```
<District name="A84Nord">
  <Itineraire dateMaj="20120319T06:26:18.000+01:00" id="A84-1">
    <CCH>C3</CCH>
    <CCH2>NR</CCH2>
    <Commentaire/>
    <CommentaireInterne/>
    <Equipement>NR</Equipement>
    <Meteo>NR</Meteo>
    <TendanceCC>NR</TendanceCC>
    <Traitement>NR</Traitement>
    <EtatChaussee>NR</EtatChaussee>
    <Temperature>NR</Temperature>
    <Vent>NR</Vent>
    <Sens>Les 2 sens</Sens>
  </Itineraire>
</District>
```

FIGURE III.19 – Extrait du fichier XML des conditions de conduite

À l'instar de la vigilance météorologique, l'information est affichée sur l'interface de visualisation cartographique (figure III.20).

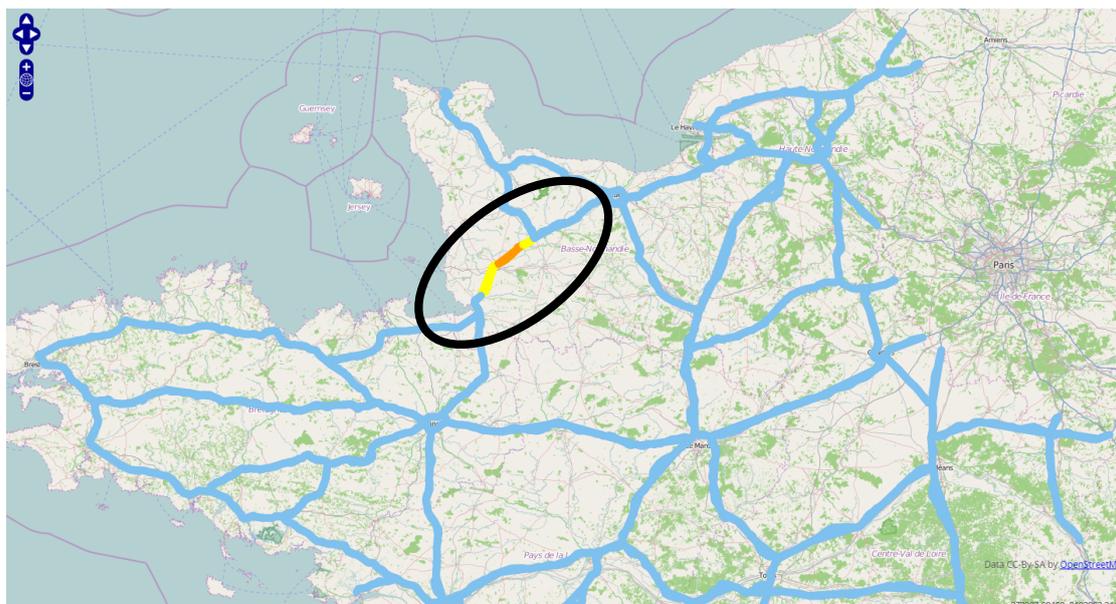


FIGURE III.20 – Affichage des conditions de conduite sur l'interface

Cette information alimente alors la partie « terrain » de l'ontologie. Celle-ci ayant été mise à jour, les règles d'enrichissement y sont appliquées. La section de l'A84 est une zone à forte déclivité (notamment au niveau de la côte de Pont-Farcy), la combinaison avec des conditions de circulation difficiles engendre l'apparition d'un risque d'accident poids lourd sur le modèle terrain. La figure III.21 montre le modèle terrain, sur lequel figurent les éléments « problématiques » (extraits à partir du filtre) et le modèle attendu, sur lequel ne figure aucun élément du modèle puisque la situation est considérée comme normale.

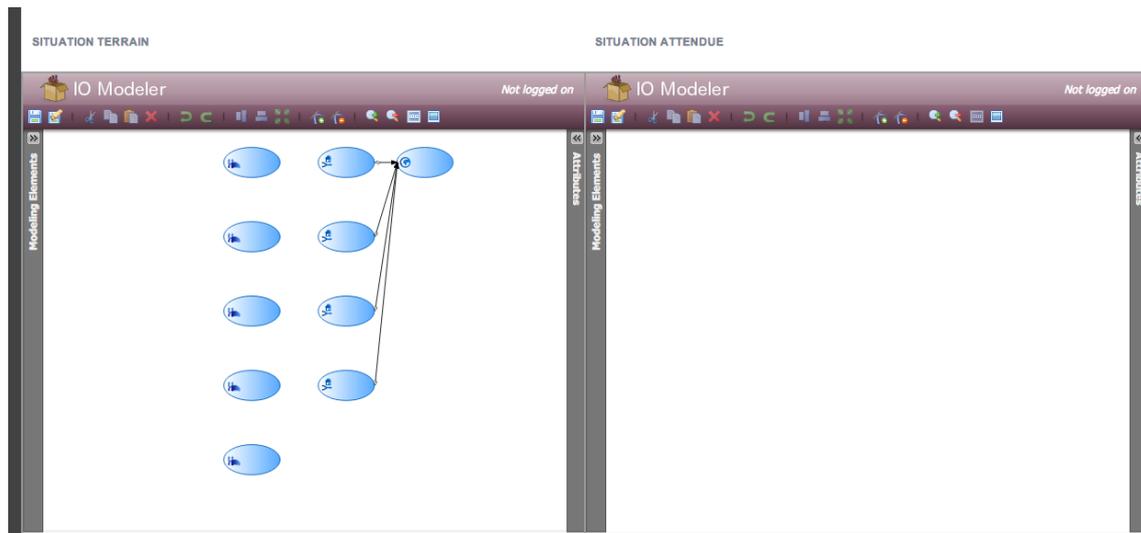


FIGURE III.21 – Modèles terrain et attendu

Le mécanisme de détection / adaptation peut alors commencer. Une comparaison est faite entre les modèles terrain et attendu, celle-ci fait apparaître des éléments de divergence comme le suggère la figure III.22.

id processus	Libelle	Etat	ChangeEtat
différence			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : A84_DIRNO50_PR217_3			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : A84_DIRNO14_PR242_1			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 215			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 225			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : A84_DIRNO14_PR255_2			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 207			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 209			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 21551			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : Tri_A84_DIRNO50_PR217_3			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : A84_DIRNO14_PR249_2			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 20951			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 22551			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 51			
element present sur le model terrain et absent sur le model attendu : 20751			

FIGURE III.22 – Résultat de la comparaison entre modèles terrain et attendu

À partir de ces éléments de divergence, le décideur peut choisir d'adapter le processus courant en effectuant une nouvelle déduction sur la base des éléments présents dans le modèle terrain. Dans notre cas, la nouvelle déduction suggère de prendre les trois mesures suivantes :

- *Interdire la circulation aux poids lourds sur l'A84* afin d'éviter le risque d'accident.
- *Ouvrir une zone de stockage*, décision qui découle de la précédente.

- Passer le département du Calvados en niveau 3 car les mesures de gestion de trafic précédentes se situent sur son territoire
- Passer le département de l'Eure en PIZO niveau 2 car il est limitrophe du Calvados.

L'orchestration de ces processus via Iterop est alors réalisée en mettant en jeu les mêmes mécanismes que ceux décrits précédemment.

III.4 Limites et perspectives

Ce chapitre présente l'implémentation d'un mode de pilotage réactif sur le cas concret de la réponse à une situation de crise routière (projet SIM-PeTra). La mise en œuvre de ce pilotage se fait au cours des trois étapes suivantes :

- La définition de la collaboration par une exploitation de l'ontologie de crise routière alimentée par des systèmes d'informations connectés au Système d'Information de Médiation.
- La réalisation de cette collaboration par l'orchestration du processus défini à l'étape précédente dans un orchestrateur du marché.
- Le maintien de la collaboration grâce à un mécanisme de comparaison des modèles terrain et attendu de la crise.

Cette implémentation reprend et intègre des développements réalisés lors des itérations précédentes du projet de laboratoire MISE. Elle a donné lieu à un prototype industriel déployé au CRICR de l'Ouest durant l'hiver 2013-2014. Nos limites et perspectives vont donc se positionner par rapport à une industrialisation « complète » du mécanisme de pilotage réactif. Les points de développement identifiés sont alors les suivants :

- La prise en compte des données issues des réseaux sociaux dans la modélisation de la situation de crise apparaît comme un enjeu considérable à l'heure où l'usage du smartphone se démocratise. Toutefois, cela pose la problématique de la fiabilité² et de véracité des données.
- Le déploiement de systèmes d'information dédiés à la remontée d'information terrain apparaît aussi comme un enjeu important pour améliorer la modélisation de la situation. C'est notamment le cas pour les informations relatives au remplissage des zones de stockage que les forces de l'ordre transmettent par téléphone à leur hiérarchie.
- Le développement de nouveaux connecteurs avec les systèmes d'information opérationnels et déjà existants permettrait d'invoquer de manière directe des tâches du processus qui correspondent au final à de la saisie dans un système d'information tiers d'informations relatives à la situation. C'est notamment le cas de TIPI (gestionnaire d'évènements routiers) et de SYNERGI (main courante du ministère de l'Intérieur pour le plan ORSEC).
- La version de l'orchestrateur de processus utilisée dans le cadre du projet était

2. Cette problématique de fiabilité dans les données n'est pas abordée dans notre cas puisque les systèmes d'information auxquels nous nous connectons sont institutionnels.

une version alpha. Depuis, de nombreux développements ont été réalisés sur ce produit avec l'implémentation de nouvelles fonctionnalités (tableau de bord dédié à l'exécution de processus, connecteurs mails et dépôt de fichiers implémentés...). Il pourrait être intéressant de déployer une nouvelle version pour en tirer tous les avantages.

- Le mécanisme de détection / adaptation a été réutilisé tel qu'il a été développé dans les travaux de [Barthe, 2013]. Les règles portent donc uniquement sur la couche crise de l'ontologie. Une extension de ces règles à la couche crise routière permettrait une détection plus fine des évolutions et une adaptation plus pertinente de la réponse.

Chapitre IV

Vers un pilotage anticipatif d'une situation de crise routière

Dans le chapitre II, nous nous sommes attachés à développer une ontologie supportant la déduction de la mise en place d'une dynamique collaborative face à une situation de crise routière. Celle-ci propose la conception d'une solution de réponse qui peut être mise en œuvre et pilotée de manière réactive comme l'illustre le chapitre III. Ce mode de pilotage présente toutefois quelques limites puisque c'est la prise en considération du système dans l'état présent qui amène le décideur à s'adapter. Celui-ci ne prend pas en compte les potentielles évolutions de la situation diminuant ainsi la visibilité du décideur. L'enjeu se situe alors dans la pro activité que va avoir la cellule de crise pour faire face aux futurs aléas. Cette situation est d'autant plus critique dans le cas spécifique des crises routières hivernales où un délai incompressible (dû notamment à des aspects administratifs) existe entre le moment où la décision est prise par la cellule de crise et le moment de son application opérationnelle sur le terrain. Il apparaît ainsi nécessaire que le pilotage de ces situations de crise soit réalisé avec un mode « anticipatif » comme le rappelle la figure IV.1.

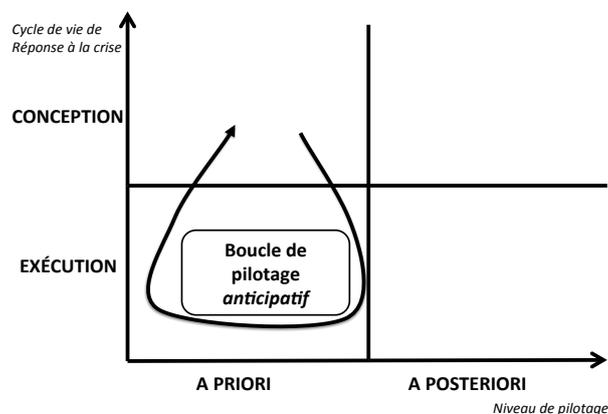


FIGURE IV.1 – Boucle de pilotage anticipatif d'une situation de crise

Dès lors, nous allons chercher à concevoir un outil d'aide à la décision permettant d'appréhender les phénomènes inhérents à une crise routière pour proposer une meilleure visibilité des décisions que doit prendre la cellule de crise. Cet outil propose une projection de la situation de crise et de sa dynamique de réponse dans le futur. L'objectif est ainsi d'évaluer cette réponse et de pouvoir en proposer une adaptation comme le souligne la figure IV.2.

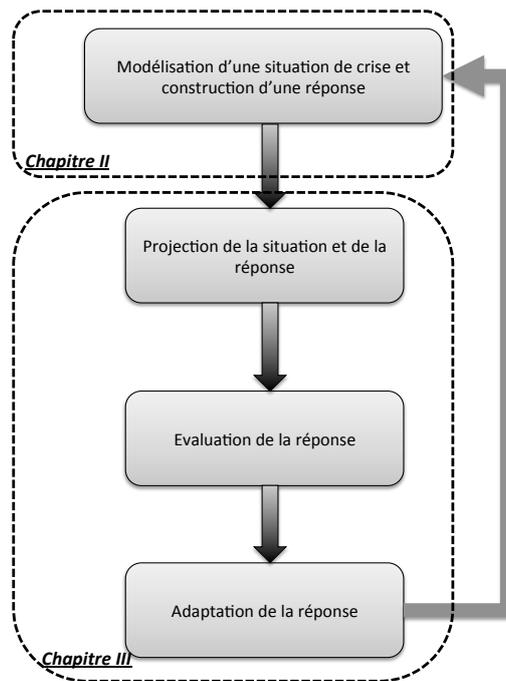


FIGURE IV.2 – Le processus de pilotage anticipatif

Ce chapitre s'organise de la façon suivante : la première partie propose un état de l'art sur l'agilité en gestion de crise, les systèmes d'aide à la décision basés sur les scénarios et la modélisation de trafic routier. La deuxième partie s'attache à détailler la proposition scientifique. La troisième partie illustre cette proposition autour d'un cas d'école illustratif.

IV.1 État de l'art autour de l'agilité

La manière dont les organisations cherchent à évoluer dans un environnement incertain, dynamique et en constante évolution est une problématique à laquelle l'industrie et la recherche académique tentent de répondre depuis une vingtaine d'années. L'évolution des collaborations et des relations industrielles d'une « structure cristalline vers un environnement fluide » [Bénaben *et al.*, 2007] illustre bien un enjeu auquel les organisations doivent faire face : l'élaboration de collaboration inter organisations ne se base plus sur des visions partagées à long terme, mais sur des collaborations opportunistes, caractérisées par leur rapide émergence tout autant que par leur rapide dissolution. Aussi, il

existe un parallèle avec la gestion de crise où les collaborations entre acteurs doivent s'établir de manière efficace, très rapidement, et ce, dans un environnement par nature instable. Cette capacité à répondre rapidement et efficacement aux changements subis peut être considérée comme l'agilité du système.

La définition que donne [l'Académie Française, 2005] de l'agilité est « l'aisance, la vivacité, la légèreté, la souplesse dans l'exécution des mouvements ». Cette définition souligne que la qualification « d'agile » résulte d'une combinaison d'autres propriétés :

- *L'aisance*, qui laisse entendre une certaine facilité à réaliser des mouvements.
- *La vivacité*, qui est liée à la promptitude avec laquelle sont réalisés ces mouvements.
- *La légèreté*, qui peut être prise au sens de la finesse et de la délicatesse d'exécution des mouvements.
- *La souplesse*, qui peut être vue comme la capacité à se plier aux circonstances, à s'adapter.

Cette vision « commune » de l'agilité peut être complétée par les définitions de l'Agilité d'Entreprise dont les premiers travaux se situent au début des années 1990 avec notamment l'émergence des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans les entreprises [Conboy et Fitzgerald, 2004]. Une structure agile est alors vue comme une organisation capable d'apporter une réponse à la fois *flexible* et *rapide* aux changements de son environnement [Breu *et al.*, 2002].

La flexibilité est communément définie comme « la capacité à s'adapter au changement » [l'Académie Française, 2005]. Cette notion d'adaptation au changement peut ainsi être vue de plusieurs façons différentes selon la manière dont l'organisation fait face au changement [Conboy et Fitzgerald, 2004] :

- L'organisation est suffisamment forte pour endurer les changements qu'elle subit, et n'a pas besoin de mettre en place des actions correctives pour y remédier. Ce sont alors des caractéristiques de *robustesse* et de *résilience* de l'organisation qui sont mises en jeu [Hashimoto *et al.*, 1982].
- L'organisation s'adapte en *réponse* aux changements c'est-à-dire lorsque les changements ont impacté l'organisation. Cette flexibilité est qualifiée de « défensive » ou *réactive* [Golden et Powell, 2000].
- L'organisation s'adapte par une *initiative* en anticipant les changements, avant qu'ils surviennent. Cette attitude est alors qualifiée d'« offensive » ou *proactive*.

Pour illustrer notre propos, prenons l'exemple d'une avarie sur une machine comme changement auquel une organisation doit s'adapter. Si celle-ci est *robuste*, la panne machine n'aura aucune incidence sur sa performance (production et productivité). En effet, une flexibilité réactive se fera par un remplacement de la machine lorsque celle-ci tombe en panne tandis qu'une flexibilité proactive consiste en la mise en place d'une maintenance de cette machine pour éviter la panne.

[Charles, 2010] propose dans ses travaux une vision de l'agilité des chaînes logistiques synthétisée autour d'un cadre nommé « maison de l'agilité » (cf. figure IV.3) qui lie la notion d'agilité aux concepts de flexibilité, capacité de réponse et efficacité. La table IV.1 donne une définition plus précise de ces concepts.

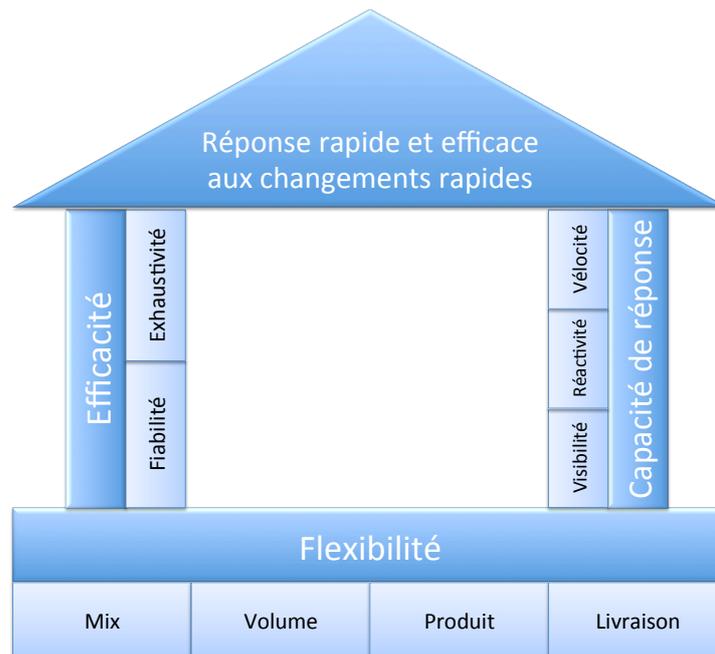


FIGURE IV.3 – La maison de l'agilité [Charles, 2010]

	Capacités	Définitions
Flexibilité	Volume	Capacité à changer le niveau de production totale [Slack, 2005]
	Livraison	Capacité à modifier les dates de livraison planifiées ou présumées [Slack, 2005]
	Mix	Capacité à changer la gamme de produits livrés dans un temps donné [Slack, 2005]
	Produit	Capacité à introduire de nouveaux produits ou modifier ceux existants [Slack, 2005]
Capacité de réponse	Réactivité	Capacité à rapidement identifier et évaluer les besoins
	Vélocité	Capacité à couvrir rapidement les besoins
	Visibilité	Capacité à connaître la nature, la localisation et le statut actuel et futur des entités en transit dans la chaîne logistique [Vernon, 2008]
Efficacité	Fiabilité	Capacité à livrer la bonne quantité du bon produit, au bon endroit, au bon moment, en bon état, avec la bonne documentation, à la bonne personne [Council, 2010]
	Exhaustivité	Capacité à réaliser l'ensemble des objectifs définis

TABLE IV.1 – Les concepts de l'agilité pour les chaînes logistiques d'après [Charles, 2010]

[Barthe, 2013] propose dans ses travaux une définition de l'agilité des processus collaboratifs à partir de la formule suivante :

$$Agilité = (Détection + Adaptation) \times (Réactivité + Efficacité) \quad (IV.1)$$

dans laquelle :

- La *détection* est la capacité du système à déceler une évolution de la situation qui le rend inadéquat vis-à-vis de son positionnement courant.
- L'*adaptation* est la capacité du système à faire évoluer sa structure pour devenir pertinent par rapport au positionnement courant.
- La *rapidité* laisse entendre que la détection et l'adaptation doivent être menées le plus rapidement possible.
- L'*efficacité* qualifie la détection et l'adaptation en termes de performance. Si la première se doit d'être le plus juste possible, la seconde doit être la plus pertinente possible.

Si l'on replace cette définition en regard de celle de l'agilité d'entreprise vue comme la capacité d'un système à apporter une réponse à la fois flexible (robuste, réactive et proactive) et rapide aux changements, il est possible d'identifier un manque au niveau de la flexibilité proactive. En effet, la détection (et de surcroît l'adaptation) se fait uniquement lorsque les problèmes sont apparus. Cette absence d'anticipation se traduit également comme un manque de visibilité pour le décideur (au sens de [Vernon, 2008]) dans l'élaboration de sa décision. Le positionnement de notre outil en tant que support à la cellule de crise zonale (niveau tactique de la décision) impose que le décideur ait une visibilité de la situation et qu'il soit en mesure d'anticiper les changements futurs et de pouvoir y répondre en proposant une stratégie de réponse. Nous proposons donc de compléter la partie détection de la définition de [Barthe, 2013] de l'agilité en y adjoignant une composante anticipative. De fait, l'agilité devient alors proactive.

IV.2 État de l'art autour des scénarios

Les situations de crise et d'urgence sont caractérisées par leur complexité et l'hétérogénéité de l'information à laquelle le décideur a accès [Mendonça *et al.*, 2007]. Pour mettre en place des mesures adéquates de gestion de crise, les décideurs doivent être en capacité de disposer et de comprendre cette information tout en sachant qu'une partie d'entre elles peut être manquante, incertaine ou encore erronée [Van de Walle et Turoff, 2008]. Ces situations amènent une grande part d'incertitude dans les choix des décideurs.

Dans le cadre plus spécifique des crises routières, l'organisation de la réponse à la situation de crise peut faire intervenir plusieurs cellules de crise en fonction de l'échelle du territoire impacté par la crise. La crise peut en effet s'étendre sur plusieurs zones de la France comme en mars 2013 où la crise avait touché à la fois des départements de la Zone Ouest et des départements de la Zone Nord. Dans cette situation, le décideur d'une zone doit également prendre en considération les décisions prises sur une autre zone pouvant ainsi impacter sa propre décision.

Le décideur se trouve ainsi face à une situation complexe dans laquelle il doit :

- Définir la décision à prendre en choisissant parmi différentes alternatives ;
- Prendre en compte un certain nombre d'aléas dans l'élaboration de sa décision ;
- Être sensible aux potentiels impacts que peut avoir une prise de décision réalisée par d'autres décideurs.

Il peut également avoir à sa disposition un ou plusieurs outils lui permettant de l'aider dans sa prise de décision. [Marquès, 2010] propose une démarche d'aide à la décision pour le management des relations industrielles en proposant de coupler le processus de prise de décision (modèle IMC) à celui de management des risques. Pour cela, la démarche se fait en trois étapes :

1. La définition de la situation de décision ;
2. L'évaluation des situations identifiées ;
3. L'évaluation de la situation de décision.

Ce mécanisme permet alors au décideur de disposer d'une vue d'ensemble des alternatives de choix qui lui sont proposées dans un arbre de décision.

Un arbre de décision est une représentation graphique (au sens de la théorie des graphes) d'une procédure de classification. Il s'agit d'un mode de représentation permettant au décideur de disposer de l'ensemble des situations pouvant survenir. Dans [Bouysou *et al.*, 2006], l'arbre de décision sert à représenter des situations de « décision dynamique dans l'incertain ». Il s'agit de présenter au décideur une représentation du monde à un instant t , cette représentation étant amenée à évoluer. Ces évolutions peuvent être d'une part exogènes, hors de portée du décideur, on parle alors d'aléa ou, d'autre part, elles peuvent être endogènes et générées par le décideur lui-même. Ces événements sont respectivement représentés graphiquement par des cercles (pour les aléas) et des rectangles (pour les décisions).

La lecture d'un arbre de décision se fait en partant du nœud racine et en parcourant les branches de l'arbre jusqu'aux feuilles (nœud final). Chaque branche (chemin allant du nœud racine au nœud feuille) constitue un scénario. Il est possible de définir un scénario comme un ensemble d'évènements endogènes (décisions) ou exogènes (aléas) représentant l'évolution possible d'un système au cours du temps. Ainsi l'arbre de décision comprend un ensemble de scénarios possibles d'évolution d'un système. Chaque scénario est ensuite évalué. Cette évaluation reflète l'aspiration ou l'aversion du décideur à se retrouver dans cette situation. Elle peut également comporter une notion de coût en quantifiant notamment l'utilisation des ressources. Il est possible de représenter l'ensemble des évaluations sous forme matricielle, en fonction des états possibles du système et des actions possibles.

Pour illustrer notre propos, prenons l'exemple d'un étudiant habitant Toulouse et étudiant à Albi. Pour se rendre dans son école, il prend le train tous les jours. Une fois à la gare d'Albi, il lui faut encore parcourir 5 kilomètres pour arriver dans son école. Il dispose de deux modes de transport pour s'y rendre : le vélo ou le bus. Le soir, il doit prendre impérativement le même mode de transport qu'il a pris le matin. Chaque matin il doit prendre la *décision* du mode de transport qu'il va prendre en ayant une connaissance incertaine de la météo du soir (aléa). Pour lui, le vélo est le moyen de

transport le plus rapide et le moins cher, mais le moins confortable en cas de pluie. Le bus est plus onéreux et plus lent, mais présente l'avantage de ne pas arriver mouillé à la gare. Le tableau IV.2 représente cette situation sous forme matricielle et la figure IV.4 sous forme d'arbre de décision.

		Décision	
		Vélo	Bus
Aléa	Pluie	-4	+2
	Pas de pluie	+6	-2

TABLE IV.2 – Exemple de matrice d'imputation

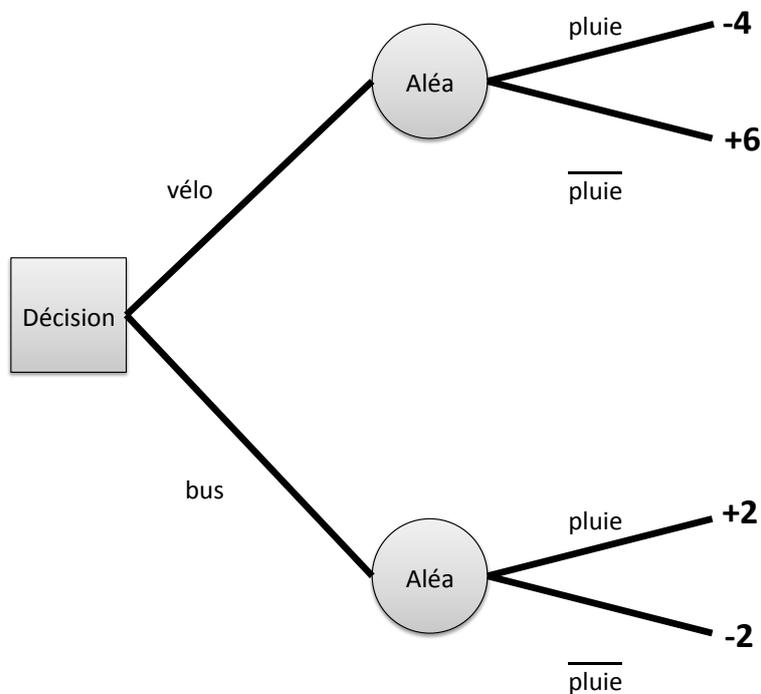


FIGURE IV.4 – Exemple d'arbre de décision

Une fois que l'arbre de décision a été construit, il est possible de réaliser une analyse numérique et d'ordonner les actions à prendre en fonction de critères établis par le décideur. Ces critères reflètent le comportement du décideur (optimisme, prise de risque...). À titre d'exemple on peut citer les critères de Laplace, Wald, Hurwitz, MinMax Regret dont une synthèse a été faite dans les travaux de [Marquès, 2010].

S'il est un outil d'aide à la décision relativement confortable pour le décideur, l'arbre de décision reste toutefois assez lourd et fastidieux à concevoir. En effet, le nombre potentiellement important d'aléas ou de décisions impactant le système complexifie ma-

thématiquement l'arbre de décision par explosion combinatoire. En outre, la pertinence de l'arbre de décision réside dans sa capacité à proposer une description exhaustive des états possibles du monde. Ceci implique que le concepteur de l'arbre soit en mesure d'avoir une vision claire des événements susceptibles d'arriver dans le futur. Enfin, l'arbre de décision présente une flexibilité limitée puisque chaque changement d'un noeud de l'arbre implique une reconfiguration complète des branches en aval de ce noeud.

[Marquès, 2010] propose d'enrichir le modèle classique des arbres de décision en y adjoignant les composantes suivantes :

- La prise de décision se fait dans un contexte *multi décideurs*, c'est-à-dire que le concepteur de l'arbre de décision tient compte de potentielles décisions associées à des décideurs différents.
- Chaque décision peut être évaluée au travers d'indicateurs de performance différents. Ainsi, à chaque scénario est associé un ensemble de valeurs d'indicateurs de performance.
- Chaque décideur possède un comportement différent face aux aléas se présentant devant lui. Ainsi, si chaque aléa est modélisé de la même manière (même probabilité) pour chacun des décideurs, la perception de ceux-ci peut être différente en fonction du décideur considéré.

De ce fait l'arbre de décision proposé par [Marquès, 2010] représente la vision qu'un décideur a sur les comportements induits par les décisions des autres décideurs.

Chaque branche de l'arbre de décision ainsi construit correspond à un scénario dans le sens où elle est une représentation possible de l'évolution que peut prendre le système dans son état futur. Dès lors se pose la question de la manière dont ces scénarios sont construits. [Bradfield *et al.*, 2005] propose un état de l'art sur les différentes méthodes, parfois conflictuelles, d'élaboration de scénarios. Ainsi, il est possible de retenir les trois grandes approches suivantes [Van Notten *et al.*, 2003] :

- L'approche analytique, fruit de l'école « française » [Godet *et al.*, 2000] selon laquelle les scénarios sont bâtis à partir d'une combinaison et d'une variation de paramètres d'entrée d'un modèle de simulation établi. Cette approche assez rigide est utilisée pour la résolution de problèmes très formalisés.
- L'approche intuitive selon laquelle les scénarios sont établis de manière qualitative, et sont le fruit de discussions collectives entre différents experts du domaine [Anastasi *et al.*, 1999]. Cette approche repose sur la créativité des acteurs participant à la longue élaboration du scénario et n'est pas appropriée dans des situations d'urgence.
- L'approche formelle, apparaît comme un compromis entre les deux précédentes, et permet la création de scénarios par la variation de paramètres clés du système dont les liens de cause à effet sur les autres variables du système sont connus [Rotmans *et al.*, 2000]. L'identification de variables clés couplée au diagramme de cause à effet reprend l'approche analytique (et donc présente l'avantage d'être informatisable) tout en conservant un degré de liberté important issu de l'approche intuitive.

En situation de crise, le décideur est amené à prendre des décisions rapidement, sous

incertitude c'est à dire à la fois sous risque (il connaît la probabilité d'occurrence des aléas) et dans l'ignorance (les probabilités d'occurrence des aléas ou les aléas eux-mêmes ne sont pas connus). Pour faire face à cette problématique, [Comes *et al.*, 2011] proposent une procédure de construction de scénario par une approche formelle à partir des étapes suivantes :

- *Identification des critères d'évaluation des scénarios* : il s'agit de mener une réflexion avec les experts métiers sur les indicateurs de performance pertinents à mettre en place pour évaluer chaque scénario. Ces indicateurs sont construits sur la base des objectifs de réponse à la situation de crise.
- *Construction d'un diagramme de causes* : il s'agit d'identifier les variables du système (décisions, aléas) afin de mettre en relief leurs dépendances les unes par rapport aux autres. Ce sont des variables hétérogènes c'est-à-dire que les décisions peuvent être prises par différents décideurs et les aléas proviennent de sources différentes.
- *Construction des scénarios* : à partir du diagramme précédent, il est possible de construire plusieurs scénarios compte tenu des valeurs que peuvent prendre les différentes variables. Ces valeurs peuvent être binaires (vrai ou faux) si ce sont des décisions ou prendre des valeurs de probabilité si ce sont des aléas.
- *L'évaluation des différents scénarios* : chaque scénario est ensuite évalué en se basant sur les critères d'évaluation définis lors de la première étape.

L'évaluation de scénario pour la construction d'arbres de décision apparaît donc comme une solution envisageable pour réaliser un pilotage proactif et anticipatif de la réponse à une situation de crise. Toutefois, la construction de scénarios repose sur une analyse des impacts des variables les unes par rapport aux autres. Notre système étant composé d'un réseau routier, il nous apparaît donc indispensable de réaliser une présentation de la modélisation du trafic routier.

IV.3 État de l'art autour de la modélisation de trafic

IV.3.1 Différentes approches de modélisation du trafic routier

L'étude scientifique de la circulation routière a débuté dans les années 1930 avec les travaux de [Greenshields *et al.*, 1934]. L'intensification de l'usage de la voiture après la Seconde Guerre mondiale s'est accompagnée de la multiplication des études concernant le trafic routier. Aussi, à l'instar des modèles de représentation des gaz, le trafic routier peut être représenté en fonction du niveau de détail auquel on s'attache [Hoogendoorn et Bovy, 2001] :

- *L'approche microscopique* de modélisation du trafic routier propose de considérer chaque véhicule de manière individuelle. Il s'agit de représenter le comportement de chaque usager par le mouvement de son véhicule. Chaque conducteur est modélisé par un ensemble de paramètres (vitesse souhaitée, accélération, comportement agressif...) et l'étude porte sur l'ensemble des trajectoires individuelles. Il s'agit d'une vision très détaillée du trafic pour la représentation de phénomènes locaux

- (modélisation d'un carrefour, de changements de voies).
- *L'approche macroscopique* de modélisation du trafic routier considère que l'écoulement d'un trafic routier est similaire à celle d'un fluide. L'étude ne porte donc plus sur les véhicules pris individuellement, mais sur des variables agrégées telles que le débit, la concentration ou la vitesse moyenne des véhicules. Les lois de comportement suivent donc celles de la mécanique des fluides. Cette représentation est utilisée pour expliquer des phénomènes plus globaux du trafic routier (congestion sur autoroute...).
 - *L'approche mésoscopique* se situe à la frontière entre les deux approches précédentes. Il est ainsi possible de combiner les descriptions microscopiques (comportement des conducteurs, vitesses désirées) et de les agréger pour calculer les variables macroscopiques (débit, concentration...). Il s'agit de représenter le mouvement de « paquets » de véhicules se déplaçant ensemble.

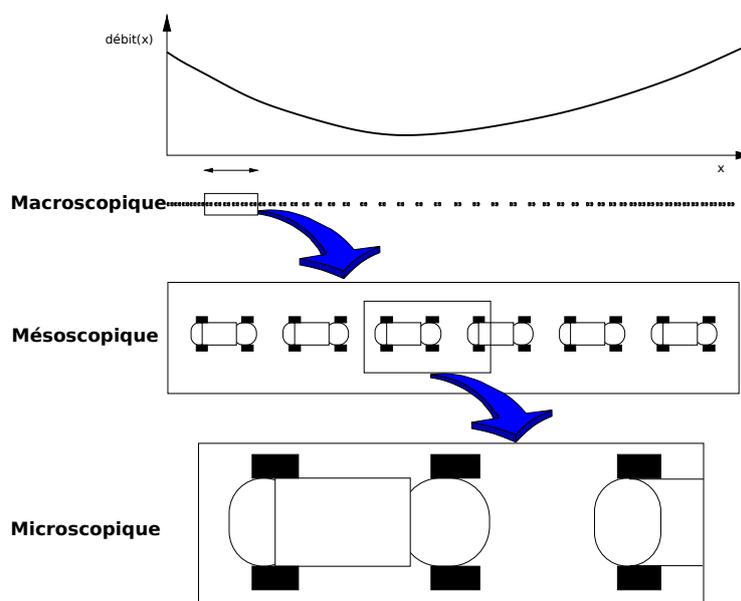


FIGURE IV.5 – Les différents niveaux d'échelle d'observation d'un trafic routier

Dans le cadre de nos travaux, le réseau routier sur lequel porte notre étude est constitué uniquement de voies rapides et s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres. Nous allons donc chercher à déterminer des variables de trafic macroscopiques. Toutefois, il est également nécessaire pour calculer ces variables sur l'ensemble du réseau de modéliser les comportements des véhicules (notamment en matière d'origine et de destination). Aussi, l'échelle à laquelle il est pertinent d'observer le trafic est l'échelle mésoscopique. Cependant, pour constituer un modèle mésoscopique, il est nécessaire de choisir un modèle macroscopique, objet de la section suivante.

IV.3.2 Modélisation macroscopique du trafic routier

IV.3.2.1 Les variables macroscopiques de description du trafic routier

L'objectif principal de la modélisation et de la simulation du trafic est de pouvoir quantifier le problème principal du trafic routier, la congestion routière et de concevoir et d'évaluer des solutions à cette problématique. Aussi, pour y parvenir, la caractérisation d'un système routier à l'échelle macroscopique se fait (par analogie hydromécanique) en calculant les variables macroscopiques suivantes :

- Le débit $q(t)$ définit la répartition des véhicules dans le temps. Il correspond, en un point de la route au nombre de véhicules passant par ce point durant une période donnée. Il s'exprime usuellement en nombre de véhicules par heure. Le débit de véhicules s'obtient assez aisément grâce à la présence de capteurs (boucles magnétiques de comptage) disposés en des points donnés du tronçon étudié.
- La concentration $k(t)$ définit la répartition des véhicules dans l'espace. Il s'agit de mesurer le nombre de véhicules présents sur une section à un instant donné. Elle s'exprime en nombre de véhicules par kilomètre. La concentration de véhicules est assez difficile à mesurer de manière automatique, elle peut se calculer par analyse de photos du trafic (vues d'hélicoptère, caméra de surveillance) à un instant donné.
- La vitesse moyenne d'espace $u_s(t)$ correspond à la moyenne arithmétique des vitesses des véhicules présents à un instant donné sur une section de route.
- La vitesse moyenne temporelle $u_t(t)$ correspond à la moyenne arithmétique des vitesses instantanées des véhicules passant en un point donné de la route pendant un intervalle de temps donné.

Considérons un parcours circulaire d'une longueur de deux kilomètres sur lequel quatre voitures effectuent des essais pendant une durée d'une demi-heure à des vitesses de 80, 100, 120 et 140 km/h. Déterminons maintenant les variables macroscopiques suivantes :

- *Débit* : durant une heure, le premier véhicule passera la ligne de départ 40 fois, le deuxième 50 fois, le troisième 60 fois et le quatrième 70 fois d'où un débit $q = 40 + 50 + 60 + 70 = 220\text{véh}/h$
- *Concentration* : 4 véhicules roulent sur le circuit d'une longueur de 2 km soit une concentration $k = \frac{4}{2} = 2\text{véh}/km$
- *Vitesse moyenne d'espace* par définition on a : $u_t = \frac{80+100+120+140}{4} = 110\text{km}/h$
- *Vitesse moyenne temporelle* il s'agit de la moyenne des vitesses des véhicules passant en un point donné de la piste. Si l'on raisonne sur une durée d'une heure, on obtient ainsi la vitesse moyenne temporelle suivante : $u_t = \frac{40*80+50*100+60*120+70*140}{220} = 114,54\text{km}/h$

IV.3.2.2 Obtention d'un modèle macroscopique

Une autre manière de définir la vitesse moyenne est de considérer qu'elle est le rapport entre le débit et la concentration. Cette relation liant débit, concentration et vitesse

s'appelle la relation fondamentale du trafic et peut s'écrire sous la forme suivante [Barceló, 2010] :

$$Q(x, t) = K(x, t) * V(x, t) \quad (\text{IV.2})$$

En outre, le principe de conservation du nombre de véhicules (équivalent à celui de conservation de la masse en hydrodynamique) peut s'exprimer de la manière suivante : sur un tronçon d'abscisse comprise entre x_1 et x_2 , la variation du nombre de véhicules entre deux instants t_1 et t_2 est égale à la différence entre le débit de véhicules entrés en x_1 entre t_1 et t_2 et le débit de véhicules sortis en x_2 entre t_1 et t_2 . Cette équation de conservation s'exprime de la manière suivante sous sa forme intégrale :

$$\int_{x_1}^{x_2} [k(x, t_2) - k(x, t_1)] dx = \int_{t_1}^{t_2} [q(t, x_2) - q(t, x_1)] dt \quad (\text{IV.3})$$

Elle s'écrit sous forme différentielle de la manière suivante :

$$\frac{\partial k}{\partial t}(x, t) + \frac{\partial q}{\partial x}(x, t) = 0 \quad (\text{IV.4})$$

Aussi, les deux équations précédentes (relation fondamentale et conservation du nombre de véhicules) ne sont pas suffisantes pour déterminer les trois inconnues que nous cherchons pour caractériser le trafic (concentration, débit et vitesse).

Pour cela, [Lighthill et Whitham, 1955] ont supposé que le système se trouve de manière permanente en équilibre, ce qui revient à considérer que la vitesse est une fonction monotone décroissante de la concentration. Ce modèle appelé LWR¹ est également cité comme modèle du premier ordre. La relation liant la concentration à la vitesse est appelée *diagramme fondamentale* et introduit la troisième équation manquante à l'élaboration d'une solution :

$$V(x, t) = V_{eq}(K(x, t)) = V(K) \quad (\text{IV.5})$$

Il existe plus de 25 diagrammes fondamentaux différents dans la littérature [Gerlough et Huber, 1975]. L'un des plus connus est le diagramme parabolique de [Greenshields *et al.*, 1935] considérant la vitesse comme une fonction linéaire de la concentration. Il en résulte donc d'après la relation fondamentale du trafic, que le profil du débit en fonction de la concentration est une hyperbole. Ce modèle (certes limité) présente l'avantage d'être suffisamment simple et robuste pour être exploité par les présents travaux. La figure IV.6 présente ces courbes sur lesquelles il est possible d'identifier des valeurs caractéristiques :

- Q_{max} correspond au débit maximal qu'il est possible d'avoir sur un tronçon donné. On parle également de capacité maximale du tronçon (exprimée en unité de comptage de véhicules par unité de temps).
- K_{cr} correspond à la concentration critique de véhicules pour laquelle la valeur maximale du débit est atteinte (exprimée en unité de comptage de véhicules par unité de distance). Pour une concentration supérieure à K_{cr} , le trafic devient de plus en plus difficile, K_{cr} étant la valeur limite de fluidité du trafic.

1. issu des initiales de leurs inventeurs : Lighthill, Whitman et Richards

- V_{max} correspond à la vitesse théorique à laquelle il est possible de rouler sans être gêné par d'autres véhicules (concentration quasi nulle).
- K_{max} correspond à la valeur théorique de la concentration maximale en véhicules que l'infrastructure routière peut accueillir.

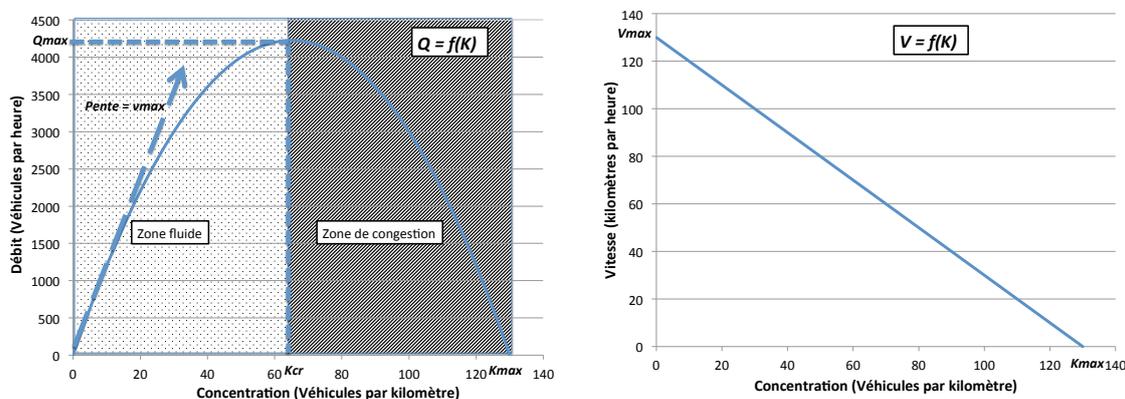


FIGURE IV.6 – Les relations entre vitesse, débit et concentration

IV.3.2.3 Impacts des conditions météorologiques sur les variables de trafic

Le caractère hivernal des crises routières que nous cherchons à caractériser nous oblige à considérer les impacts des conditions météorologiques hivernales sur les variables de trafic routier présentées précédemment. Intuitivement, un conducteur ayant expérimenté une conduite en conditions hivernales peut facilement admettre que les chutes de neige et la présence de neige sur la chaussée l'ont amené à réduire considérablement sa vitesse de circulation. Si, qualitativement, le phénomène est aisé à percevoir, il semble difficile de le quantifier. En effet, établir un modèle d'impact de conditions hivernales sur le trafic routier dépend avant tout de la région considérée, la vitesse de circulation d'un usager sous la neige étant fortement liée à son habitude de conduire dans de telles conditions. Toutefois la question a fait l'objet d'études menées dans des pays soumis fréquemment à des conditions hivernales : Allemagne [Brilon, 1994], Japon [Thaneseun *et al.*, 2010], Royaume-Uni [Hounsell *et al.*, 1994], Canada [McGuire *et al.*, 2005], États-Unis [Kononov *et al.*, 2012]. Le Highway Capacity Manual considère que de faibles chutes de neige entraînent une réduction de capacité de l'ordre de 5 à 10 % tandis que de fortes précipitations neigeuses entraînent une réduction de capacité d'environ 30 %. Dans une étude de l'impact des conditions météorologiques sur le trafic autoroutier, [Agarwal *et al.*, 2005] confirment ces réductions en étant plus précis sur les quantités de neige tombée. Le tableau IV.3 reprend ces éléments.

Précipitations	Intensité neigeuses (mm/heure)	Réduction de vitesse
Traces	$\leq 0,127\text{cm}$	3-5%
Légères	0,127cm-0,254cm	7-9%
Modérées	0,254cm-1,27cm	8-10%
Fortes	$> 1,27\text{cm}$	11-15%

TABLE IV.3 – Réduction de vitesse en fonction des précipitations neigeuses [Agarwal *et al.*, 2005]

Les études précédemment citées ne s'intéressent qu'à l'impact des conditions météorologiques sur les conditions de trafic et ne prennent pas en compte l'état de la chaussée. L'étude menée par [Kwon *et al.*, 2013] propose, d'une part, de confronter les théories du Highway Capacity Manual avec des résultats terrains issue d'une étude sur la ville de Toronto et, d'autre part, d'étudier l'impact de l'état de la chaussée sur la réduction de la vitesse. Pour cela, un index de surface de chaussée (*RSI : Road Surface Index*) est calculé à partir du croisement de données météorologiques (température de chaussée, quantité de neige tombée), d'images de vidéo surveillance du trafic et de rapports de patrouilles. En croisant l'index RSI avec les données de vitesse et débit relevées par les capteurs, les vitesses et capacités sont modélisées par les équations suivantes :

$$V(\text{km/h}) = 9,54 * RSI - 0,86 * \text{Précipitations}(\text{cm/heure}) + 85,41 \quad (\text{IV.6})$$

$$Q_{\text{max}}(\text{véh/h}) = 619,06 * RSI - 31,97 * \text{Précipitations}(\text{cm/heure}) + 1222,89 \quad (\text{IV.7})$$

Les différentes études menées sur la modélisation de trafic en conditions hivernales donnent des résultats très qualitatifs. Ces résultats sont obtenus en menant des études expérimentales par une analyse de nombreuses données de trafic. De ce fait, celles-ci nous viennent essentiellement de régions habituées à subir des intempéries neigeuses. Or, il est évident que la modélisation des variables de trafic soumis à des conditions météorologiques dépend du comportement des usagers et donc de leur accoutance à conduire sous la neige. La région sur laquelle porte notre étude (le Nord-Ouest de la France) n'étant pas une région exposée aux conditions hivernales, il n'existe pas d'études concernant la modélisation de trafic hivernal. Nous ferons donc l'hypothèse d'une réduction de 15% de la vitesse maximale (valeur maximale de [Agarwal *et al.*, 2005]) en cas de chutes de neige.

IV.3.3 Modèle d'affectation du trafic

Les modèles d'affectation du trafic s'intéressent à la répartition de la demande de déplacement sur un réseau en tenant compte des choix des conducteurs face aux options proposées par le système de transports. Ces modèles peuvent être multimodaux ou uniquement dédiés au trafic routier. [Merchant et Nemhauser, 1978] ont été les premiers à développer un système d'affectation dynamique du trafic.

Dans le cadre d'une utilisation uniquement relative à des problématiques de circulation routière, un modèle d'affectation du trafic simule le choix d'un itinéraire réalisé par un automobiliste en fonction des caractères du conducteur et du réseau [Leurent, 1995]. Il sert à simuler la réaction des conducteurs (demande) face à d'éventuelles modifications du réseau (offre). La figure IV.7 présente le schéma de principe d'une affectation dynamique du trafic.

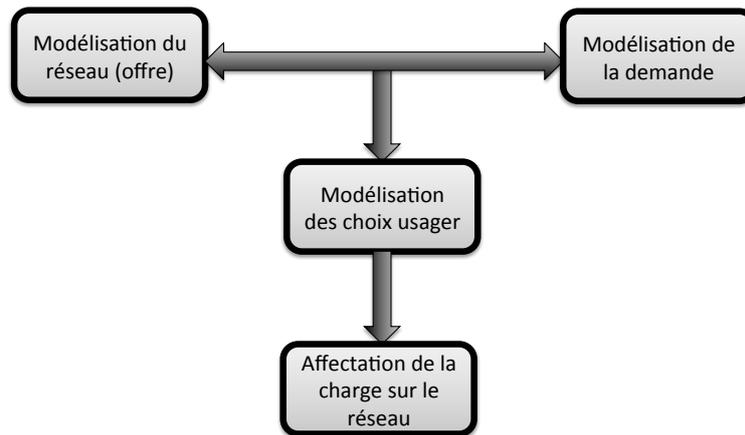


FIGURE IV.7 – Schéma de principe du processus d'affectation dynamique du trafic [Barceló, 2010]

Afin de constituer un modèle d'affectation du trafic, le concepteur doit être en mesure de fournir les données suivantes :

- *La topologie du réseau* : il s'agit de modéliser le réseau routier sur lequel l'étude porte. La représentation se fait de manière générale sous la forme d'un graphe orienté.
- *La constitution d'une matrice Origine-Destination (O-D)* : il s'agit de renseigner le nombre de véhicules souhaitant aller d'un point A vers un point B du réseau à un moment donné. Les matrices O-D peuvent s'obtenir par analyse de données de trafic (reconstitution à partir de données de débit) ou par réalisation d'enquêtes (analyse de plaques minéralogiques sur les horaires choisis).
- *Le choix et le paramétrage du modèle d'écoulement* selon l'échelle de l'observation, le modèle d'écoulement peut être microscopique ou macroscopique, l'objectif étant de pouvoir calculer les temps de parcours dans le réseau modélisé. Le temps de parcours joue un rôle significatif puisque c'est lui qui va déterminer le comportement des usagers et leur appétence à choisir un itinéraire.

Dès que ces données sont connues, l'affectation du trafic peut commencer. Il s'agit de « répartir » la demande de déplacement (issue des matrices O-D) entre les différentes options proposées par le réseau. Se pose alors la question du choix des usagers, c'est-à-dire la manière dont l'utilisateur va choisir son itinéraire dans le réseau. De prime abord, il est de bon ton de considérer que les usagers se comportent de manière rationnelle c'est-à-dire que « chaque conducteur cherche à minimiser le coût de son déplacement » [Henn,

2001]. Toutefois, le coût réel du déplacement peut différer du coût minimal envisagé par le conducteur au moment de l'élaboration de son itinéraire. A priori, le choix de l'utilisateur peut donc se décrire de différentes manières [Durlin, 2008] :

- *Déterministe* : une seule option est considérée (la plus courte).
- *Stochastique* : plusieurs options sont considérées et sont pondérées par une probabilité de choix.

L'affectation déterministe a été introduite par [Wardrop, 1952] et suppose que les conducteurs ont une maîtrise totale du réseau (ils en connaissent tous les coûts des options) et sont rationnels (ils choisissent le plus court chemin). Ainsi le principe de Wardrop s'énonce de la manière suivante : « pour chaque couple origine destination, les chemins utilisés ont le même coût *généralisé* et celui-ci est inférieur aux coûts des chemins non utilisés ».

Les modèles d'affectation stochastiques introduisent la notion « d'option raisonnable » et reposent sur les trois principes suivants [Dial, 1971] :

- Une option raisonnable est susceptible d'être choisie, sa probabilité d'être choisie n'est donc pas nulle.
- À coûts égaux, deux options raisonnables ont la même probabilité d'être choisies.
- Une option raisonnable moins coûteuse a une probabilité d'être choisie plus importante qu'une option plus coûteuse.

Parmi les modèles stochastiques remarquables, on peut citer [Daganzo et Sheffi, 1977] [Papola, 2004] ou encore [Bierlaire, 2006].

Une fois que les choix des usagers ont été modélisés, il faut réaliser l'affectation de la demande au travers du réseau routier. Le système DYNASMART [Mahmassani, 2001] considère quatre règles possibles d'affectation correspondant aux différentes classes de conducteurs :

- La première classe de conducteurs considère les usagers comme agissant de manière à optimiser le système routier pris dans son ensemble. Chaque chemin emprunté par les usagers appartient à la solution optimale de minimisation des coûts de l'ensemble du système. Aussi, le chemin ainsi emprunté peut ne pas correspondre à l'optimum du chemin pris de manière individuelle. De ce fait, cette règle correspondrait à un monde dans lequel les usagers seraient entièrement guidés dans leur progression au travers du réseau. C'est l'objet des travaux de [Mahmassani et Peeta, 1995] qui proposent un système de guidage électronique à destination des usagers dans le cadre d'un trafic congestionné.
- La deuxième classe considère que les usagers suivent les chemins optimaux qui leur correspondent. Cette règle suit le principe d'un choix déterministe de l'utilisateur.
- La troisième classe considère les usagers comme étant connectés tout au long de leur voyage et qu'ils sont à même de changer leur itinéraire au cours de leur trajet en fonction des informations en temps réels dont ils disposent.
- La dernière classe considère que les usagers sont informés des conditions de leur déplacement avant leur départ. Ils choisissent leur itinéraire en fonction des conditions de trafic au moment de leur entrée sur le réseau et n'en changent pas, quelles que soient les évolutions futures.

IV.4 Proposition scientifique

À l'heure actuelle, les décisions que prennent les experts au sein de la cellule de crise se font uniquement à partir de la situation présente de la crise et sans une réelle prise en compte des possibles évolutions de la situation. En outre, le décideur dispose d'outils de prévisions (météorologiques, trafic routier) trop peu utilisés en situation de crise. Dès lors, l'objectif de notre proposition est d'exploiter ces outils de prévisions pour évaluer la stratégie mise en œuvre par la cellule (réponse courante et future à la situation de crise) grâce à une projection de la situation dans le futur. Le but de ce mécanisme est d'évaluer l'impact et la pertinence des décisions prises au regard de l'évolution probable de la situation de crise.

Cette section s'organise en quatre parties. La première partie traite des hypothèses retenues pour développer les différents modèles (scénario, trafic) ; la deuxième donne une vision d'ensemble du mécanisme de projection qui sera détaillé module par module dans la troisième partie. Enfin, la dernière partie établit les limites de notre approche et les perspectives qui en découlent.

IV.4.1 Hypothèses

Avant de commencer à détailler la proposition scientifique en tant que telle, il convient de poser les hypothèses que nous avons prises pour la construire.

1. Tout d'abord, nous considérons que le décideur possède une connaissance et une expérience suffisante de son réseau pour déterminer l'estimation de la demande de trafic d'une zone a vers une zone b à un instant donné. Ainsi, il est à même de fournir une matrice O-D quantifiant l'ensemble des déplacements entre ces zones en fonction du moment de la journée auquel nous nous trouvons. Cette hypothèse se justifie par le fait que les gestionnaires routiers sont capables de calculer des matrices O-D en confrontant les données de trafic (débit, vitesses) à des méthodes d'analyses statistiques [Arfaoui, 1999]. Il en résulte alors un ensemble de matrices O-D dépendant du moment de la journée (heure de pointe, journée, soirée, nuit), de la semaine (jour de travail ou week-end) ou de l'année (période de vacances).
2. Ensuite, nous considérons que l'écoulement du trafic dans le réseau se comporte selon un modèle du premier ordre (la vitesse est une fonction de la concentration) et que la vitesse moyenne de déplacement en un point du réseau est proportionnelle à la concentration en véhicules sur ce réseau [Greenshields *et al.*, 1935]. Ce modèle simple suffit à notre étude dont le but n'est pas d'obtenir une quantification exacte des données de trafic, mais plus une qualification grossière de l'état du trafic (inexistant, fluide, dense, saturé).
3. Enfin, nous considérons que les probabilités des aléas auxquels est soumis le réseau routier sont connues du décideur. En d'autres termes, le décideur dispose de prévisions fiables sur l'évolution probable de la situation. Cette hypothèse se justifie pour deux raisons. D'une part, la nature des crises routières hivernales implique que celles-ci soient fortement liées aux conditions météorologiques et au

trafic routier, variables dont il est possible d'établir des prévisions de manière assez précise. D'autre part, l'horizon de la prise de décision pour laquelle le système est défini ne dépasse pas six heures, horizon pour lequel il est possible d'avoir des prévisions (notamment météorologiques) extrêmement fiables.

IV.4.2 Vision d'ensemble et démarche globale

L'objectif de notre démarche est d'évaluer la pertinence de prises de décision en situation de crise par rapport aux évolutions probables de la situation de crise. La figure IV.8 propose un diagramme d'influence montrant de manière qualitative les interdépendances entre les différentes variables manipulées. Il découle des éléments apportés par la section IV.3 d'état de l'art autour de la modélisation de trafic. Ce diagramme démontre la sensibilité des variables de trafic routier aux aléas et décisions de gestion de trafic. Par suite, les risques conséquents à ce trafic peuvent être évalués.

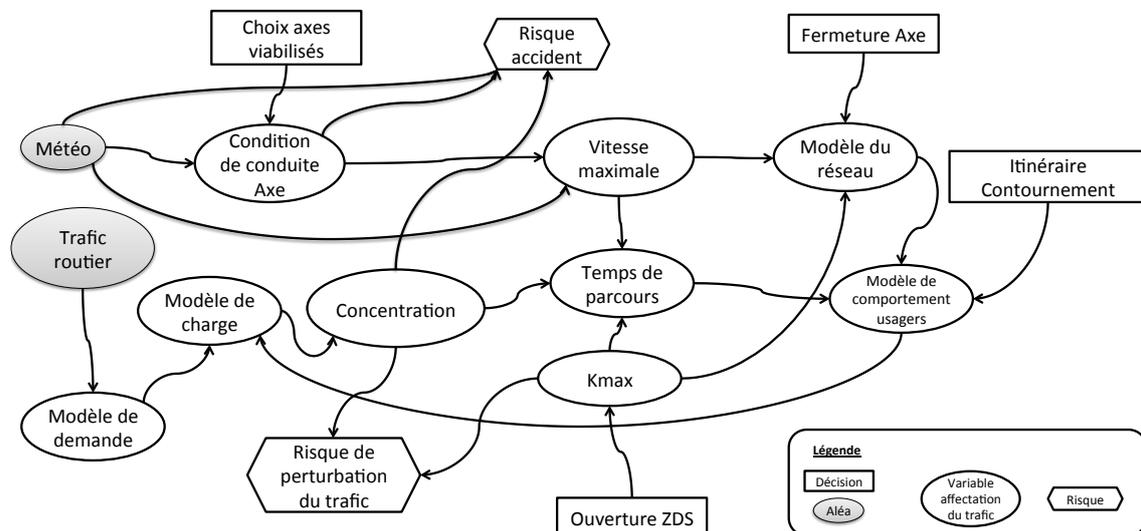


FIGURE IV.8 – Diagramme d'influence

Nous proposons alors que l'utilisateur définisse un premier scénario dans lequel figurent, d'une part, les prévisions des futurs aléas (météorologique et trafic), et d'autre part, les processus de réponse à la crise potentiellement en cours de réalisation. Sur la base de ce scénario, une « projection » de la situation est réalisée. Celle-ci s'effectue en deux temps :

- l'affectation du trafic routier à partir d'un scénario conduisant à un modèle de charge du réseau.
- la projection de ce modèle de trafic sur le modèle de crise permettant d'alerter les décideurs sur les effets et les risques potentiels.

Ce modèle donne ensuite lieu à l'évaluation du scénario (notamment sur la base d'indicateurs de performance) puis ce dernier est intégré en tant que branche d'un arbre de décision. Le modèle de crise est aussi analysé afin de déduire une nouvelle stratégie de

mesures de gestion de trafic par application des règles énoncées dans le chapitre II. La stratégie ainsi déduite permet la construction d'un nouveau scénario qui à son tour va subir les étapes de projection, évaluation et intégration dans l'arbre de décision. Le mécanisme est alors itéré autant de fois que nécessaire pour aboutir à un arbre de décision proposant suffisamment d'alternatives pour le décideur.

Cette démarche peut être regroupée en trois modules articulés de la façon suivante :

- *Le module de construction de scénario* propose l'élaboration et la formalisation du scénario que l'on va chercher à évaluer. Il se base sur les prévisions d'aléas dont dispose la cellule de crise et la stratégie que celle-ci va chercher à mettre en place.
- *Le module de projection* cherche à établir, sur la base du scénario défini précédemment, les différents états et la dynamique du système. La projection se base sur une simulation pas-à-pas du système sur un horizon donné.
- *Le module d'analyse et évaluation* a pour but d'évaluer le scénario défini en termes de performance en se basant sur l'analyse du modèle de crise projeté.

La figure IV.9 illustre ce mécanisme.

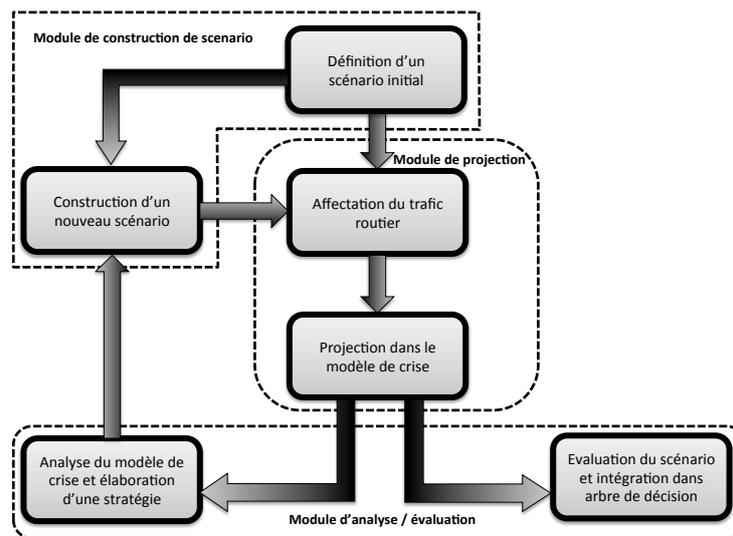


FIGURE IV.9 – Schéma de principe de la démarche globale

Pour illustrer et imaginer cette démarche globale, prenons l'exemple d'une course cycliste au cours de laquelle un coureur est échappé solitaire et possède 4 minutes d'avance sur le peloton à 50 kilomètres de l'arrivée. Traditionnellement et culturellement, l'objectif du peloton (et notamment des sprinteurs le composant) est de retarder au maximum la poursuite de l'échappée afin de rattraper le coureur échappé au dernier moment (le plus proche possible de la ligne d'arrivée). Ceci permet à la fois de contrôler la course (éviter toute nouvelle échappée) et de s'assurer un final au sprint.

Considérons le directeur d'une équipe de sprinteur qui doit prendre la décision du moment où il va ordonner à ses coureurs de lancer la poursuite de l'échappée. Pour cela

il utilise le théorème de Chapatte² qui stipule que, lors d'une course cycliste, un échappé solitaire poursuivi par un peloton perd alors une minute tous les 10 kilomètres parcourus (il est à noter que ce théorème ne s'applique que pour les étapes de plaine). Il prend alors la décision d'engager la poursuite à 40 kilomètres de l'arrivée. Il cherche toutefois à avoir un comportement proactif et décide de mettre en œuvre la démarche globale de pilotage anticipatif de la figure IV.9.

Il définit ainsi le scénario initial qui comprend sa stratégie (engager la poursuite à 40 kilomètres de l'arrivée), les prévisions (météorologiques), les informations concernant le cycliste échappé (profil du coureur) et les informations sur l'étape en cours (caractéristiques du final...). Sur la base de ce scénario, il établit une projection (grâce à un simulateur de course par exemple) de la situation à l'arrivée (présence éventuelle de coureur échappé). Le résultat de cette projection prévoit que le coureur échappé le soit encore à l'arrivée et gagne l'étape (notamment à cause du final sinueux qui fausse la conjecture faite par Robert Chapatte en empêchant le peloton de rouler à vive allure). Le module d'analyse et d'évaluation va mettre en évidence les faiblesses de cette stratégie et sur la base des différents résultats de la projection, le directeur sportif va élaborer une nouvelle stratégie (par exemple d'engager la poursuite à 45 kilomètres de l'arrivée). Celle-ci va de nouveau être projetée jusqu'à ce que le directeur sportif obtienne une stratégie performante et satisfaisante.

IV.4.3 Définition d'un scénario initial

La première étape de la démarche consiste en la définition d'un scénario qui va servir de base à l'ensemble du mécanisme de projection. Si l'on suit le framework proposé par [Comes *et al.*, 2011], le scénario est construit à partir d'un diagramme de cause à effet dans lequel sont recensés les décisions et aléas que peuvent subir le système afin d'établir des relations de dépendance entre elles. À partir de la figure IV.8, il est ainsi possible d'identifier les éléments constitutifs d'un scénario : les décisions et les aléas. Il s'agit de la formalisation des éléments de prévision que la cellule de crise possède. Selon leur origine, il est possible de classer ces éléments en deux catégories :

- *Les éléments de nature exogène* correspondent aux éléments que va subir l'organisation et sur lesquels elle ne pourra pas agir directement. Ils correspondent aux aléas comme les conditions météorologiques, l'apparition d'accidents de la circulation...
- *Les éléments de nature endogène* sont les variables d'action découlant de décisions prises par la cellule de crise. Elles correspondent aux mesures de gestion de trafic et à leur mise en œuvre.

La première définition de scénario correspond à la définition d'un scénario contenant uniquement des éléments de nature exogène, c'est à dire, sur lesquels la cellule de crise ne peut pas mener d'action. C'est le cas des conditions météorologiques, du trafic routier, mais aussi des décisions prises dans le passé sur lesquelles la cellule de crise s'est engagée

2. Du nom d'un coureur cycliste reconverti en commentateur sportif qui a popularisé une règle décisionnelle empirique sous cet intitulé « pompeux ».

et ne peut plus revenir. Ce scénario sert ensuite de base pour la construction de nouveaux scénarios, qui l'enrichissent en y ajoutant des éléments de nature endogène correspondant à l'élaboration d'une nouvelle stratégie.

Ainsi, un scénario peut être perçu comme une chronologie de ces éléments, basé sur des prévisions établies. Formellement, un scénario est donc un ensemble d'éléments caractérisés par les propriétés suivantes :

- Sa nature ;
- Sa période de validité ;
- La nature de l'élément qu'il impacte ;
- L'identifiant de l'élément impacté.

IV.4.4 Affectation du trafic routier

Notre approche se base sur un modèle d'affectation du trafic tel qu'il a été décrit dans [Barceló, 2010] tout en y intégrant les effets induits par les conditions météorologiques et les décisions de gestion de trafic. Il s'agit d'affecter la demande en trafic par rapport à l'offre que peut proposer le réseau tout en tenant compte des choix d'utilisateurs. La démarche suit les quatre étapes suivantes : modélisation de l'offre du réseau, modélisation de la demande, modélisation des choix des usagers et affectation de la demande dans le réseau.

IV.4.4.1 Modélisation du réseau

Le réseau routier peut être modélisé sous la forme d'un graphe orienté (voir figure IV.10) dont les sommets seraient les villes et les arcs seraient les routes reliant ces villes. Ceux-ci sont valués par leur temps de parcours. Chaque arc possède les mêmes propriétés que les tronçons définis dans le métamodèle de crise routière (cf. chapitre II) à savoir : un nom, une longueur, une capacité maximale, des conditions de conduite, une météo routière, un débit poids lourds, un débit véhicules légers, un état, un sens et un temps de parcours. Y sont également ajoutées les valeurs caractéristiques de modélisation de l'écoulement du trafic : V_{max} (vitesse libre de circulation) K_{max} (concentration maximale de véhicules) Q_{max} (débit maximal, calculé à partir des variables précédentes).

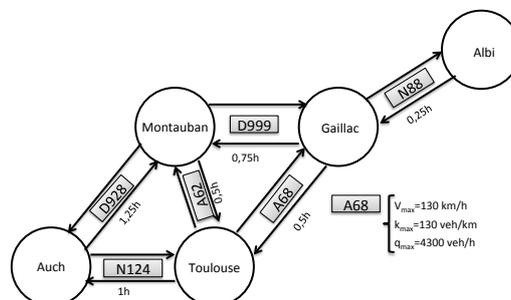


FIGURE IV.10 – La modélisation d'un réseau routier sous la forme d'un graphe

Une des caractéristiques importantes du réseau que nous considérons est le caractère

dynamique de sa configuration dû à la situation de crise qu'il subit. Ces modifications sont causées à la fois par les décisions prises, mais aussi par les différents aléas que peut subir le réseau. Ainsi, la dynamique du modèle du réseau est très fortement liée au scénario défini dans la section précédente. Il n'existe alors pas un modèle unique du réseau, mais un ensemble de modèles horodatés. Nous allons maintenant détailler les impacts des éléments du scénario sur la modélisation du réseau.

Impact des mesures de gestion de trafic La cellule de crise peut décider de prendre des mesures de gestion de trafic dans le cadre de sa réponse à la situation de crise. Aussi, pour un axe donné, les mesures de gestion de trafic qu'il est possible de prendre sont :

- *La définition d'un itinéraire de contournement* : elle n'a pas de conséquence sur la structure du réseau. En effet, il s'agit d'une règle liée au comportement de l'utilisateur pour aller d'un point A à un point B. aussi, son application se fera plus tard dans le processus d'affectation du trafic.
- *L'ouverture d'une zone de stockage en amont d'un axe* : elle implique que la circulation poids lourds est interdite sur cet axe. De plus, si le stockage est fait en pleine voie, cela implique une diminution de la capacité sur la section considérée ainsi qu'une diminution de la vitesse libre. En termes de modélisation de trafic, cela revient à diminuer la valeur de K_{max} et celle de V_{max} .
- *L'interdiction de circuler sur un axe* : elle implique que l'arc qui le représente n'existe plus dans le graphe.

Impact de la météo routière Comme cela a été indiqué dans la table IV.3, la présence de précipitations sur un axe entraîne une réduction de la vitesse sur l'axe de l'ordre de 5 à 30 %. Du point de vue de la modélisation du réseau, cela implique une diminution de la valeur de V_{max} sur cet axe et de surcroît une augmentation du temps de parcours.

La figure IV.11 illustre les impacts des mesures de gestion de trafic et de la météo routière sur le réseau routier et ses variables caractéristiques.

Dès lors, la première étape va consister en la caractérisation des impacts des éléments du scénario décrits précédemment sur la modélisation du réseau routier. C'est le rôle de l'algorithme *ImpactScenario* défini ci-après.

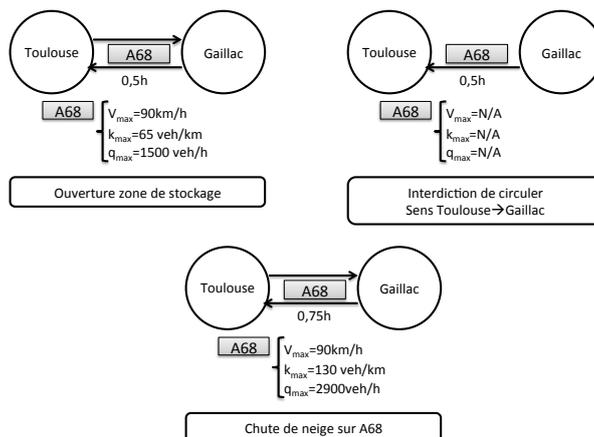


FIGURE IV.11 – Impact des différentes variables sur la modélisation du réseau

ImpactScenario(scenario[], G(N, A), dateCourante)

Cet algorithme permet de modifier la structure du graphe représentant le réseau en fonction d'un scénario préalablement défini

Paramètres : *scenario[]* : le tableau contenant les éléments relatifs au scénario
dateCourante la date à laquelle le réseau est calculé
G(N, A) le graphe représentatif du réseau composé d'un ensemble *A* d'arcs et d'un ensemble *N* de nœuds.

```

Début
  Pour i allant de 1 à scenario.taille Faire
    Si (scenario[i].debut ≤ t ≤ scenario[i].fin) Alors
      Si (scenario[i].nature = MGTCoupeAxe) Alors
        | Action : SupprimerAxe(scenario[i].axe,G)
      Fin Si
      Si (scenario[i].nature = MGTouvertureZoneDeStockage) Alors
        | scenario[i].axe.k_max ← (scenario[i].axe.k_max) / 2
      Fin Si Si (scenario[i].nature = Neige) Alors
        | scenario[i].axe.v_max ← scenario[i].axe.v_max * 0,7
      Fin Si
    Fin Si
  Fin Pour
Fin
    
```

IV.4.4.2 Modélisation de la demande de trafic

La deuxième étape du mécanisme d'affectation du trafic correspond à la modélisation de la demande du trafic. Il s'agit d'une donnée d'entrée du mécanisme fournie par les experts métiers sous la forme de matrice O-D. Ces tableaux indiquent le nombre d'usagers souhaitant se rendre d'un point à l'autre du réseau. La structure des matrices est donc imposée par celle du réseau : les villes origines correspondent aux lignes de la matrice tandis que les villes destinations correspondent aux colonnes de la matrice. Chaque matrice correspond à une demande de trafic pour une période donnée.

La table IV.4 donne un exemple de matrice O-D pour le réseau défini par le graphe de la figure IV.10 pour la période entre 08h00 et 08h15. Par exemple la demande pour aller d'Albi vers Auch entre 08h et 08h15 est de 10 véhicules.

<i>08h → 08h15</i>	Albi	Auch	Gaillac	Montauban	Toulouse
Albi		10	200	100	400
Auch	20		5	50	200
Gaillac	150	0		70	400
Montauban	100	40	30		300
Toulouse	100	100	100	100	

TABLE IV.4 – Exemple de matrice Origine-Destination pour le réseau de la figure IV.10

IV.4.4.3 Modélisation du comportement des usagers

Dès lors que les modèles d'offre et de demande ont été établis, il faut modéliser le comportement des usagers cherchant à aller d'une ville à l'autre du réseau. Dans notre approche nous faisons l'hypothèse que le choix de l'utilisateur est déterministe et que la seule option qui prévaut est celle du plus court chemin (en temps). Le calcul des plus courts chemins est le résultat de l'application de l'algorithme de [Dijkstra, 1959] sur le réseau. La table IV.5 est le résultat du calcul des plus courts chemins du réseau de la figure IV.10.

<i>08h 08h15</i>	Albi	Auch	Gaillac	Montauban	Toulouse
Albi		N88 A68 N124	N88	N88 D999	N88 A68
Auch	N124 A68 N88		N124 A68	D928	N124
Gaillac	N88	N124 A68		D999	A68
Montauban	D999 N88	D928	D999		A62
Toulouse	A68 N88	N124	A68	A62	

TABLE IV.5 – Les plus courts chemins d'après l'algorithme de Dijkstra sur le réseau de la figure IV.10

Toutefois au cours du temps, la structure du réseau et les temps de parcours sont susceptibles de changer, entraînant de fait une possible modification du chemin le plus court entre deux villes. Nous retenons alors les hypothèses suivantes :

- L'utilisateur ne change pas le parcours qui a été initialement défini lors de son entrée sur le réseau sauf si celui-ci n'est plus réalisable (axe coupé).
- La définition d'un itinéraire de contournement entre deux villes équivaut à la définition d'un nouveau plus court chemin entre ces deux villes.

Pour illustrer notre propos, nous considérons le réseau représenté par le graphe de la figure IV.12 sur lesquels les mesures de gestion de trafic sont les suivantes :

- L'axe A62 est coupé dans le sens Toulouse → Montauban.
- Un itinéraire de contournement de Toulouse est mis en place entre Albi et Auch.

La table IV.6 présente les impacts des mesures de gestion de trafic citées précédemment sur le calcul du plus court chemin (les modifications apparaissent en gras).

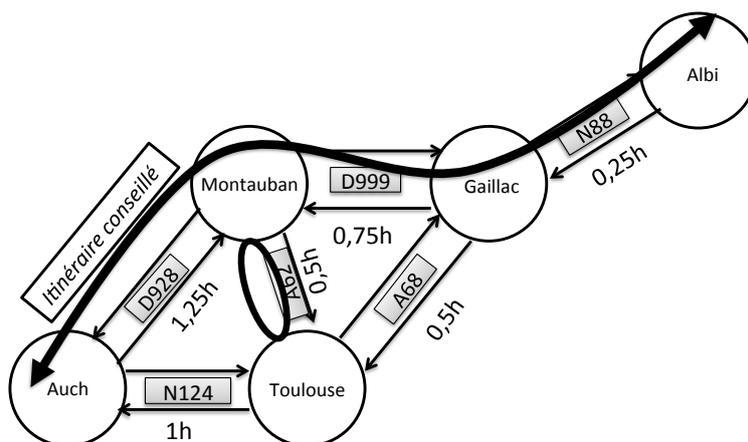


FIGURE IV.12 – Impact des différentes variables sur la modélisation du réseau

	Albi	Auch	Gaillac	Montauban	Toulouse
Albi		(1) N88 D999 D928	N88	N88 D999	N88 A68
Auch	(1) D928 D999 N88		(1) D928 D999	D928	N124
Gaillac	N88	(1) D999 D928		D999	A68
Montauban	D999 N88	D928	D999		A62
Toulouse	A68 N88	N124	A68	D999 A68	

TABLE IV.6 – Tableau des plus courts chemins après modification du réseau

IV.4.4.4 Modélisation de la charge sur le réseau

L'étape suivante consiste en l'affectation de la demande de trafic dans le réseau en prenant en compte les choix des usagers. Il s'agit, par la mise en oeuvre d'algorithmes, de simuler la dynamique du trafic sur une période donnée (notée h dans la suite). L'affectation du trafic se fait pas à pas (Simulation à Évènements Discrets) en réalisant à chaque itération et sur chacun des noeuds du réseau un bilan sur :

- Les flux de véhicules entrants dans le noeud composés des :
 - véhicules ayant pour destination ce noeud.
 - véhicules « en transit » par ce noeud et dont le chemin continue via des arcs sortants de ce noeud.
- Les flux de véhicules sortants du noeud composés des :
 - véhicules ayant pour origine ce noeud et entrant dans le réseau pour cette période (issus de la matrice Origine-Destination).
 - véhicules issus d'arcs entrants et qui ont été réaffectés sur des arcs sortants.

Dès lors, nous définissons la notion de flux élémentaire du réseau comme l'ensemble des véhicules circulant sur un axe du réseau de façon « homogène », c'est à dire ayant la même origine, la même date d'entrée sur l'axe considéré, la même destination et le même chemin. On les caractérisera donc à partir des propriétés suivantes :

- *arcCourant* : correspondant à l'arc sur lequel se trouve le flux élémentaire ;
- *trafic* : correspond au nombre de véhicules du flux ;
- *dateEntreeArc* : correspond à la date à laquelle le flux est entré sur l'arc sur lequel

il se trouve.

- *chemin* : correspond à l'ensemble des arcs planifiés que doit parcourir le flux entre le noeud origine et noeud destination. Ce chemin est calculé lors de la création du flux en appliquant un algorithme de plus court chemin.
- *positionDansChemin* : correspond à la position de l'arc courant sur lequel se trouve le flux dans son chemin.

L'ensemble des flux circulant dans le réseau est sauvegardé dans un tableau *tabFluxRéseau*, à partir duquel est réalisée l'affectation du trafic en suivant les étapes suivantes :

- Extraire l'ensemble des flux sortants depuis *tabFluxRéseau* dans un tableau *tabFluxSortant*.
- Transformer les flux sortants en flux entrants en les affectant sur les nouveaux arcs et en supprimant les flux arrivés à destination.
- Générer les flux élémentaires depuis la matrice O-D.
- Ajouter les flux entrants dans le tableau *tabFluxRéseau*.

La figure IV.13 présente un schéma de principe de l'affectation du dynamique du trafic.

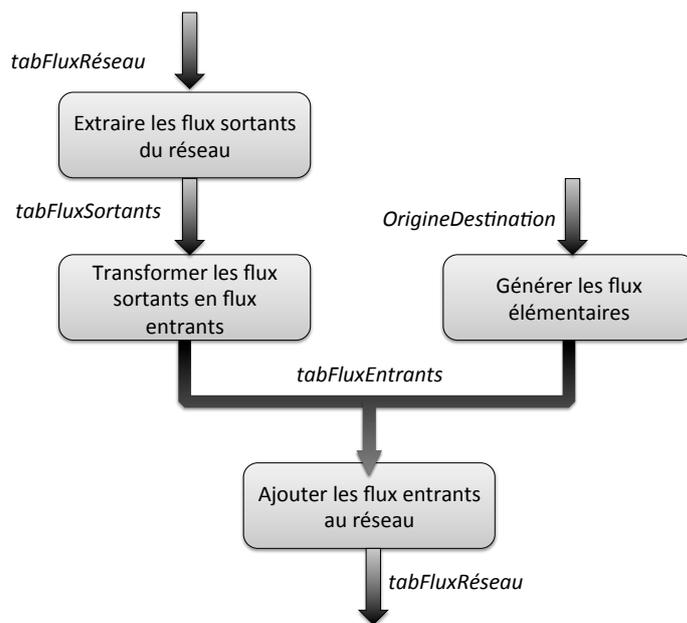


FIGURE IV.13 – Schéma de principe de l'affectation du trafic

Ce mécanisme est formalisé dans l'algorithme *AffectationDuTrafic*, celui-ci appelant quatre autres algorithmes correspondant aux étapes décrites précédemment (*ExtraireFluxSortant*, *TransformerFluxSortants*, *GenererFluxElementaires*, *AjouterFluxEntrantReseau*). Ceux-ci sont présentés ci-après.

AffectationDuTrafic(OrigineDestination, GrapheReseau, t)

Cet algorithme correspond au mécanisme d'affectation du trafic.

Paramètres : t : la date à laquelle est réalisée l'affectation du trafic.

$OrigineDestination(t)$: la matrice Origine-Destination valable pour la date t

$GrapheReseau(t)$: le graphe du réseau valable pour la date t .

$tabFluxReseau(t)$: le tableau comprenant l'ensemble des flux circulant sur le réseau.

Variables : $tabFluxEntrantTransit$: la liste des flux entrants en transit.

$tabFluxEntrantsNouveaux$: la liste des flux entrants générés depuis une matrice OD.

$tabFluxSortant$: la liste des flux sortants.

Début

$tabFluxSortant \leftarrow ExtraireFluxSortant(tabFluxReseau)$
 $tabFluxEntrantTransit \leftarrow TransformerFluxSortants(tabFluxSortant)$
 $tabFluxEntrantNouveaux \leftarrow GenererFluxElementaires(OrigineDestination)$
AjouterFluxEntrantDansReseau(tabFluxEntrantNouveaux,
 $tabFluxEntrantTransit, tabFluxReseau)$

Fin

La première étape de l'affectation du trafic correspond à l'étape d'identification des flux sortants. Pour cela, on parcourt l'ensemble des flux présents sur le réseau à la date courante et on identifie les flux qui sont « en bout » d'arc. Il s'agit des flux dont la durée de présence sur l'arc (différence entre la date courante et la date d'entrée sur l'arc) est supérieure au temps de parcours sur l'arc. Lorsque ces flux ont été identifiés, ils sont ajoutés dans un tableau T et supprimés du tableau des flux sur le réseau. C'est l'objet de l'algorithme *ExtraireFluxSortant* présenté ci-après).

ExtraireFluxSortant(tabFluxReseau)

Cet algorithme permet de calculer les flux sortants d'un axe à la fin d'une période

Paramètres : $tabFluxReseau$, l'ensemble des flux sur le réseau

t la date courante

Variables : f flux issu de $tabFluxReseau$

Résultat : T , tableau des flux sortants à la fin d'une période

Début

Pour chaque flux f de $tabfluxReseau$ **Faire**
 Si $(t - f.dateEntreeAxe \geq f.arcCourant.tempsDeParcours)$ **Alors**
 Action : Ajouter f dans T
 Action : supprimer f de $tabfluxReseau$
 Fin Si
Fin Pour
Retour $T[]$

Fin

À l'issue de cette première étape, les flux sortants identifiés doivent être traités pour être réaffectés sur d'autres arcs ou tout simplement sortis du réseau. Pour cela on

parcourt le tableau précédent (*tabFluxSortant*) et on teste si l'arc duquel chaque flux provient est le dernier du chemin qu'il doit parcourir. Le cas échéant, le flux est arrivé à destination et ne doit pas être réaffecté. Dans le cas contraire, on change alors les attributs suivants du flux : *dateEntreAxe* prend la valeur de la date courante, *positionDansChemin* est incrémentée d'une unité et *arcCourant* prend la valeur de l'arc correspondant à cette nouvelle position. Le flux est ensuite ajouté au tableau des flux entrants issus de transit (*tabFluxEntrantTransit*) puis supprimés du tableau des flux sortants. L'algorithme *TransformerFluxSortants* présente ce mécanisme.

TransformerFluxSortants(tabFluxSortant, date)

Cet algorithme permet de transformer un flux sortant d'un arc en flux entrant sur un autre arc.

Paramètres : *tabFluxSortant*, la liste des flux candidats à sortir
date, la date courante

Variabes : *sortant* flux issu de *tabFluxSortant*

Résultat : *tabFluxEntrantTransit*, la liste des flux entrants transformés

Début

Pour chaque flux *sortant* de *tabfluxSortant* **Faire**

Si (*sortant.positionDansChemin* \neq *chemin.taille*) **Alors**

sortant.dateEntreeAxe \leftarrow *date*

sortant.positionDansChemin \leftarrow *sortant.positionDansChemin* + 1

sortant.arcCourant \leftarrow *sortant.chemin*[*positionDansChemin*]

Action : Ajouter *sortant* dans *tabFluxEntrantTransit*

Fin Si

Action : Supprimer *sortant* de *tabFluxSortant*

Fin Pour Retour *tabFluxEntrantTransit*[]

Fin

L'étape suivante consiste en la génération de la deuxième nature des flux entrants, les flux issus de la matrice destination. Pour cela, la matrice est parcourue case à case, et pour chacun de ces éléments, on crée un flux avec les attributs suivants : *trafic* prend la valeur du trafic de la matrice, *destination* prend la valeur de la destination, *dateEntreAxe* est initialisée à la date courante, *chemin* est le résultat de l'algorithme du plus court chemin entre les noeuds origine et destination du graphe G, *arcCourant* correspond à la première valeur de ce chemin et *positionDansChemin* est initialisé à 1. Le flux est ensuite ajouté dans un tableau *T*. C'est l'objet de l'algorithme *GenererFluxElementaires* ci-après.

GenererFluxElementaires(OrigineDestination(t), G(t))

Cet algorithme permet de calculer les flux entrants sur le réseau à partir de la matrice Origine-Destination

Paramètres : *OrigineDestination(t)* la matrice Origine-Destination valable à la date t

$G(t)$ le graphe du réseau

Variables : f flux

Résultat : T , tableau des flux entrants issus de la matrice Origine-Destination

Début

Pour chaque élément od de *OrigineDestination* **Faire**

Action : Créer un nouveau flux f

$f.trafic \leftarrow od.trafic$

$f.destination \leftarrow od.destination$

$f.dateEntreeAxe \leftarrow t$

$f.chemin \leftarrow pcc(od.origine, od.destination, G(t))$

$f.arcCourant \leftarrow f.chemin[1]$

$f.positionDansChemin \leftarrow 1$

Action : Ajouter f dans T

Fin Pour

Retour $T[]$

Fin

Enfin, les différents flux entrants (issus de transit et de matrice Origine-Destination) sont ajoutés au tableau général des flux du réseau et supprimés des tableaux de flux entrants. C'est ce que présente le dernier algorithme *AjouterFluxEntrantDansReseau*.

AjouterFluxEntrantDansReseau(tabFluxEntrantTransit, tabFluxEntrantNouveaux, tabFluxReseau)

Cet algorithme permet d'ajouter les flux entrants dans le réseau.

Paramètres : *tabFluxEntrantTransit*, la liste des flux candidats à entrer en transit

tabFluxEntrantNouveaux, la liste des flux candidats à entrer

tabFluxReseau, la liste des flux dans le réseau

Variables : *entrant* flux issu de *tabFluxEntrant*

Début

Pour chaque flux *entrant* de *tabfluxEntrantTransit* **Faire**

Action : Ajouter *entrant* dans *tabFluxReseau*

Action : Supprimer *entrant* de *tabFluxEntrantTransit*

Fin Pour **Pour** chaque flux *entrant* de *tabfluxEntrantNouveaux* **Faire**

Action : Ajouter *entrant* dans *tabFluxReseau*

Action : Supprimer *entrant* de *tabFluxEntrantNouveaux*

Fin Pour

Fin

Ainsi, à l'issue de l'algorithme d'affectation du trafic, nous obtenons un modèle de charge sous la forme d'un tableau contenant tous les flux élémentaires de véhicules circulant sur le réseau. Il établit le profil de concentration en véhicules sur l'ensemble du réseau. Ce profil va notamment permettre, en utilisant le diagramme fondamental de trafic propre à chaque axe (relation entre débit, vitesse et concentration) d'une part,

d'établir si le trafic est fluide ou saturé (par rapport à la valeur de concentration critique, K_{cr}). D'autre part, la concentration en véhicules donnera alors la vitesse moyenne de circulation des véhicules sur cet axe. Or, à partir de la définition de la vitesse comme étant le rapport entre la distance parcourue pendant une durée et cette durée, il va être possible de calculer le temps de parcours de l'axe considéré. C'est l'objectif de l'algorithme *CalculTempsDeParcours* présenté ci-après.

CalculTempsDeParcours($G, tabFluxReseau, DF$)

Cet algorithme permet de calculer les variables de trafic pour l'ensemble du réseau

Paramètres : G : le graphe du réseau

$tabFluxReseau$: l'ensemble des flux élémentaires circulant dans le réseau

$tabOD$: le tableau contenant l'ensemble des matrices

Origine-Destination sur l'horizon donné

Variables : k , la concentration en véhicules calculée

kcr , la concentration critique de saturation inhérente à chaque axe

V , la vitesse moyenne de circulation sur l'axe considéré calculée à partir de la relation fondamentale du trafic.

Début

Pour chaque *arc* de G **Faire**

Pour chaque *flux* de $tabFluxReseau$ **Faire**

Si (*flux.arcCourant* = *axe*) **Alors**

axe.trafic \leftarrow *axe.trafic* + *flux.trafic*

Fin Si

Fin Pour

$k = \frac{arc.trafic}{arc.longueur}$

$kcr = arc.kcr$

$V = arc.Vmax \times (1 - \frac{k}{arc.kmax})$

$arc.tempsDeParcours = \frac{arc.longueur}{v}$

Fin Pour

Fin

IV.4.5 Intégration dans le modèle de crise

À l'issue de l'étape d'affectation du trafic, le modèle de charge donne une vision de l'état du trafic à partir des données macroscopiques du trafic (débit, vitesse, concentration). Ces informations de trafic doivent venir enrichir le modèle de crise routière, socle de connaissances pour le décideur. Dès lors, il est nécessaire d'y intégrer les informations propres au modèle de charge. La première étape consiste donc en la transcription du modèle de charge en concepts du métamodèle de crise routière. Il s'agit d'identifier les risques de perturbation du trafic (trafic bloqué ou ralenti) et les risques sanitaires de naufrages de la route. Dans un second temps, il est nécessaire de projeter sur le modèle de crise les aléas définis dans le scénario étudié. Enfin, la connaissance du modèle de

crise doit être enrichie par application des règles d'apparition des risques définies dans le chapitre II. Ce mécanisme fait l'objet d'un algorithme *modeleDeCharge2modeleDeCrise* présenté ci-après.

modeleDeCharge2modeleDeCrise(*G*, *scenario*[])

Cet algorithme permet de transcrire le modèle de trafic en un modèle de crise.

Paramètres : *G*, le graphe du réseau

scenario[], le tableau contenant les éléments relatifs au scénario

Variables : *modeleDeCrise*, le modèle de crise à calculer

Début

```

Pour chaque arc de G Faire
    Si ( $arc.V \leq 0,25 \times arc.Vmax$ ) Alors
        Si ( $arc.V \leq 0,10 \times arc.Vmax$ ) Alors
            Action : Créer un risque de perturbation du trafic « bloqué » impactant
            arc dans modeleDeCrise.
        Sinon
            Action : Créer un risque de perturbation du trafic « ralenti » impactant
            arc dans modeleDeCrise.
        Fin Si
    Fin Si
    Si ( $arc.k \geq arc.kcr$ ) Alors
        Action : Créer un risque sanitaire impactant arc dans modeleDeCrise.
    Fin Si
Fin Pour
Pour i allant de 1 à scenario.taille Faire
    Si ( $scenario[i].debut \leq t \leq scenario[i].fin$ ) Alors
        Si (scenario[i].nature = Neige) Alors
            modeleDeCrise.(scenario[i].axe).meteoroutiere = "neige"
        Fin Si
        Si (scenario[i].nature = ConditionConduite) Alors
            modeleDeCrise.(scenario[i].axe).conditionconduite =
            scenario[i].valeur
        Fin Si
    Fin Si
Fin Pour
Fin

```

IV.4.6 Obtention du modèle projeté

Les algorithmes présentés précédemment sont valables pour une itération. Pour effectuer la projection, ceux-ci sont exécutés pour chaque période définie par l'utilisateur. Il définit la date de début de la projection, la date de fin de la projection ainsi que le pas. Celui-ci doit être suffisamment petit devant le temps de parcours minimal des arcs pour ne pas perturber le mécanisme d'affectation de trafic. Pour la gestion de crise routière, il est intéressant d'avoir un horizon de l'ordre de 6 heures pour réaliser la projection. En effet, la fiabilité des prévisions météorologiques est suffisamment bonne pour arriver à des résultats probants. L'algorithme présenté en figure IV.14 propose une vue d'ensemble du module de projection.

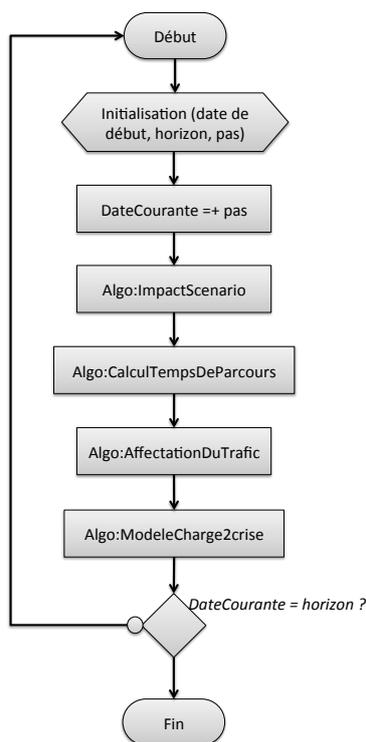


FIGURE IV.14 – Algorithme du module de projection

IV.4.7 Évaluation et analyse

Lorsque l'ensemble de la projection a été réalisée, l'utilisateur dispose d'un ensemble de modèles de charge et de modèles de crise qu'il va devoir exploiter et analyser. Afin d'éviter une surcharge d'information pour le décideur, les résultats qui lui sont présentés sont les suivants :

- Les courbes de débit, vitesse et concentration pour chaque axe en fonction du temps présentent des informations issues du modèle de charge.
- Un tableau horodaté des alertes de la crise dans lequel sont synthétisés les événements marquants liés à la projection du modèle de crise (risques et conséquences).

IV.4.7.1 Évaluation du scénario

Il s'agit de donner une note « objective » au scénario qui a été projeté (et donc d'évaluer les décisions qui le composent). Cette évaluation se fait selon les deux dimensions de performance suivantes :

- L'efficacité des décisions prises. Il s'agit d'évaluer la situation par rapport à l'objectif de résolution de la crise, la situation projetée est-elle « acceptable » en termes de risques et de faits dans le système de crise.
- L'efficience des décisions prises. Il s'agit d'évaluer le coût des moyens mis en œuvre pour arriver dans la situation projetée.

L'évaluation se fait par le calcul des indicateurs de performance suivants :

- L'indicateur de ralentissement : il s'agit de calculer le rapport entre la vitesse moyenne sur un axe et sa vitesse limite. Si cette valeur est inférieure à 50 %, le trafic est considéré comme ralenti. Si elle passe sous les 10 % alors la circulation est considérée comme bloquée.
- L'indicateur de saturation : c'est le rapport de la concentration en véhicules d'un axe et de sa concentration critique. Il permet de quantifier le nombre potentiel de personnes bloquées sur un axe (naufragés de la route). Si cette valeur dépasse 80% , la gravité du risque de naufragés de la route devient alors importante.
- L'indicateur de coût d'une décision. C'est le reflet de la charge induite par la prise d'une mesure de gestion de trafic. La table IV.7 donne une échelle relative des coûts des mesures de gestion de trafic les unes par rapport aux autres.

	Nature de la décision	Coût ressource
1	Ne rien faire	0
2	Définir un itinéraire de contournement	1
3	Viabiliser la chaussée	2
4	Ouvrir une zone de stockage	2
5	Interdire la circulation sur un axe	4

TABLE IV.7 – Coût des décisions

IV.4.7.2 Analyse du modèle et élaboration d'une nouvelle stratégie

À l'issue de l'étape de projection, la cellule de crise dispose d'une vision de l'évolution de la situation dans le futur notamment sur l'éventuelle apparition de risques ou de conséquences. Sur cette base la cellule de crise peut alors anticiper les futurs problèmes et proposer une nouvelle stratégie. Il s'agit ici d'adapter la dynamique collaborative de réponse de manière proactive. Cette adaptation se fait par une application des éléments de déduction énoncés dans le chapitre II sur le modèle de crise obtenu après projection.

IV.4.8 Limites et perspectives

Dans notre proposition, nous avons cherché à développer un mécanisme qui permet la projection d'un modèle de crise dans le futur en prenant en compte à la fois les décisions que souhaitent mettre en place la cellule de crise et les aléas pouvant arriver. Notre démarche comporte toutefois quelques limites qui peuvent faire l'objet de perspectives :

- Le modèle macroscopique du trafic choisi est le plus simple existant (modèle du premier ordre avec une relation linéaire entre vitesse et concentration) et présente des limites notamment dans la modélisation de la saturation du trafic. Toutefois, il est assez facile de s'affranchir de cette limite puisque notre modèle ne nécessite qu'une relation entre vitesse, débit et concentration.
- La modélisation du comportement des usagers n'est pas dynamique (leur choix est fixé dès le départ). Ceci n'est pas très réaliste par rapport à l'évolution des

- nouvelles technologies (smartphones avec GPS).
- Dans notre modélisation du réseau, la taille des tronçons est trop grande. En effet, une des hypothèses de notre modèle est de considérer que la concentration est homogène sur l'ensemble des tronçons. Une des perspectives est de prendre le réseau avec une maille beaucoup plus petite.
 - Certaines mesures de gestion de trafic sont difficiles à modéliser notamment lorsque celles-ci ne sont pas contraignantes (définition d'itinéraires conseillés).
 - Dans le scénario que nous avons construit, il n'existe pas d'incertitude sur les aléas. Une des perspectives serait l'introduction de probabilités et l'ajout d'une dimension stochastique à notre mécanisme (notamment sur des scénarios de demande de trafic et météorologiques).
 - Le mécanisme présenté ne permet pas l'évaluation de stratégies concurrentielles. Une évolution importante concerne la mise en place d'un arbre de décision à partir de la construction de multiples scénarios en permettant la définition de stratégies avec des choix retardés.
 - Les valeurs caractéristiques (débit maximal, concentration de saturation) sont assez sensibles à la modélisation du trafic qui a été faite. Or, ce sont ces valeurs qui sont utilisées dans le passage du modèle de trafic vers le modèle de crise.

IV.5 Cas d'école

Le cas d'école présenté ci-après vient illustrer le mécanisme développé dans la partie précédente. Il reprend une chronologie d'évènements pouvant se dérouler au cours d'une crise routière hivernale sur le réseau du Nord Ouest de la France. Le réseau considéré correspond au réseau « grande maille » de la Normandie. Il s'étend d'Avranches au Havre d'Est en Ouest et d'Argentan à Cherbourg du Nord au Sud (figure IV.15).



FIGURE IV.15 – Réseau considéré dans le cas d'école

Il est 14 heures le mardi 10 décembre 2013, Météo France annonce un épisode neigeux

important sur les départements de la Manche et du Calvados. Le phénomène arrive depuis la côte et se déplace vers les terres. Les premiers flocons sont attendus sur les côtes de Nacre et Fleurie (Entre Isigny-Sur-Mer et Deauville) vers 15h30. Les prévisions annoncent que les chutes de neige s'intensifieront de 16h à 18h dans un triangle Carentan, Caen, Vire. Après 18 heures, la chute des températures devrait stopper les précipitations, mais la neige restera persistante au sol.

En outre, les prévisions de trafic annoncent un trafic important autour des grandes agglomérations (Caen, Le Havre) aux heures de pointe (entre 17h et 19h) ainsi qu'un trafic chargé pour se rendre au port de Cherbourg.

IV.5.1 Structure du réseau

L'étape préliminaire de notre démarche consiste en une modélisation du réseau routier sous forme de graphe. Afin de rendre notre propos clair, nous avons volontairement choisi de découper le réseau de manière grossière autour de huit villes et huit axes. En résulte alors le graphe orienté de la figure IV.16 sur lequel on trouve huit nœuds (représentant les villes) et seize arcs orientés (un pour chaque sens des axes indiqué) ainsi que les zones de stockage poids lourds du réseau et les zones de danger.

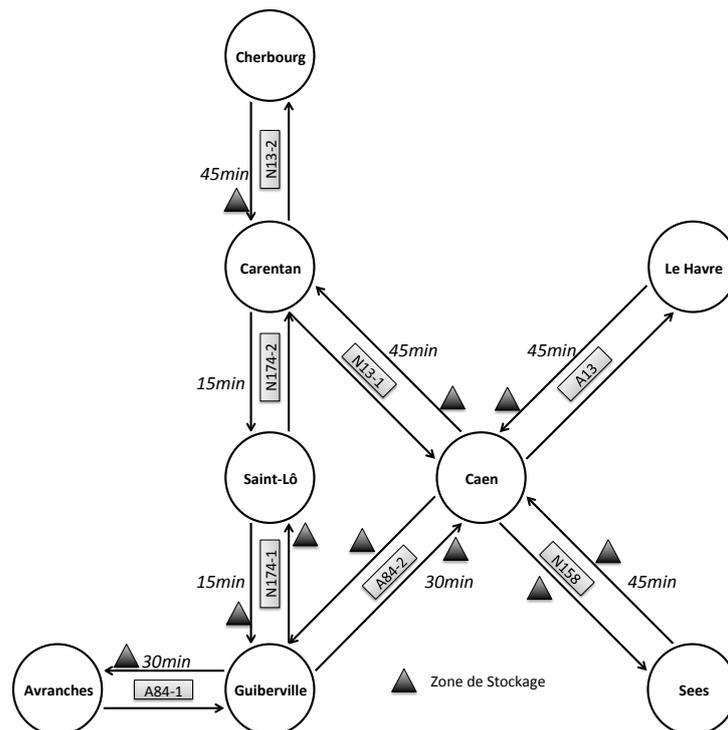


FIGURE IV.16 – Graphe du réseau considéré dans le cas d'école

Pour chacun des arcs présents dans le graphe précédent, la table IV.8 donne les valeurs des variables caractéristiques de modélisation du trafic routier (concentration maximale k_{max} , vitesse maximale v_{max} , concentration critique k_{cr} et débit maximal

q_{max}). Le réseau considéré est uniquement constitué de routes à deux voies, la valeur de la concentration maximale y est donc toujours la même. De plus, ce réseau ne contenant que des autoroutes et des nationales à deux voies, il n'y a donc que deux valeurs possibles de v_{max} . Compte tenu de notre hypothèse de modélisation de l'écoulement du trafic routier par un modèle du premier ordre suivant l'hypothèse de [Greenshields *et al.*, 1935] (vitesse et concentration sont proportionnelles), les variables k_{cr} et q_{max} sont déduites de k_{max} et v_{max} . Elles prennent respectivement les valeurs de $\frac{k_{max}}{2}$ et de $\frac{k_{max} \times v_{max}}{4}$. La figure IV.17 reprend les diagrammes fondamentaux du trafic pour les autoroutes et les nationales du réseau.

	Temps de parcours (t, min)	Concentration max (k_{max} , veh/km)	Vitesse max (v_{max} , km/h)	Concentration critique (k_{cr} , veh/km)	Débit maximal (q_{max} , veh/h)
A84-1	30	130	130	65	4225
A84-2	30	130	130	65	4225
N174-1	15	130	110	65	3575
N174-2	15	130	110	65	3575
N13-1	45	130	110	65	3575
N13-2	45	130	110	65	3575
N158	45	130	130	65	4225
A13	45	130	130	65	4225

TABLE IV.8 – Valeurs des variables caractéristiques du réseau considéré

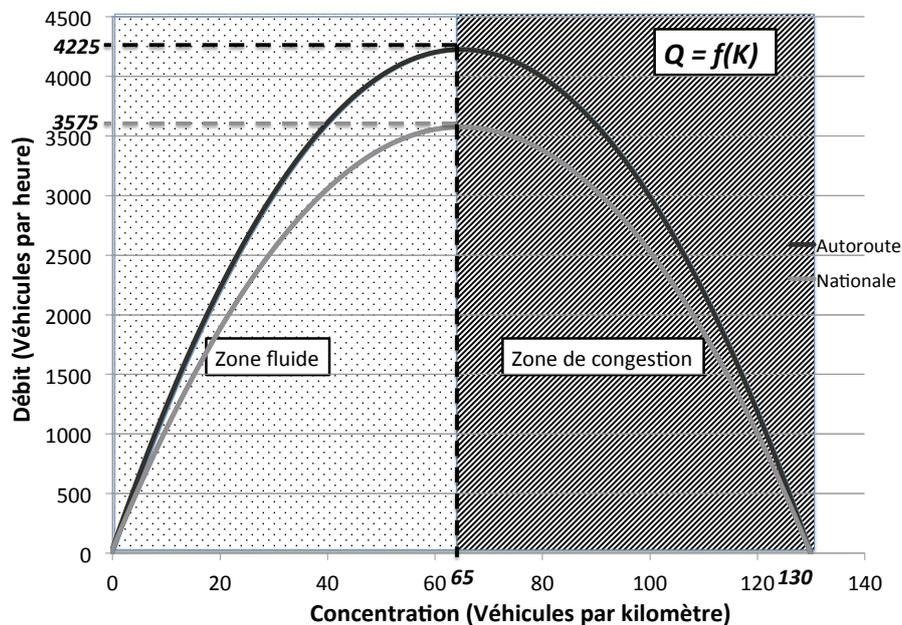


FIGURE IV.17 – Diagrammes fondamentaux du trafic pour les arcs considérés

IV.5.2 Construction du scénario

La première étape de notre mécanisme consiste en la formalisation d'un scénario à partir des prévisions dont dispose la cellule de crise. Cette étape fait appel à la connaissance et à l'expérience des experts au sein de la cellule qui sont les plus à même de valider ces prévisions. Dans notre cas, la cellule de crise possède les prévisions suivantes :

- Des chutes de neige importantes sont attendues dès 15h30 sur la côte avec un déplacement vers un triangle Carentan, Caen et Vire entre 16h et 17h30. Les experts de la cellule de crise estiment que les conséquences en seront une dégradation des conditions de conduite une demi-heure après l'apparition des flocons.
- Le trafic s'intensifiera entre 17h et 19h autour des agglomérations de Caen et du Havre.
- Le trafic est conséquent en direction de Cherbourg.

À partir de ces trois informations, il est possible de construire les paramètres d'entrée de l'affectation de trafic, à savoir, le tableau d'aléas et de décisions ainsi que l'ensemble des matrices Origine-Destination.

IV.5.2.1 Construction du tableau d'aléas

Il s'agit de transformer les éléments de prévisions établis précédemment en un ensemble d'éléments de scénario caractérisés par les éléments suivants : nature, période de validité, nature de l'élément impacté, identifiant de l'élément impacté. Chaque élément de scénario prend ensuite sa place dans un tableau d'aléas. La table IV.9 présente ce tableau.

Numéro élément	1	2	3	4
Nature	Neige	Neige	CC C2	CC C2
Début	15h30	16h	16h	16h30
Fin	18h	18h	20h	20h
Impacte	Axe	Axes	Axe	Axe
Id Impacté	N13-1	{N174-1, N174-2, A84-2}	N13-1	{N174-1, N174-2, A84-2}

TABLE IV.9 – Tableau d'aléas du scénario

IV.5.2.2 Construction des matrices Origine-Destination

Il s'agit ici de faire appel à l'expertise des membres de la cellule de crise pour évaluer le trafic routier sur l'horizon considéré. Il en résulte deux matrices Origine-Destination présentant la demande de trafic entre origine et destination en nombre de véhicules par heure, la première (table IV.10) étant valable de 14h à 17h (heures creuses), la seconde (table IV.11), de 17h à 19h (heures de pointe).

14h-17h	Avranches	Caen	Carentan	Cherbourg	Guiberville	Le Havre	Saint-Lô	Sees
Avranches		1400	100	700	50	300	150	100
Caen	1300		150	300	200	800	150	1000
Carentan	50	100		300	80	50	250	200
Cherbourg	100	200	150		50	350	100	500
Guiberville	30	100	100	150		70	300	80
Le Havre	250	1500	50	700	20		100	300
Saint-Lô	100	150	300	50	200	100		100
Sees	20	800	60	500	100	750	60	

TABLE IV.10 – Matrice Origine-Destination valable de 14h à 17h (véhicules/heure)

17h-19h	Avranches	Caen	Carentan	Cherbourg	Guiberville	Le Havre	Saint-Lô	Sees
Avranches		1400	100	700	50	300	150	100
Caen	1300		600	900	200	800	150	1000
Carentan	50	100		300	80	50	250	200
Cherbourg	100	200	150		50	350	100	500
Guiberville	30	100	100	150		70	300	80
Le Havre	250	1500	150	700	20		100	300
Saint-Lô	100	200	300	50	200	100		100
Sees	20	800	60	500	100	750	60	

TABLE IV.11 – Matrice Origine-Destination valable de 17h à 19h (véhicules/heure)

IV.5.3 L'affectation dynamique du trafic

IV.5.3.1 Impacts du scénario sur la modélisation du réseau

Il s'agit dans cette partie de caractériser les impacts des éléments du scénario et le modèle du réseau routier. Pour cela nous appliquons l'algorithme *ImpactScenario* défini précédemment. Celui-ci parcourt l'ensemble des éléments du tableau d'aléas pour modifier en conséquence le graphe du réseau. Dans le cas du tableau d'aléas défini précédemment, les modifications du graphe ne portent pas sur sa structure (même nombre d'arcs et de noeuds), mais sur les variables caractéristiques du trafic. La table IV.12 présente ces impacts. La figure IV.18 présente ces données sous forme graphique.

N°	Qualification	Arc concerné	vmax (ancienne)	qmax (ancien)	Tdébut	Tfin
1	Neige sur N13-1	N13-1	88 (110)	2860 (3575)	15h30	18h
2	Neige sur N174 et A84	N174-1	88 (110)	2860 (3575)	16h	18h
		N174-2	88 (110)	2860 (3575)	16h	18h
		A84-2	104 (130)	3380 (4225)	16h	18h

TABLE IV.12 – Impacts du scénario sur le modèle du réseau

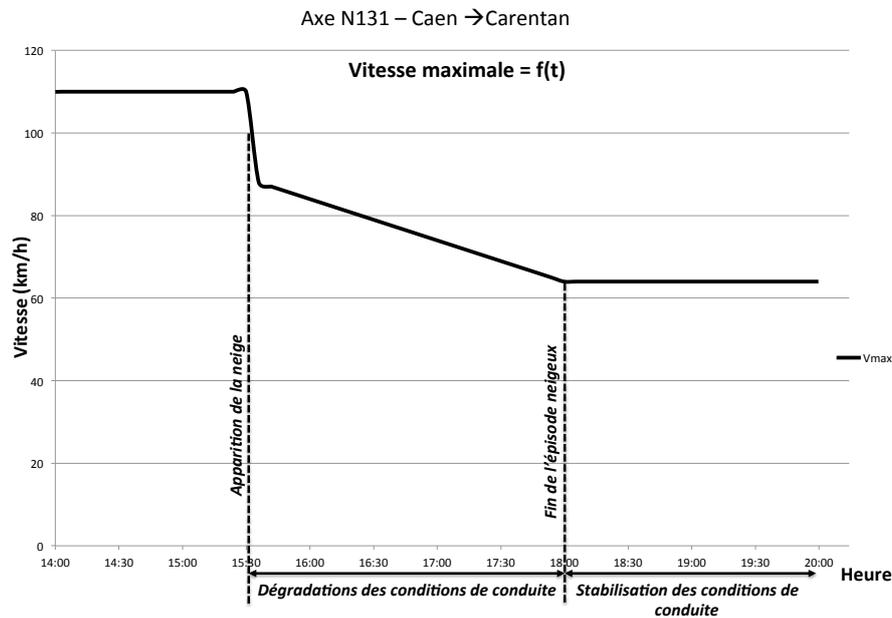


FIGURE IV.18 – Impacts des éléments du scénario sur la vitesse maximale

IV.5.3.2 Modèle de charge

À l'issue de l'étape d'affectation du trafic, nous obtenons les profils de vitesse, concentration et débit pour chacun des axes. La figure IV.19 présente ces profils sur l'axe Caen Carentan (premier axe impacté par la neige) :

- L'apparition de la neige à 15h30 entraîne une chute de la vitesse moyenne sur l'axe et, par conséquent une forte diminution du débit de véhicules. Cette diminution s'observe sur le graphique des courbes de vitesse avec une chute brutale autour de 15h30.
- De 15h30 à 17h, la vitesse moyenne des véhicules diminue en même temps que la vitesse maximale (due à la dégradation des conditions de conduite) comme le montre la décroissance des courbes du troisième graphique. Pour garantir un écoulement du trafic constant (autour de 2000 véhicules par heure), la concentration augmente également comme nous pouvons le constater sur le deuxième graphique.
- À partir de 17h, le trafic devient plus important et la concentration sur l'axe augmente plus rapidement comme nous pouvons le constater sur la courbe de la concentration. Le système se rapproche alors de son débit maximal (courbe de gauche pointillée). Le trafic est considéré comme dense.
- À 18h, comme le montre la courbe du bas, la vitesse passe sous la barre des 40 km/h (environ 35% de la limitation de vitesse). La circulation est alors considérée comme fortement ralentie.
- À partir de 19h, le système atteint son débit maximal et la concentration dé-

passé la concentration critique, on observe une saturation. Graphiquement, cela correspond au moment où la courbe de concentration dépasse celle en pointillés.

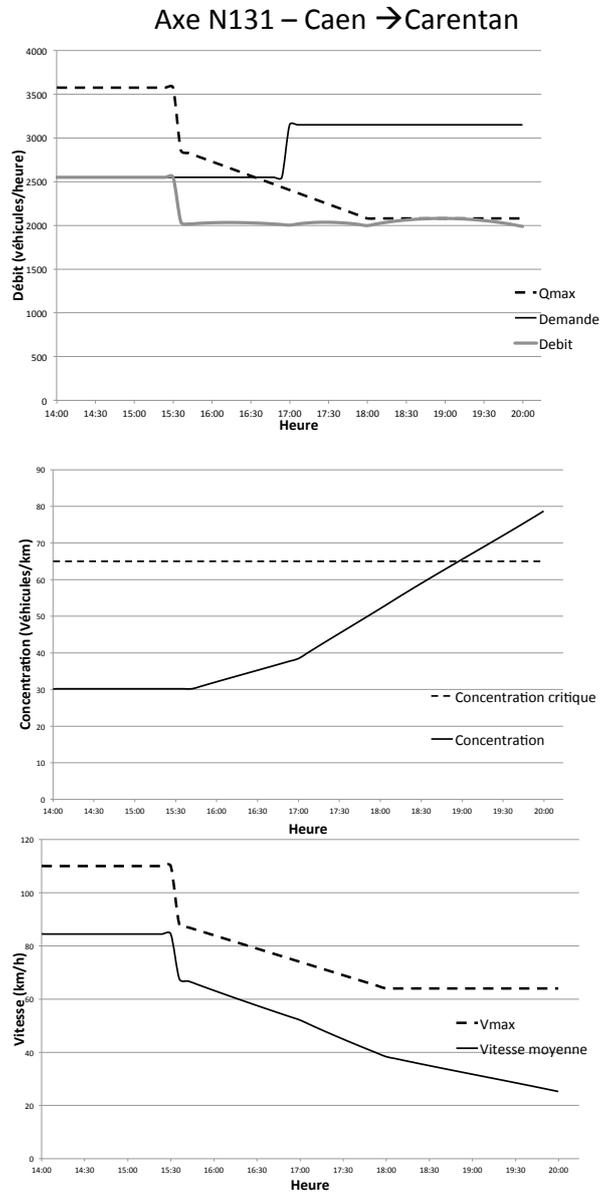


FIGURE IV.19 – Profils de vitesse, concentration et débit pour l'axe Caen-Carentan

L'assimilation du modèle de charge dans le modèle de crise et la projection du scénario donnent lieu aux éléments suivants :

- À 15h30, le système relève une alerte de *risque d'accident poids lourds* sur l'axe Caen-Carentan, du fait de l'apparition de la *neige* sur un tronçon présentant un *danger* de forte déclivité.
- À partir de 17h, la combinaison d'un *trafic dense* avec des *conditions de conduite dégradées* et de la neige font apparaître les risques d'accident véhicule léger et de

perturbation du trafic sur l'axe Caen Carentan.

- À partir de 19h, la saturation du réseau et la tombée de la nuit font apparaître le risque de naufragés de la route (risque sanitaire) sur l'axe Caen-Carentan.

La figure IV.20 montre une partie du modèle de crise obtenu. Grâce à cette projection, la cellule de crise dispose d'une visibilité suffisante pour prendre des décisions en conséquence. La construction de cette nouvelle stratégie se fait par une application des règles présentées dans le chapitre II. L'application des règles permet alors de déduire les mesures suivantes à prendre :

- Fermeture de l'axe Caen Carentan à partir de 15h30 aux poids lourds et ouverture des zones de stockage en amont.
- Proposition d'un itinéraire de contournement pour protéger l'axe Caen-Carentan en passant par la ville de Guiberville à partir de 17h30.

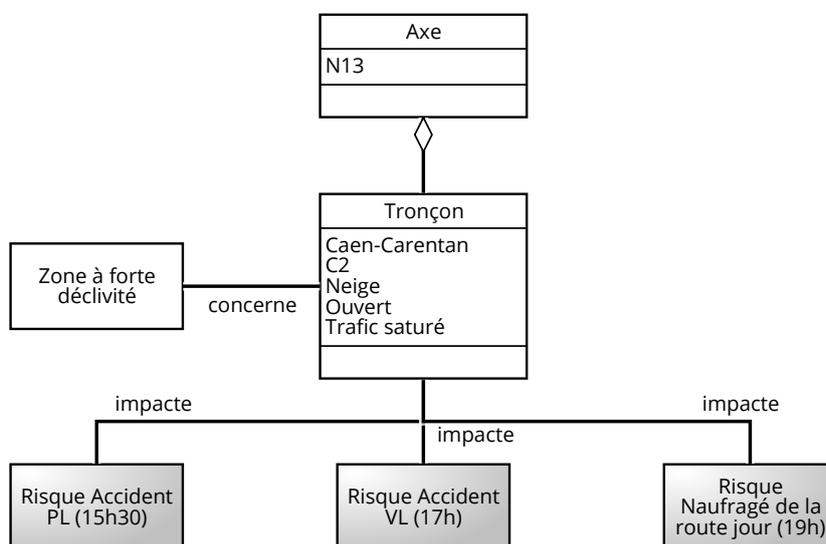


FIGURE IV.20 – Une partie du modèle projeté de crise obtenu

IV.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de définir un mécanisme supportant le pilotage « anticipatif » d'une situation de crise. La démarche proposée s'articule autour d'un mécanisme de projection d'un modèle de crise (basé sur le métamodèle de situation de crise défini au chapitre II), le but étant de pouvoir identifier les problèmes futurs liés à la situation de crise.

La méthodologie proposée s'articule autour de la définition d'un scénario construit sur la base des prévisions à disposition de la cellule de crise (conditions météorologiques, trafic) et les éléments de réponse en œuvre sur le terrain (mesures de gestion de trafic). Les impacts de ces éléments du scénario sur le modèle du réseau routier sont alors pris

en compte. La mise en œuvre d'algorithmes d'affectation du trafic permet alors d'obtenir une vision du modèle de charge de trafic circulant sur le réseau en fonction du temps. Ce modèle de charge est inséré dans le modèle de crise ainsi projeté. À l'issue de l'étape de projection, le décideur obtient alors une vision de la potentielle évolution de la situation de crise. Il peut alors élaborer une nouvelle stratégie.

Ainsi, ce mécanisme propose une première version d'un mode de pilotage anticipatif d'une situation de crise routière. Toutefois, nous avons pu identifier les limites et perspectives suivantes :

- Les modèles de trafic sont très simples et posent des hypothèses qui ne sont pas très réalistes (modèles linéaires du premier ordre). Une possible évolution concerne la mise en œuvre de modèles plus robustes.
- L'hypothèse du décideur capable de fournir des données précises concernant l'évolution du trafic (matrice origine destination) est assez difficile à obtenir. En effet, ces études sont coûteuses et les valeurs « standards » ne le sont plus en conditions hivernales. Cependant, l'émergence des Systèmes de Transports Intelligent (ITS) ouvre des perspectives intéressantes avec la multiplication des capteurs fournissant des données de trafic numérisées. L'opportunité d'un interfaçage de notre outil avec de tels systèmes soulève une vraie question.
- L'outil mis en place est dédié aux situations de crise routière. Il serait intéressant de généraliser cette démarche à des situations de crise génériques voire à des situations collaboratives plus générales.

Conclusion générale

La problématique traitée dans ces travaux s'inscrit dans une réflexion autour de la définition d'un Système d'Information de Médiation capable de supporter la conception et le pilotage agile de la réponse à une situation de crise. Notre positionnement s'est donc fait au niveau de la cellule de crise, garante du bon déroulement de la réponse. Pour cela, elle doit assurer la bonne collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la réponse autour des enjeux suivants :

- La définition d'une réponse pertinente à la situation de crise ;
- L'anticipation des aléas potentiels dans la construction de la réponse ;
- La réalisation efficace et efficiente de cette réponse ;
- Le maintien de cette réponse face aux évolutions de la situation.

Dans cette optique, nous avons cherché à proposer des solutions à la cellule de crise pour qu'elle soit en mesure :

- D'apporter une réponse la plus couvrante et exhaustive possible à la situation courante.
- De piloter de manière réactive cette réponse par une détection *a posteriori* des problèmes et une adaptation conséquente.
- De piloter de manière anticipative la réponse par une détection *a priori* des problèmes pour évaluer la réponse qui va être mise en œuvre.

Nous avons alors développé trois contributions complémentaires pour atteindre ces objectifs :

1. **La structuration d'ontologies pour la construction d'une dynamique de réponse à une situation de crise routière.** Nous avons développé une ontologie d'application de crise routière capable de servir de « réceptacle » à l'ensemble des connaissances relatives aux situations de crise routière. L'exploitation des connaissances contenues et formalisées dans l'ontologie permet alors la déduction de la dynamique collaborative à mettre en œuvre. La construction de cette ontologie repose ainsi sur une logique de couches dont le cœur est formé à partir de concepts généraux liés au domaine de la collaboration. Une première extension de ce cœur concerne une spécialisation en concepts de crise eux-mêmes ensuite étendus en concepts de crise routière. La force de cette structuration réside dans son exploitation par application de règles de déduction inhérentes à chacune des couches (pour la définition de la dynamique collaborative).

2. **Le déploiement d'un Système d'Information de Médiation pour le pilotage réactif d'une situation de crise routière.** Cette contribution applicative³ a consisté en la mise en œuvre sur un cas concret de crise routière d'une démarche de pilotage agile d'une situation de crise. Nous avons ainsi utilisé les développements et résultats de travaux de recherche précédents (internes au projet MISE) pour les adapter et les intégrer au contexte de crise routière. Nous avons alors obtenu un Système d'Information de Médiation capable de supporter la prise de décision en contexte de crise routière, d'orchestrer la réalisation de la dynamique collaborative et de maintenir cette réponse par un mécanisme de détection et d'adaptation aux changements. Par ailleurs, cette contribution a été valorisée par l'industrialisation d'une partie du démonstrateur développé au cours du projet SIM-PeTra. Celle-ci s'est faite dans le cadre d'un contrat passé entre le CRICR de l'Ouest et le Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi. Il s'agissait du développement d'une interface cartographique de représentation de situation de crise et de connecteurs entre l'application de renseignement de conditions de conduite (SERPE-VH), le logiciel d'aide à la décision dédié crise routière hivernale (OPTICCO) et l'interface spécifique issue du projet SIM-PeTra. Le système est opérationnel depuis l'hiver 2013-2014 et une charge totale de 10 hommes.jour a été nécessaire pour la réalisation de ce projet.
3. **La définition d'une méthodologie de projection de situation de crise routière pour en assurer le pilotage anticipatif.** Cette contribution vise à améliorer la visibilité du décideur en caractérisant l'évolution de la situation dans le futur. À partir de la définition d'un scénario, nous avons défini un mécanisme de projection de la situation de crise permettant à la cellule de crise d'obtenir une vision de son évolution sur un horizon d'environ six heures. Il s'agit de préciser l'impact des futurs aléas (prévisions météorologiques et de trafic) et décisions (mesures de gestion de trafic) sur l'évolution du système pour évaluer la réponse courante à la situation de crise. L'objectif est alors de détecter *a priori* les situations à problèmes et de proposer une adaptation proactive conséquente.

La figure IV.21 propose une vision d'ensemble de ces contributions.

3. réalisée dans le cadre du projet SIM-PeTra

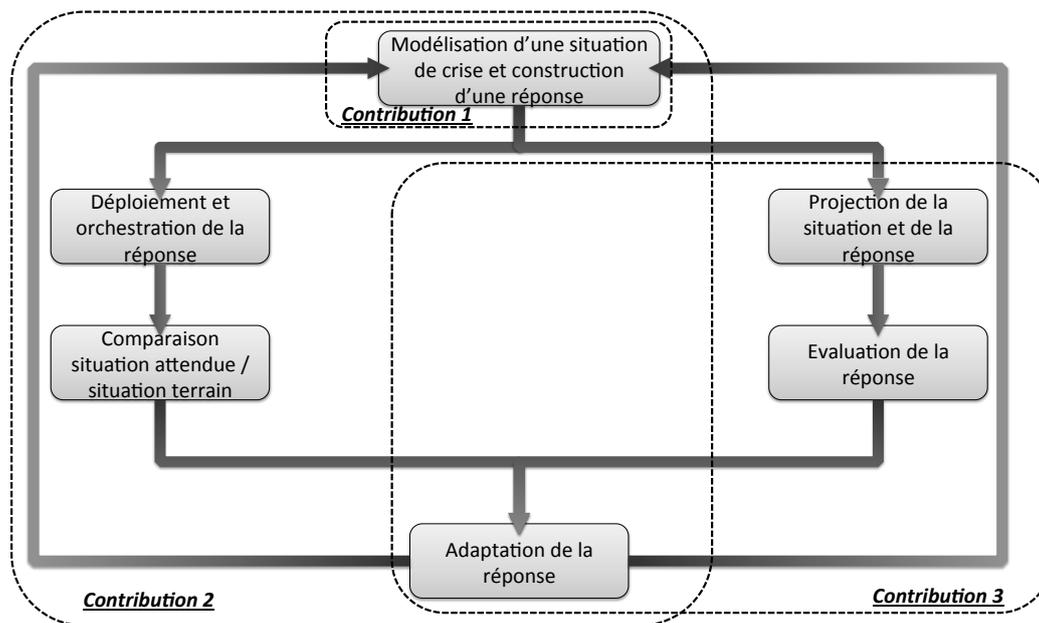


FIGURE IV.21 – Vision d'ensemble des contributions

Plusieurs extensions peuvent être envisagées à ces travaux, nous proposons de les classer selon les axes suivants :

- Le premier axe de perspectives de nos travaux concerne la distance qui sépare le système SIM-PeTra tel qu'il est à l'heure actuelle d'une industrialisation complète. Les perspectives présentées relèvent donc de problématiques techniques et technologiques.
- Le deuxième axe s'attache à étayer les perspectives concernant un système d'information dédié au pilotage des situations de crise en général. Les suites à donner relèvent ici de problématiques plus « scientifiques ».

Vers une industrialisation complète de SIM-PeTra Bien qu'une partie du démonstrateur issu du projet de recherche SIM-PeTra ait été industrialisée, la version actuelle n'est pas opérationnelle en l'état pour supporter dès demain la réponse à une situation de crise. Voici les suites à donner que nous avons pu identifier :

- **L'amélioration de la collecte de données par une multiplication des sources d'information.** En situation de crise, la priorité reste pour les décideurs l'accès à l'information. L'enjeu réside alors sur la convergence entre la représentation que la cellule de crise a de la situation « terrain » et la situation effective. La croissance exponentielle des technologies de l'information représente alors une opportunité que doivent saisir les décideurs. On peut alors imaginer utiliser les réseaux sociaux, les smartphones, les sources open-data, les GPS connectés des véhicules pour obtenir un modèle plus fin de la situation de crise. Deux problématiques sont alors soulevées : la première concerne la scalabilité du système avec des questions proches de celles du « Big Data » ; la seconde concerne la fiabilité

- et la vérification d'une information dont la source n'est pas authentifiée.
- **L'amélioration du mécanisme de détection / adaptation.** Le mécanisme d'agilité (détection + adaptation) déployé dans le cadre de notre implémentation est une réutilisation « brute » du mécanisme de [Barthe, 2013]. Les règles permettant d'effectuer cette détection concerne donc uniquement des concepts relatifs à la couche crise de notre ontologie. Afin de permettre une détection plus fine des problèmes et une adaptation conséquente plus précise, une piste envisageable concerne la spécialisation de ces règles pour la couche de crise routière.
 - **Plus de connexions avec des systèmes métiers experts.** Les acteurs de la gestion de crise routière possèdent tous des systèmes d'information dédiés qui les supportent dans leur intervention au cours du processus de gestion de crise routière. La création de connecteurs entre ces outils dédiés et notre système d'information de médiation permettrait une invocation automatique de ces systèmes par notre orchestrateur sans qu'il y ait d'intermédiaire humain entre.
 - **Le déploiement du pilotage anticipatif.** Une évolution importante concernerait le déploiement du pilotage anticipatif en complément du mode de pilotage réactif déjà existant. Toutefois, pour être totalement opérationnel, le module développé au cours des présents travaux nécessite les améliorations suivantes :
 - Le changement du modèle macroscopique de trafic utilisé. Le modèle utilisé est simpliste et ne reflète pas la réalité d'un trafic routier soumis à des intempéries hivernales.
 - Une affectation du trafic stochastique. Le modèle utilisé est déterministe et ne traduit pas de manière exacte le comportement de la diversité des usagers.
 - La construction et l'évaluation de plusieurs stratégies. La démarche présentée ne vaut que pour une seule stratégie. La conception de différentes stratégies (suggérées par le système ou construites « à la main » par le décideur) et leur mise en concurrence au travers d'une évaluation multi-critères permettrait de multiplier les options à disposition du décideur. La notion d'arbre de décision semble être le formalisme adéquat pour aider le décideur dans son choix.
 - L'introduction de probabilités dans l'occurrence des aléas. La définition du scénario se fait par rapport aux prévisions météorologiques, mais ne prend pas en compte la probabilité d'occurrence des aléas. Une telle mise en oeuvre permettrait d'étoffer l'arbre de décision et en multiplier les branches.

Vers un système d'information pour le pilotage des situations de crise et collaboratives Nous allons nous attacher désormais à détailler les perspectives pour la mise en place d'un système d'information dédié au pilotage des situations collaboratives (et notamment de crise). Nous avons alors retenu les quatre pistes suivantes :

- **La prise en compte de l'aspect distribué de la décision.** Dans la définition de la dynamique de réponse, la prise de décision n'était le fait que d'une seule cellule de crise. La réalité montre toute autre chose puisqu'en temps de crise ce sont plusieurs cellules de crise qui sont actives et prennent des décisions. Cette multiplication des cellules intervient autant verticalement (une cellule par niveau

d'échelle géographique : commune, département, zone) qu'horizontalement (une cellule de crise par « domaine » : réseau routier, sécurité civile, réseau électrique). Par ailleurs, chaque cellule de crise met en œuvre les plans qu'elle a définis pendant sa phase de préparation (souvent sans concertation avec des plans déjà existants chez d'autres acteurs). Une perspective importante concerne les modes d'articulation entre ces différentes cellules de crise (relations de hiérarchie, communication) et ouvre ainsi une problématique de distribution de la prise de décision élaborée à partir de plans de gestion de crise d'horizons différents.

- **La prise en compte des ressources dans la prise de décision.** La déduction de la dynamique de réponse et la prise de décision associée se font à capacité infinie. En effet, celles-ci ne tiennent pas compte des restrictions possibles de ressources. Or, une des propriétés d'une situation de crise concerne le débordement des moyens à mettre en œuvre. La prise en compte des ressources disponibles dans l'élaboration d'un processus de réponse constitue alors une amélioration significative dans la prise de décision en situation de crise.
- **La fusion et l'alignement d'ontologies de gestion de crise.** Au cours de l'état de l'art mené sur les ontologies dans le chapitre II, nous avons pu constater l'existence de nombreuses ontologies de gestion de crise. Or, un des intérêts des ontologies est leur flexibilité et leur capacité d'interopérabilité. Une perspective intéressante concerne l'alignement et la fusion d'ontologies de gestion de crise pour constituer une base de connaissances de référence dans le domaine. Cette nouvelle ontologie serait alors peuplée d'instances provenant de cas « réels ». En utilisant des méthodes d'analyse et de fouille sur ces instances, il est envisageable de faire émerger et d'extraire de nouvelles règles de déduction. Cette génération automatique de règles développerait alors une capacité d'autoapprentissage du système.
- **La définition au niveau du métamodèle cœur des modes de pilotage réactif et anticipatif.** Les modes de pilotage réactif et anticipatif ont été présentés pour une application dédiée à la gestion des crises routières. À l'instar d'une ontologie structurée en couches, il pourrait être intéressant de capitaliser autour de ces mécanismes pour redéfinir des modes de pilotage « génériques » dont la portée serait sur le cœur du métamodèle. En fonction des différents domaines dans lesquels l'ontologie collaborative est utilisée, une spécification de ces modes de pilotage peut être envisagée.

Bibliographie

- [Agarwal *et al.*, 2005] AGARWAL, M., MAZE, T. H. et SOULEYRETTE, R. (2005). Impacts of weather on urban freeway traffic flow characteristics and facility capacity. *In Proceedings of the 2005 mid-continent transportation research symposium.*
- [Alexander, 2002] ALEXANDER, D. (2002). Principles of emergency planning and management.
- [Almeida *et al.*, 2011] ALMEIDA, M. B., PROIETTI, A. B. d. F. C., AI, J. et SMITH, B. (2011). The blood ontology : An ontology in the domain of hematology. *In ICBO.* Citeseer.
- [Anastasi *et al.*, 1999] ANASTASI, C., van ASSELT, M., PETERS, S., MELLORS, J., RAVETZ, J. et ROTMANS, J. (1999). From wild storyline material to integrated visions : The first steps have been taken. *ICIS, Maastricht, the Netherlands.*
- [Andersen et Peterson, 2001] ANDERSEN, W. et PETERSON, B. (2001). An ontology of modern military organizations and their structure. *In Workshop on the IEEE Standard Upper Ontology (IJCAI'01).* Citeseer.
- [Ansoff et McDonnell, 1990] ANSOFF, H. I. et MCDONNELL, E. J. (1990). *Implanting strategic management*, volume 2. Prentice Hall New York.
- [Arfaoui, 1999] ARFAOUI, A. (1999). Estimation des matrices origine-destination à partir des comptages : étude de quelques modèles.
- [Ayrat et Griot, 2001] AYRAL, P. et GRIOT, C. (2001). Terminologie en science du risque. Recueil de définitions, Document préparatoire au Colloque international : Dire le Risque : Le risque en examen, Sous l'égide du Conseil de l'Europe, Mèze.
- [Babitski *et al.*, 2011] BABITSKI, G., BERGWEILER, S., GREBNER, O., OBERLE, D., PAULHEIM, H. et PROBST, F. (2011). Soknos—using semantic technologies in disaster management software. *In The Semantic Web : Research and Applications*, pages 183–197. Springer.
- [Bachimont *et al.*, 2002] BACHIMONT, B., ISAAC, A. et TRONCY, R. (2002). Semantic commitment for designing ontologies : a proposal. *In Knowledge Engineering and Knowledge Management : Ontologies and the Semantic Web*, pages 114–121. Springer.
- [Bahloul, 2006] BAHLOUL, D. (2006). Une approche hybride de gestion des connaissance basée sur les ontologies : applications aux incidents informatiques. *month.*
- [Barceló, 2010] BARCELÓ, J. (2010). *Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation.* Springer.

- [Barthe, 2013] BARTHE, A.-M. (2013). *Prise en charge de l'agilité de workflows collaboratifs par une approche dirigée par les événements*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- [Belser, 2008] BELER, C. (2008). *Modélisation générique d'un retour d'expérience cognitif. Application à la prévention des risques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Bénaben, 2012] BÉNABEN, F. (2012). *Conception de Systèmes d'Information de Médiation pour la prise en charge de l'Interopérabilité dans les collaborations d'organisations*. Habilitation à diriger les recherches, INPT - EMAC, Albi.
- [Bénaben et al., 2014] BÉNABEN, F., BARTHE-DELANOË, A.-M., LAURAS, M. et TRUP-TIL, S. (2014). Collaborative systems in crisis management : A proposal for a conceptual framework. In *Collaborative Systems for Smart Networked Environments*, pages 396–405. Springer.
- [Bénaben et al., 2007] BÉNABEN, F., TOUZI, J., RAJSIRI, V., LORRÉ, J. et PINGAUD, H. (2007). L'interopérabilité des systèmes d'information comme moyen vers l'intégration de l'écosystème industriel. *7e Congrès international de génie industriel*.
- [Bierlaire, 2006] BIERLAIRE, M. (2006). A theoretical analysis of the cross-nested logit model. *Annals of operations research*, 144(1):287–300.
- [Blumentritt et Johnston, 1999] BLUMENTRITT, R. et JOHNSTON, R. (1999). Towards a strategy for knowledge management. *Technology Analysis & Strategic Management*, 11(3):287–300.
- [Boissel-Dallier, 2012] BOISSEL-DALLIER, N. (2012). *Réconciliation sémantique des données et des services mis en œuvre au sein d'une situation collaborative*. Thèse de doctorat, INPT.
- [Boucher et Burlat, 2003] BOUCHER, X. et BURLAT, P. (2003). Vers l'intégration des compétences dans le pilotage des performances de l'entreprise. *Journal européen des systèmes automatisés*, 37(3):363–390.
- [Bourey et al., 2007] BOUREY, J. P., GRANGEL, R., DUCQ, Y., BERRE, A., BERTONI, M., D'ANTONIO, F., DACLIN, N., DOUMEINGTS, G., GRANDIN-DUBOST, M., KALAMPOUKAS, K. et al. (2007). Report on model driven interoperability.
- [Bouyssou et al., 2006] BOUYSSOU, D., DUBOIS, D., PIRLOT, M. et PRADE, H. (2006). Concepts et méthodes pour l'aide à la décision, volume 2, risque et incertain.
- [Brachman et Levesque, 2004] BRACHMAN, R. et LEVESQUE, H. (2004). *Knowledge representation and reasoning*. Elsevier.
- [Bradfield et al., 2005] BRADFIELD, R., WRIGHT, G., BURT, G., CAIRNS, G. et VAN DER HEIJDEN, K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37(8):795–812.
- [Breu et al., 2002] BREU, K., HEMINGWAY, C. J., STRATHERN, M. et BRIDGER, D. (2002). Workforce agility : the new employee strategy for the knowledge economy. *Journal of Information Technology*, 17(1):21–31.

- [Brilon, 1994] BRILON, W. (1994). A new german highway capacity manual. In *PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGHWAY CAPACITY, VOLUME 1*.
- [Burhans *et al.*, 2003] BURHANS, D., CAMPBELL, A. et SKUSE, G. (2003). Exploring the role of knowledge representation and reasoning in biomedical text understanding. In *Working Notes of the SIGIR Workshop on Text Analysis and Search for Bioinformatics*.
- [Camarinha-Matos *et al.*, 2008] CAMARINHA-MATOS, L. M., AFSARMANESH, H. et OLLUS, M. (2008). Ecoload and cno base concepts. In *Methods and tools for collaborative networked organizations*, pages 3–32. Springer.
- [Chandrasekaran *et al.*, 1999] CHANDRASEKARAN, B., JOSEPHSON, J. R. et BENJAMINS, V. R. (1999). What are ontologies, and why do we need them? *IEEE Intelligent systems*, 14(1):20–26.
- [Charles, 2010] CHARLES, A. (2010). *Improving the design and management of agile supply chains : feedback and application in the context of humanitarian aid*. Thèse de doctorat.
- [Charlet, 2003] CHARLET, J. (2003). *L'ingénierie des connaissances*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- [Chebassier *et al.*, 2010] CHEBASSIER, N., LETOUPIN, M. et SAMSON, N. (2010). Données trafic 2009 du réseau routier national. Rapport de mission, Direction Interdépartementale des Routes Ouest.
- [Chen *et al.*, 2003] CHEN, K.-J., YOU, J.-M., KAO, D.-H. et WU, C.-H. (2003). Design of lexical database for financial domain. In *Natural Language Processing and Knowledge Engineering, 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*, pages 784–789. IEEE.
- [Chniti, 2013] CHNITI, A. (2013). *Gestion des dépendances et des interactions entre Ontologies et Règles Métier*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- [Chou *et al.*, 2011] CHOU, C.-H., ZAHEDI, F. et ZHAO, H. (2011). Ontology for developing web sites for natural disaster management : methodology and implementation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 41(1):50–62.
- [Comes *et al.*, 2011] COMES, T., HIETE, M., WIJNGAARDS, N. et SCHULTMANN, F. (2011). Decision maps : A framework for multi-criteria decision support under severe uncertainty. *Decision Support Systems*, 52(1):108–118.
- [Conboy et Fitzgerald, 2004] CONBOY, K. et FITZGERALD, B. (2004). Toward a conceptual framework of agile methods. In *Extreme Programming and Agile Methods-XP/Agile Universe 2004*, pages 105–116. Springer.
- [Coppock et Baxter, 2010] COPPOCK, E. et BAXTER, D. (2010). A translation from logic to english with dynamic semantics. In *New Frontiers in Artificial Intelligence*, pages 197–216. Springer.

- [Council, 2010] COUNCIL, S. C. (2010). Supply chain operations reference (SCOR®) model - overview - version 10.0. <http://supply-chain.org/f/SCOR-Overview-Web.pdf>.
- [D Pierce *et al.*, 2012] D PIERCE, C., BOOTH, D., OGBUJI, C., DEATON, C., BLACKSTONE, E. et LENAT, D. (2012). Semanticdb : A semantic web infrastructure for clinical research and quality reporting. *Current Bioinformatics*, 7(3):267–277.
- [Daganzo et Sheffi, 1977] DAGANZO, C. F. et SHEFFI, Y. (1977). On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science*, 11(3):253–274.
- [de la Asunción *et al.*, 2005] de la ASUNCIÓN, M., CASTILLO, L., FDEZ-OLIVARES, J., GARCÍA-PÉREZ, Ó., GONZÁLEZ, A. et PALAO, F. (2005). Siadex : An interactive knowledge-based planner for decision support in forest fire fighting. *AI Communications*, 18(4):257–268.
- [Delgado *et al.*, 2002] DELGADO, J., GALLEGO, I., GARCIA, R. et GIL, R. (2002). An ontology for intellectual property rights : Ipronto. In *1st Int. Semantic Web Conference (ISWC2002)*.
- [Devlin, 2006] DEVLIN, E. S. (2006). *Crisis management planning and execution*. CRC Press.
- [Di Maio, 2007] DI MAIO, P. (2007). An open ontology for open source emergency response system. *Open Source Research Community*.
- [Dial, 1971] DIAL, R. B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation research*, 5(2):83–111.
- [Dijkstra, 1959] DIJKSTRA, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271.
- [Du Cange *et al.*, 1845] DU CANGE, C. d. F., HENSCHER, G. L. et CARPENTIER, P. (1845). *Glossarium Mediae et Infimae Latinitatis : LO*, volume 4. Firmin Didot.
- [Durlin, 2008] DURLIN, T. (2008). *Vers une affectation dynamique opérationnelle : Etude théorique sur la mise en oeuvre opérationnelle de l'affectation dynamique*. Thèse de doctorat, Villeurbanne, INSA.
- [Dutton, 1986] DUTTON, J. E. (1986). The processing of crisis and non-crisis strategic issues. *Journal of Management Studies*, 23(5):501–517.
- [Erol *et al.*, 1994] EROL, K., HENDLER, J. et NAU, D. S. (1994). Htn planning : Complexity and expressivity. In *AAAI*, volume 94, pages 1123–1128.
- [Farquhar *et al.*, 1997] 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.
- [Fdez-Olivares *et al.*, 2006] FDEZ-OLIVARES, J., CASTILLO, L., GARCIA-PÉREZ, O. et PALAO, F. (2006). Bringing users and planning technology together. experiences in siadex. In *Proc ICAPS*, pages 11–20.

- [Fensel *et al.*, 2001] FENSEL, D., VAN HARMELEN, F., HORROCKS, I., MCGUINNESS, D. L. et PATEL-SCHNEIDER, P. F. (2001). Oil : An ontology infrastructure for the semantic web. *IEEE intelligent systems*, 16(2):38–45.
- [Fernández-López *et al.*, 1997] FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M., GÓMEZ-PÉREZ, A. et JURISTO, N. (1997). Methontology : from ontological art towards ontological engineering.
- [for Disaster Reduction, 2004] for DISASTER REDUCTION, I. S. (2004). *Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives*, volume 1. United Nations Publications.
- [Force, 1981] FORCE, U. A. (1981). Integrated computer-aided manufacturing (icam) architecture part ii, vol. iv-function modelling manual (idef0). *Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio*, 45433.
- [Francesconi *et al.*, 2010] FRANCESCONI, E., MONTEMAGNI, S., PETERS, W. et TISCORNIA, D. (2010). Integrating a bottom-up and top-down methodology for building semantic resources for the multilingual legal domain. *In Semantic Processing of Legal Texts : Where the Language of Law Meets the Law of Language*, pages 95–121.
- [Gangemi *et al.*, 2002] GANGEMI, A., GUARINO, N., MASOLO, C., OLTRAMARI, A. et SCHNEIDER, L. (2002). Sweetening ontologies with dolce. *In Knowledge engineering and knowledge management : Ontologies and the semantic Web*, pages 166–181. Springer.
- [Gerlough et Huber, 1975] GERLOUGH, D. L. et HUBER, M. J. (1975). *Traffic flow theory : a monograph*, volume 165. Transportation Research Board, National Research Council Washington, DC.
- [Godet *et al.*, 2000] GODET, M., MONTI, R., MEUNIER, F. et ROUBELAT, F. (2000). *La boîte à outils de prospective stratégique*. CNAM.
- [Golden et Powell, 2000] GOLDEN, W. et POWELL, P. (2000). Towards a definition of flexibility : in search of the holy grail? *Omega*, 28(4):373–384.
- [Gómez-Pérez, 1999] GÓMEZ-PÉREZ, A. (1999). Ontological engineering : A state of the art. *Expert Update : Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence*, 2(3):33–43.
- [Gómez-Pérez *et al.*, 2004] GÓMEZ-PÉREZ, A., CORCHO, O. et FERNANDEZ-LOPEZ, M. (2004). Ontological engineering : with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the semantic web. (advanced information and knowledge processing).
- [Gómez-Pérez *et al.*, 1995] GÓMEZ-PÉREZ, A., JURISTO, N. et PAZOS, J. (1995). Evaluation and assessment of knowledge sharing technology. *Towards very large knowledge bases*, pages 289–296.
- [Greenshields *et al.*, 1935] GREENSHIELDS, B., CHANNING, W., MILLER, H. *et al.* (1935). A study of traffic capacity. *In Highway research board proceedings*, volume 1935. National Research Council (USA), Highway Research Board.

- [Greenshields *et al.*, 1934] GREENSHIELDS, B. D., THOMPSON, J., DICKINSON, H. et SWINTON, R. (1934). The photographic method of studying traffic behavior. *In Highway Research Board Proceedings*, volume 13.
- [Gruber, 1993] GRUBER, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5:199–220.
- [Guarino, 1997] GUARINO, N. (1997). Semantic matching : Formal ontological distinctions for information organization, extraction, and integration. *In Information Extraction A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology*, pages 139–170. Springer.
- [Guarino, 1998] GUARINO, N. (1998). *Formal ontology in information systems : Proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy*, volume 46. IOS press.
- [Gundel, 2005] GUNDEL, S. (2005). Towards a new typology of crises. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 13(3):106–115.
- [Hale, 1997] HALE, J. (1997). A layered communication architecture for the support of crisis response. *Journal of Management Information Systems*, pages 235–255.
- [Hashimoto *et al.*, 1982] HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R. et LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1):14–20.
- [Henn, 2001] HENN, V. (2001). *Information routière et affectation du trafic : vers une modélisation floue*. Thèse de doctorat, Saint-Etienne.
- [Hernandez, 2005] HERNANDEZ, N. (2005). *Ontologies de domaine pour la modélisation du contexte en recherche d'information*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [Herre, 2010] HERRE, H. (2010). General formal ontology (gfo) : A foundational ontology for conceptual modelling. *In Theory and applications of ontology : computer applications*, pages 297–345. Springer.
- [Herre *et al.*, 2006] HERRE, H., HELLER, B., BUREK, P., HOEHNDORF, R., LOEBE, F. et MICHALEK, H. (2006). General formal ontology (gfo)—a foundational ontology integrating objects and processes. *Onto-Med Report*, 8.
- [Heylighen et Joslyn, 2001] HEYLIGHEN, F. et JOSLYN, C. (2001). Cybernetics and second order cybernetics. *Encyclopedia of physical science & technology*, 4:155–170.
- [Hoogendoorn et Bovy, 2001] HOOGENDOORN, S. P. et BOVY, P. H. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4):283–303.
- [Horrocks *et al.*, 2002] HORROCKS, I. *et al.* (2002). Daml+oil : a description logic for the semantic web. *IEEE Data Eng. Bull.*, 25(1):4–9.
- [Hounsell *et al.*, 1994] HOUNSELL, N., BARNARD, S. et McDONALD, M. (1994). Capacity and flow breakdown on uk motorways. *In PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGHWAY CAPACITY, VOLUME 1*.

- [ISO, 2008] ISO, E. (2008). 9001 : 2008. *Quality management systems—Requirements (ISO, 9001)*.
- [Jacot, 1990] JACOT, J. H. (1990). A propos de l'évaluation économique des systèmes intégrés de production. *ECOSIP France. Gestion industrielle et mesure économique, Paris : Editions Economica*.
- [Jacques et Gatot, 1997] JACQUES, J. et GATOT, L. (1997). De l'incident à la catastrophe : un modèle organisationnel. *Urgences Médicales*, 16(1):24–30.
- [Jean et al., 2007] JEAN, S., PIERRA, G. et AIT-AMEUR, Y. (2007). Domain ontologies : A database-oriented analysis. In *Web Information Systems and Technologies*, pages 238–254. Springer.
- [Jeuge-Maynard, 2010] JEUGE-MAYNARD, I. (2010). *Le petit Larousse illustré : en couleurs : 87 000 articles, 5 000 illustrations, 321 cartes, chronologie universelle*. Larousse, Paris.
- [Kervern, 1995] KERVERN, G. Y. (1995). *Éléments fondamentaux des cindyniques*. Economica.
- [Keßler et Hendrix, 2010] KESSLER, C. et HENDRIX, C. (2010). The humanitarian exchange language : Coordinating disaster response with semantic web technologies. *Semantic Web*.
- [Kononov et al., 2012] KONONOV, J., HERSEY, S., REEVES, D. et ALLERY, B. K. (2012). Relationship between freeway flow parameters and safety and its implications for hard shoulder running. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2280(1):10–17.
- [Konstantas et al., 2005] KONSTANTAS, D., BOURRIÈRES, J. P., LÉONARD, M. et BOUDJLIDA, N. (2005). *Interoperability of enterprise software and applications*.
- [Kovoor-Misra, 1995] KOVOOR-MISRA, S. (1995). A multidimensional approach to crisis preparation for technical organizations : some critical factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 48(2):143–160.
- [Kwon et al., 2013] KWON, T. J., FU, L. et JIANG, C. (2013). Effect of winter weather and road surface conditions on macroscopic traffic parameters. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2329(1):54–62.
- [l'Académie Française, 2005] l'Académie FRANÇAISE (2005). *Dictionnaire de l'Académie française : A-Enz*. Dictionnaire de l'Académie française. A. Fayard.
- [Lagadec, 1991] LAGADEC, P. (1991). La gestion des crises. *Ediscience international. Paris*.
- [Lagadec, 1995] LAGADEC, P. (1995). Cellules de crise.
- [Lauras, 2013] LAURAS, M. (2013). *Systèmes d'aide à la décision pour des organisations collaboratives efficaces et agiles : application à la gestion de chaînes logistiques et à la gestion de crises*. Thèse de doctorat.

- [Lenat *et al.*, 1990] LENAT, D. B., GUHA, R. V., PITTMAN, K., PRATT, D. et SHEPHERD, M. (1990). Cyc : toward programs with common sense. *Communications of the ACM*, 33(8):30–49.
- [Leurent, 1995] LEURENT, F. (1995). Un algorithme pour résoudre plusieurs modèles d’affectation du trafic : la procédure d’égalisation par transvasement. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, (30):31–49.
- [Lighthill et Whitham, 1955] LIGHTHILL, M. J. et WHITHAM, G. B. (1955). On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178):317–345.
- [Liu *et al.*, 2013] LIU, S., SHAW, D. et BREWSTER, C. (2013). Ontologies for crisis management : a review of state of the art in ontology design and usability. *In Proceedings of the Information Systems for Crisis Response and Management conference (ISCRAM 2013 12-15 May, 2013)*.
- [Mahmassani, 2001] MAHMASSANI, H. S. (2001). Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications. *Networks and Spatial Economics*, 1(3-4):267–292.
- [Mahmassani et Peeta, 1995] MAHMASSANI, H. S. et PEETA, S. (1995). System optimal dynamic assignment for electronic route guidance in a congested traffic network. *In Urban Traffic Networks*, pages 3–37. Springer.
- [Malhotra *et al.*, 2014] MALHOTRA, A., YOUNESI, E., GÜNDEL, M., MÜLLER, B., HENNEKA, M. T. et HOFMANN-APITIUS, M. (2014). Ado : a disease ontology representing the domain knowledge specific to alzheimer’s disease. *Alzheimer’s & Dementia*, 10(2):238–246.
- [Malone *et al.*, 1999] MALONE, T. W., CROWSTON, K., LEE, J., PENTLAND, B., DEL-LAROCAS, C., WYNER, G., QUIMBY, J., OSBORN, C. S., BERNSTEIN, A., HERMAN, G. *et al.* (1999). Tools for inventing organizations : Toward a handbook of organizational processes. *Management Science*, 45(3):425–443.
- [Manola et Miller, 2004] MANOLA, F. et MILLER, E. (2004). RDF primer.
- [Marquès, 2010] MARQUÈS, G. (2010). *Management des risques pour l’aide à la gestion de la collaboration au sein d’une chaîne logistique : une approche par simulation*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [Mascardi *et al.*, 2007] MASCARDI, V., CORDÌ, V. et ROSSO, P. (2007). A comparison of upper ontologies. *In WOA*, pages 55–64.
- [Masolo *et al.*, 2002] MASOLO, C., BORGIO, S., GANGEMI, A., GUARINO, N., OLTRAMARI, A., OLTRAMARI, R., SCHNEIDER, L., ISTC-CNR, L. P. et HORROCKS, I. (2002). Wonderweb deliverable d17. the wonderweb library of foundational ontologies and the dolce ontology.
- [McGuinness *et al.*, 2004] MCGUINNESS, D. L., VAN HARMELEN, F. *et al.* (2004). Owl web ontology language overview. *W3C recommendation*, 10(10):2004.

- [McGuire *et al.*, 2005] MCGUIRE, T., CHAMBEFORT, P., PARKS, M. et MORRALL, J. (2005). Downgrade passing lanes on the canadian trans-mountain highway system. *In Innovation and Emerging Issues in Geometric Design Session of the 2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Calgary.*
- [Mendes, 2003] MENDES, O. (2003). État de l'art sur les méthodologies d'ingénierie ontologique. *Centre de recherche LICEF, Montréal.*
- [Mendonça *et al.*, 2007] MENDONÇA, L. F., VIEIRA, S. M. et SOUSA, J. (2007). Decision tree search methods in fuzzy modeling and classification. *International Journal of Approximate Reasoning*, 44(2):106–123.
- [Merchant et Nemhauser, 1978] MERCHANT, D. K. et NEMHAUSER, G. L. (1978). A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems. *Transportation Science*, 12(3):183–199.
- [Milton, 2008] MILTON, N. R. (2008). *Knowledge technologies*, volume 3. Polimetrica sas.
- [Monachesi *et al.*, 2006] MONACHESI, P., LEMNITZER, L. et SIMOV, K. (2006). *Language technology for elearning*. Springer.
- [Morin, 1976] MORIN, E. (1976). Pour une crisologie. *Communications*, 25(1):149–163.
- [Mu, 2012] MU, W. (2012). *Caractérisation et logique d'une situation collaborative*. Thèse de doctorat, INPT.
- [Napoli, 1992] NAPOLI, A. (1992). *Représentations à objets et raisonnement par classification en intelligence artificielle*. Thèse de doctorat.
- [Neches *et al.*, 1991] 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.
- [Newell *et al.*, 1972] NEWELL, A., SIMON, H. A. *et al.* (1972). *Human problem solving*, volume 104. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- [Niles et Pease, 2001] NILES, I. et PEASE, A. (2001). Towards a standard upper ontology. *In Proceedings of the international conference on Formal Ontology in Information Systems- Volume 2001*, pages 2–9. ACM.
- [Nonaka, 1991] NONAKA, I. (1991). The knowledge-creating company. *Harvard business review*, 69(6):96–104.
- [Nonaka, 1994] NONAKA, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization science*, 5(1):14–37.
- [Noy, 2004] NOY, N. F. (2004). Semantic integration : A survey of ontology-based approaches. *SIGMOD Record*, 33:2004.
- [Noy et Hafner, 1997] NOY, N. F. et HAFNER, C. D. (1997). The state of the art in ontology design : A survey and comparative review. *AI magazine*, 18(3):53.
- [Ortmann *et al.*, 2011] 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.
- [Panhaleux, 2011] PANHALEUX, J. (2011). Retour d'expérience à la suite de l'épisode neigeux survenu le 8 décembre 2010 en ile-de-france. Rapport de mission, Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable.
- [Papola, 2004] PAPOLA, A. (2004). Some developments on the cross-nested logit model. *Transportation Research Part B : Methodological*, 38(9):833–851.
- [Pearson et Clair, 1998] PEARSON, C. M. et CLAIR, J. A. (1998). Reframing crisis management. *Academy of management review*, 23(1):59–76.
- [Pearson et Mitroff, 1993] PEARSON, C. M. et MITROFF, I. I. (1993). From crisis prone to crisis prepared : A framework for crisis management. *The academy of management executive*, 7(1):48–59.
- [Polanyi, 1967] POLANYI, M. (1967). The tacit dimension.
- [Quarantelli, 1988] QUARANTELLI, E. L. (1988). Disaster crisis management : A summary of research findings. *Journal of management studies*, 25(4):373–385.
- [Rajsiri, 2009] RAJSIRI, V. (2009). *Knowledge-based system for collaborative process specification*. Thèse en systèmes industriels, INPT - EMAC.
- [Rasmussen et Dolan, 2013] RASMUSSEN, K. E. et DOLAN, M. E. (2013). Oncocl : A cancer cell ontology. In *ICBO*, page 126.
- [Rotmans *et al.*, 2000] ROTMANS, J., van ASSELT, M., ANASTASI, C., GREEUW, S., MELLORS, J., PETERS, S., ROTHMAN, D. et RIJKENS, N. (2000). Visions for a sustainable europe. *Futures*, 32(9):809–831.
- [Roux-Dufort, 2000] ROUX-DUFORT, C. (2000). *La gestion de crise : un enjeu stratégique pour les organisations*. De Boeck Supérieur.
- [Roy, 1992] ROY, B. (1992). Science de la décision ou science de l'aide à la décision ?
- [Setra, 2013] SETRA (2013). Plan de gestion du trafic interurbain - dossier 3 : Outils d'accompagnement - partie 3.2 les formations à la gestion de crise routière. Rapport technique, Cerema.
- [Shrivastava, 1995] SHRIVASTAVA, P. (1995). Industrial/environmental crises and corporate social responsibility. *The Journal of Socio-Economics*, 24(1):211–227.
- [Slack, 2005] SLACK, N. (2005). The flexibility of manufacturing systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(12):1190–1200. <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1529548>.
- [Sowa, 1999] SOWA, J. F. (1999). Knowledge representation : logical, philosophical, and computational foundations.
- [Stearns *et al.*, 2001] STEARNS, M. Q., PRICE, C., SPACKMAN, K. A. et WANG, A. Y. (2001). Snomed clinical terms : overview of the development process and project status. In *Proceedings of the AMIA Symposium*, page 662. American Medical Informatics Association.

- [Stenzhom, 2014] STENZHOM, H. (2014). Basic Formal Ontology (BFO) | Home. "<http://www.ifomis.org/bfo/>".
- [Sundar et Sezhiyan, 2007] SUNDAR, I. et SEZHIYAN, I. S. T. (2007). *Disaster Management*. Sarup & Sons.
- [Tahon et Frein, 2000] TAHON, C. et FREIN, Y. (2000). Document de synthèse du groupe de recherche en productique—thème 4 : Evaluation de performances.
- [Thaneseun *et al.*, 2010] THANESEUN, S., KAGAYA, S., UCHIDA, K.-e. et HAGIWARA, T. (2010). Optimal winter speed limit. In *Journal of the transportation research forum*, volume 46.
- [Tomasini et Van Wassenhove, 2004] TOMASINI, R. M. et VAN WASSENHOVE, L. N. (2004). Genetically modified food donations and the cost of neutrality : logistics response to the 2002 food crisis in southern africa. Rapport technique, No 03/2004-5169. INSEAD, Fontainebleau, France.
- [Touzi, 2007] TOUZI, J. (2007). *Aide à la conception de Système d'Information Collaboratif support de l'interopérabilité des entreprises*. Thèse en systèmes industriels, INPT - EMAC.
- [Truptil, 2011] TRUPTIL, S. (2011). *Etude de l'approche de l'interopérabilité par médiation dans le cadre d'une dynamique de collaboration appliquée à la gestion de crise*. Thèse de doctorat, INPT - EMAC, Albi.
- [Turner, 1976] TURNER, B. A. (1976). The organizational and interorganizational development of disasters. *Administrative Science Quarterly*, pages 378–397.
- [Uschold, 1996] USCHOLD, M. (1996). Building ontologies : Towards a unified methodology. *TECHNICAL REPORT-UNIVERSITY OF EDINBURGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS INSTITUTE AIAI TR*.
- [Valtinat *et al.*, 2006] VALTINAT, T., BACKHAUS, W. et HENNING, K. (2006). Non invasive, cross-sector development and management of trends. *FRONTIERS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND APPLICATIONS*, 143:393.
- [Van de Walle et Turoff, 2008] VAN DE WALLE, B. et TUROFF, M. (2008). Decision support for emergency situations. *Information Systems and E-Business Management*, 6(3):295–316.
- [Van Notten *et al.*, 2003] VAN NOTTEN, P. W., ROTMANS, J., van ASSELT, M. et ROTHMAN, D. S. (2003). An updated scenario typology. *Futures*, 35(5):423–443.
- [Van Wassenhove, 2006] VAN WASSENHOVE, L. N. (2006). Humanitarian aid logistics : supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5):475–489.
- [Vernadat, 1996] VERNADAT, F. B. (1996). *Enterprise modeling and integration : principles and applications*, volume 997. Chapman & Hall London.
- [Vernon, 2008] VERNON, F. (2008). Supply chain visibility : lost in translation? *Supply Chain Management : An International Journal*, 13(3):180–184. <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1724145&show=abstract>.

- [Wardrop, 1952] WARDROP, J. G. (1952). Road paper. some theoretical aspects of road traffic research. In *ICE Proceedings : Engineering Divisions*, volume 1, pages 325–362. Thomas Telford.
- [Wiederhold, 1992] WIEDERHOLD, G. (1992). Mediators in the architecture of future information systems. *Computer*, 25(3):38–49.
- [yu da zi dian" Hubei sheng bian ji bu., 1986] yu da zi dian" Hubei sheng bian ji BU., H. (1986). *Han zi de yuan he liu : "Han yu da zi dian" bian zuan lun cong / "Han yu da zi dian" Hubei sheng bian ji bu*. Hubei ci shu chu ban she : Xin hua shu dian Hubei fa xing suo jing shou [Wuhan shi], di 1 ban. édition.
- [Zimmermann, 2000] ZIMMERMANN, H.-J. (2000). An application-oriented view of modeling uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 122(2):190 – 198.
- [Zorn et Taylor, 2004] ZORN, T. E. et TAYLOR, J. R. (2004). Knowledge management and/as organizational communication. *Key issues in organizational communication*, pages 96–112.
- [Zribi, 2014] ZRIBI, S. (2014). *La gouvernance SOA pour une approche de conception de Système d'Information de Médiation : réconciliation non-fonctionnelle de services pour mettre en œuvre les processus métier*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.

Annexe A

Règles de déduction

Cette annexe présente les règles de déduction de processus collaboratif issues des travaux de [Rajsiri, 2009], [Mu, 2012] et [Truptil, 2011].

A.1 Règles issues de MISE 1.0

Règle 1 : Identification des services fournis par chaque acteur.

$$\boxed{\text{Participant}(?x) \wedge \text{playRole}(?x, ?y) \wedge \text{performAService}(?y, ?z) \rightarrow \text{provideAService}(?x, ?z)}$$

Cette règle stipule que si un participant « x » joue un rôle « y » (vendeur par exemple) alors il va fournir tous les services abstraits « z » qu'est censé fournir ce rôle (vente de service, vente de produit, vente d'articles du stock).

Règle 2 : Définition des activités métiers.

$$\boxed{\text{Participant}(?x) \wedge \text{provideAService}(?x, ?y) \wedge \text{hasBusinessService}(?y, ?a) \rightarrow \text{provideBusinessService}(?x, ?a)}$$

Cette règle assigne au participant « x » fournissant un service abstrait « y » tous les services métiers « a » qui lui correspondent.

Règle 3 : Séquencement des activités métiers.

$$\boxed{\begin{aligned} &\text{CollaborativeNetwork}(?a) \wedge \text{hasRelationship}(?a, ?z) \wedge P1(?z, ?y) \wedge \\ &\text{provideBusinessService}(?y, ?c) \wedge \text{hasOutput}(?c, ?d) \wedge P2(?z, ?x) \wedge \\ &\text{provideBusinessService}(?x, ?b) \wedge \text{hasInput}(?b, ?d) \wedge \\ &\text{CoordinationService}(?f) \wedge \text{manipulateResource}(?f, ?d) \wedge \\ &\text{DependencyBetweenBusinessServices}(?e) \rightarrow \\ &\text{fromBusinessService}(?e, ?c) \wedge \text{toBusinessService}(?e, ?b) \wedge \\ &\text{containResource}(?e, ?d) \wedge \text{isCoordinatedBy}(?e, ?f) \wedge \\ &\text{hasMISService}(?a, ?f) \wedge \text{MISService}(?f) \end{aligned}}$$

Cette règle permet de créer un enchaînement des activités métiers (embryon de processus) en se basant sur la correspondance des entrées et sorties des unes et des autres.

Règle 4 : Sélection des services répondant à un objectif commun.

$$\begin{array}{l} \text{CommonGoal}(?x) \wedge \text{description}(?x, ?a) \wedge \text{swrlb} : \text{substringBefore}(?y, ?a, "") \wedge \\ \text{AbstractService}(?b) \wedge \text{name}(?b, ?c) \wedge \text{swrlb} : \text{containsIgnoreCase}(?c, ?y) \rightarrow \\ \text{achievesAService}(?x, ?b) \end{array}$$

Cette règle assure la sélection des services abstraits nécessaires à la réalisation de l'objectif commun de la collaboration.

Règle 5 : Dédution de la topologie de la collaboration.

$$\begin{array}{l} \text{Topology}(?x) \wedge \text{hasPower}(?x, \text{central}) \wedge \text{hasDuration}(?x, \text{continuous}) \rightarrow \\ \text{hasType}(?x, \text{star}) \\ \text{Topology}(?x) \wedge \text{hasPower}(?x, \text{equal}) \wedge \text{hasDuration}(?x, \text{discontinuous}) \rightarrow \\ \text{hasType}(?x, \text{P2P}) \\ \text{Topology}(?x) \wedge \text{hasPower}(?x, \text{hierarchic}) \wedge \text{hasDuration}(?x, \text{continuous}) \rightarrow \\ \text{hasType}(?x, \text{chain}) \end{array}$$

Cette règle permet de déduire la manière dont s'organise la collaboration (pair à pair, en étoile ou en chaîne).

A.2 Règles issues de MISE 2.0

Groupe de règle 1 : La création du médiateur.

$$\begin{array}{l} \forall \text{SubNetwork}(x) (\forall \text{hasPartner}(\text{SubNetwork}(X), \text{Partner}(X_1)) \quad \wedge \\ (\forall \text{hasPartner}(\text{SubNetwork}(X), \text{Partner}(X_2)) \quad \wedge \\ (\forall \text{hasPartner}(\text{SubNetwork}(X), \text{Partner}(X_n)) \quad \rightarrow \quad \exists \text{Mediator}(X) \quad \wedge \\ \exists \text{hasMediator}(\text{SubNetwork}(X), \text{Mediator}(X)) \end{array}$$

Cette règle sert à la mise en place d'un médiateur entre les différents partenaires X_1, X_2, \dots, X_n d'un sous réseau X .

Groupe de règle 2 : La création des relations entre médiateurs

$$\begin{array}{l} \text{If } \forall \text{StrategyObjective}(X_1) \\ (\forall \text{generates}(\text{StrategyObjective}(X_1), \text{MainFunction}(X_1))) \quad \wedge \\ \forall \text{OperationObjective}(X_2) \\ (\forall \text{generates}(\text{OperationObjective}(X_2), \text{MainFunction}(X_2))) \\ \text{If } \forall \text{MainFunction}(X_1) \\ (\forall \text{out}(\text{MainFunction}(X_1), \text{BusinessMessage}(m))) \quad \wedge \\ \forall \text{MainFunction}(X_2) (\forall \text{in}(\text{MainFunction}(X_2), \text{BusinessMessage}(m))) \quad \rightarrow \\ \exists \text{Order}(m) (\text{hasMediatorRelationship}(\text{Mediator}(X_1), \text{Order}(m))) \quad \wedge \\ \exists \text{Order}(m) (\text{hasMediatorRelationship}(\text{Mediator}(X_2), \text{Order}(m))) \end{array}$$

Groupe de règle 3 : La création des fonctions de générations de médiation

$$\begin{array}{l}
 \forall Function(X)(\forall In(Function(X), BusinessMessage(m))) \quad \rightarrow \\
 \exists GeneratedMediatorFunction(X) \\
 (Out(GeneratedMediatorFunction(X), BusinessMessage(m))) \quad \wedge \\
 \exists GeneratedMediatorFunction(X) \\
 (generatedFrom(Function(X), GeneratedMediatorFunction(X)))
 \end{array}$$

Groupe de règle 4 : La création des liens entre fonctions de génération de médiation et médiateur

$$\begin{array}{l}
 \forall MainFunction(X)(\forall owns(MainFunction(X), Function(X_1))) \quad \rightarrow \\
 \exists Mediator(X) \\
 (\forall hasGeneratedFunction(Mediator(X), GeneratedMediatorFunction(X_1)))
 \end{array}$$

Groupe de règle 5 : La création de fonctions intermédiation

$$\begin{array}{l}
 If \forall GeneratedMediatorFunction(X) \\
 (In/Out(GeneratedMediatorFunction(X), BusinessMessage(m))) \wedge \\
 \exists MediatorRelationship(m)(hasMediatorRelationship(Mediator(Y), \\
 MediatorRelationship(m))) \wedge Mediator(Y) \\
 (hasGeneratedFunction(Mediator(Y), GeneratedMediatorFunction(X))) \rightarrow \\
 \exists Event(m)(achievedBy(MediatorRelationship(m), Event(m))) \quad \wedge \\
 \exists InterMediatorFunction(X)(In/out(Event(m), InterMediatorFunction(X)))
 \end{array}$$

A.3 Règles issues de ISyCri

Règle 1 : Propagation du lien SameAs par transitivité

$$\begin{array}{l}
 Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge SameAs(?x, ?y) \wedge SameAs(?y, ?z) \rightarrow \\
 SameAs(?x, ?z)
 \end{array}$$

Règle 2 : Propagation du lien Near aux instances équivalentes

$$\begin{array}{l}
 Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge SameAs(?x, ?y) \wedge Near(?y, ?z) \rightarrow \\
 Near(?x, ?z)
 \end{array}$$

Règle 3 : Propagation du lien Near par transitivité

$$\begin{array}{l}
 Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge Near(?x, ?y) \wedge Near(?y, ?z) \rightarrow \\
 Near(?x, ?z)
 \end{array}$$

Règle 4 : Déduction des risques présents en fonction des caractéristiques

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{estComposéDe}(?x, ?z) \wedge \text{Caractéristique}(?z) \wedge \text{agregé}(?a, ?z) \wedge \text{Risque}(?a) \rightarrow \text{estComposéDe}(?x, ?a)$$

Règle 5 : Déduction des services interdits par un élément de crise

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{estComposéDe}(?x, ?y) \wedge \text{Service}(?z) \wedge \text{estInterditPar}(?z, ?b) \wedge \text{SameAs}(?y, ?b) \rightarrow \text{estInterditPar}(?z, ?y)$$

Règle 6 : Déduction des services permettant de réduire les conséquences de la crise

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{Conséquence}(?y) \wedge \text{Conséquence}(?b) \wedge \text{estComposéDe}(?x, y) \wedge \text{Service}(?z) \wedge \text{réduit}(?z, ?b) \wedge \text{SameAs}(?y, ?b) \rightarrow \text{peutRésoudre}(?z, ?y)$$

Règle 7 : Déduction des services qui pourraient réduire des conséquences de la crise

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{Conséquence}(?y) \wedge \text{Conséquence}(?b) \wedge \text{estComposéDe}(?x, y) \wedge \text{Service}(?z) \wedge \text{réduit}(?z, ?b) \wedge \text{Near}(?y, ?b) \rightarrow \text{pourraitRésoudre}(?z, ?y)$$

Règle 8 : Déduction des services permettant de prévenir les risques de la crise

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{Risque}(?y) \wedge \text{Risque}(?b) \wedge \text{estComposéDe}(?x, y) \wedge \text{Service}(?z) \wedge \text{prévient}(?z, ?b) \wedge \text{SameAs}(?y, ?b) \rightarrow \text{peutPrévenir}(?z, ?y)$$

Règle 9 : Déduction des services permettant de prévenir les risques de la crise

$$\text{Crise}(?x) \wedge \text{Risque}(?y) \wedge \text{Risque}(?b) \wedge \text{estComposéDe}(?x, y) \wedge \text{Service}(?z) \wedge \text{prévient}(?z, ?b) \wedge \text{Near}(?y, ?b) \rightarrow \text{pourraitPrévenir}(?z, ?y)$$

Règle 10 : Création des éléments obligatoires du processus

$$\begin{aligned} \text{Crise}(?x) \wedge \text{swrlx} & : \text{makeOWLThing}(?y, ?x) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \wedge \text{swrlx} & : \text{makeOWLThing}(?b, ?x) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?c, ?x) \rightarrow \text{SIMPool}(?y) \wedge \text{SIMLane}(?a) \wedge \text{StartEvent}(?b) \wedge \\ \text{EndEvent}(?c) \wedge \text{name}(?b, \text{"start"}) \wedge \text{name}(?c, \text{"end"}) \end{aligned}$$

Règle 11 : Création des Partner pools et partner lanes

$$\begin{aligned} \text{Acteur}(?x) \wedge \text{Service}(?a) \wedge \text{Fournit}(?x, ?a) \wedge \text{Etat}(?a, \text{"OK"}) \wedge \text{swrlx} & : \\ \text{makeOWLThing}(?b, ?x) \wedge \text{swrlx} & : \text{makeOWLThing}(?c, ?x) \rightarrow \\ \text{PartnerPool}(?b) \wedge \text{PartnerLane}(?c) \end{aligned}$$

Règle 12 : Création des Partner tasks et SIM tasks

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Etat}(?x, \text{"OK"}) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?a, ?x) \wedge \\ \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?b, ?x) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?c, ?x) \wedge \\ \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?d, ?x) \rightarrow \text{PartnerTask}(?a) \wedge \text{SIMTask}(?b) \wedge \\ \text{MessageFlow}(?c) \wedge \text{MessageFlow}(?d) \wedge \text{MfIN}(?c, ?a) \wedge \text{MfOUT}(?c, ?b) \wedge \\ \text{MfIN}(?d, ?b) \wedge \text{MfOUT}(?d, ?a) \end{array}$$

Règle 13 : Création des éléments du processus liés à un pré requis d'un service

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Service}(?y) \wedge \text{Etat}(?x, \text{"OK"}) \wedge \text{necessite}(?x, ?y) \wedge \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?y) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?c, ?y) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?b, ?y) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?d, ?y) \rightarrow \\ \text{Etat}(?y, \text{"OK"}) \wedge \text{PartnerTask}(?a) \wedge \text{SIMTask}(?b) \wedge \text{MessageFlow}(?c) \wedge \\ \text{MessageFlow}(?d) \wedge \text{MfIN}(?c, ?a) \wedge \text{MfOUT}(?c, ?b) \wedge \text{MfIN}(?d, ?b) \wedge \\ \text{MfOUT}(?d, ?a) \end{array}$$

Règle 14 : Création des éléments du processus liés à un prérequis d'un service via les conditions

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Service}(?y) \wedge \text{Condition}(?z) \wedge \text{Condition}(?e) \wedge \text{Etat}(?x, \text{"OK"}) \wedge \\ \text{necessite}(?x, ?z) \wedge \text{SameAs}(?z, ?e) \wedge \text{implique}(?y, ?e) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?a, ?y) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?c, ?y) \wedge \text{swrlx} : \\ \text{makeOWLThing}(?b, ?y) \wedge \text{swrlx} : \text{makeOWLThing}(?d, ?y) \rightarrow \\ \text{Etat}(?y, \text{"OK"}) \wedge \text{PartnerTask}(?a) \wedge \text{SIMTask}(?b) \wedge \text{MessageFlow}(?c) \wedge \\ \text{MessageFlow}(?d) \wedge \text{MfIN}(?c, ?a) \wedge \text{MfOUT}(?c, ?b) \wedge \text{MfIN}(?d, ?b) \wedge \\ \text{MfOUT}(?d, ?a) \end{array}$$

Règle 15 : Parallélisme des services, produit par des partenaires différents, ne traitant pas le même problème n'impactant pas le même composant système d'étude

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Service}(?y) \wedge \text{Acteur}(?c) \wedge \text{Acteur}(?d) \wedge \text{produitPar}(?x, ?c) \wedge \\ \text{produitPar}(?y, ?d) \wedge \text{differentFrom}(?c, ?d) \wedge \text{estUtiliséPour}(?y, ?b) \wedge \\ \text{estUtiliséPour}(?x, ?a) \wedge \text{differentFrom}(?a, ?b) \wedge \text{impacte}(?b, ?e) \wedge \\ \text{impacte}(?a, ?f) \wedge \text{differentFrom}(?e, ?f) \rightarrow \text{sameTime}(?x, ?y) \end{array}$$

Règle 16 : Parallélisme des services sélectionnés pour traiter le même problème

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Service}(?y) \wedge \text{estUtiliséPour}(?y, ?b) \wedge \text{estUtiliséPour}(?x, ?a) \rightarrow \\ \text{sameTime}(?x, ?y) \end{array}$$

Règle 17 : Parallélisme des services nécessités par un autre

$$\begin{array}{l} \text{Service}(?x) \wedge \text{Service}(?a) \wedge \text{Service}(?b) \wedge \text{necessite}(?x, ?a) \wedge \text{necessite}(?x, ?b) \rightarrow \\ \text{sameTime}(?a, ?b) \end{array}$$

A.4 Règles sélectionnées pour la couche crise de l'ontologie de crise routière

Règles de propagation des liens sémantiques

Règle 1.1 : Propagation du lien SameAs par transitivité

$$\boxed{Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge SameAs(?x, ?y) \wedge SameAs(?y, ?z) \rightarrow SameAs(?x, ?z)}$$

Règle 1.2 : Propagation du lien Near aux instances équivalentes

$$\boxed{Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge SameAs(?x, ?y) \wedge Near(?y, ?z) \rightarrow Near(?x, ?z)}$$

Règle 1.3 : Propagation du lien Near par transitivité

$$\boxed{Risque(?x) \wedge Risque(?y) \wedge Risque(?z) \wedge Near(?x, ?y) \wedge Near(?y, ?z) \rightarrow Near(?x, ?z)}$$

Les règles de transitivité (1.1 et 1.2) stipulent que si un Risque « x » est identique/-proche d'un Risque « y » et que celui-ci est proche d'un troisième Risque « z » alors les Risques « x » et « z » sont identiques/proches entre eux.

Les règles d'émergence des risques

Règle 2.1 : Déduction des risques présents en fonction des caractéristiques

$$\boxed{Crise(?x) \wedge estComposéDe(?x, ?z) \wedge Caractéristique(?z) \wedge agrége(?a, ?z) \wedge Risque(?a) \rightarrow estComposéDe(?x, ?a)}$$

Cette règle propose de que si une Crise « x » est composé d'une Caractéristique « z » à laquelle est agrége un Risque « a » alors celui-ci compose « x ».

Les règles de déduction de services

Règle 3.1 : Déduction des services interdits par un élément de crise

$$\boxed{Crise(?x) \wedge estComposéDe(?x, ?y) \wedge Service(?z) \wedge estInterditPar(?z, ?b) \wedge SameAs(?y, ?b) \rightarrow estInterditPar(?z, ?y)}$$

Les règles de séquençement des activités du processus

Règle 4.1 : Création des éléments du processus liés à un prérequis d'un service via les conditions

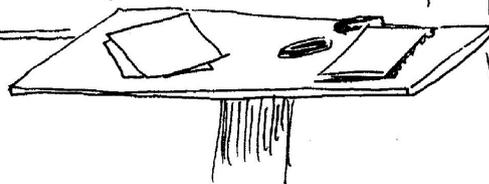
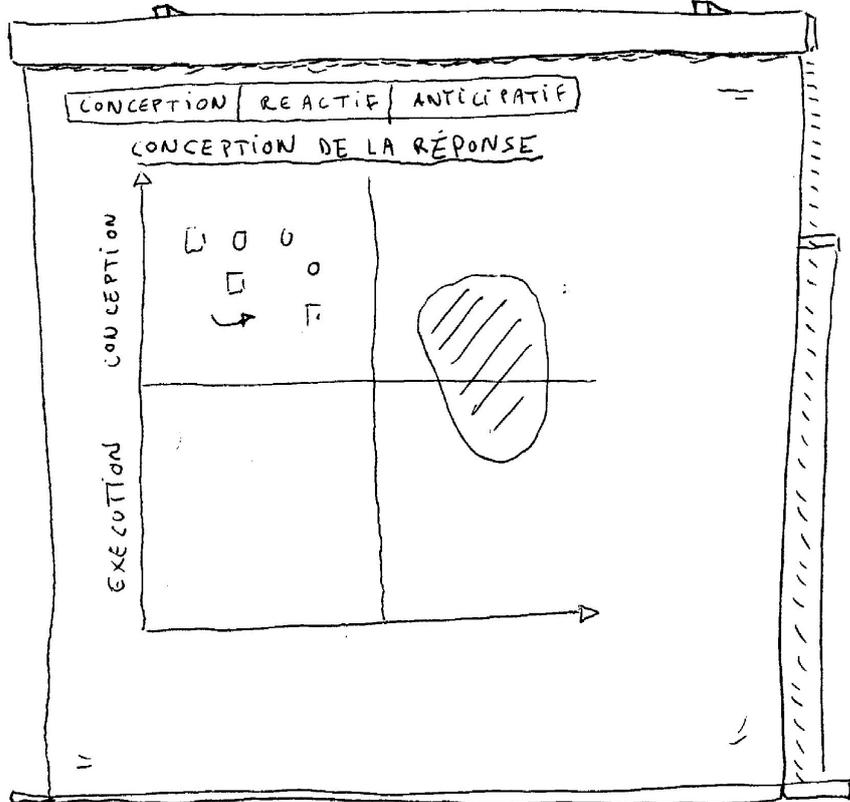
$$\boxed{\begin{aligned} &Service(?x) \wedge Service(?y) \wedge Condition(?z) \wedge Condition(?e) \wedge Etat(?x, "OK") \wedge \\ &nécessite(?x, ?z) \wedge SameAs(?z, ?e) \wedge implique(?y, ?e) \wedge swrlx : \\ &makeOWLThing(?a, ?y) \wedge swrlx : makeOWLThing(?c, ?y) \wedge swrlx : \\ &makeOWLThing(?b, ?y) \wedge swrlx : makeOWLThing(?d, ?y) \rightarrow \\ &Etat(?y, "OK") \wedge PartnerTask(?a) \wedge SIMTask(?b) \wedge MessageFlow(?c) \wedge \\ &MessageFlow(?d) \wedge MfIN(?c, ?a) \wedge MfOUT(?c, ?b) \wedge MfIN(?d, ?b) \wedge \\ &MfOUT(?d, ?a) \end{aligned}}$$

Règle 4.2 : Parallélisme des services, produit par des partenaires différents, ne traitant pas le même problème n'impactant pas le même composant système d'étude

$$\boxed{\begin{aligned} &Service(?x) \wedge Service(?y) \wedge Acteur(?c) \wedge Acteur(?d) \wedge produitPar(?x, ?c) \wedge \\ &produitPar(?y, ?d) \wedge differentFrom(?c, ?d) \wedge estUtiliséPour(?y, ?b) \wedge \\ &estUtiliséPour(?x, ?a) \wedge differentFrom(?a, ?b) \wedge impacte(?b, ?e) \wedge \\ &impacte(?a, ?f) \wedge differentFrom(?e, ?f) \rightarrow sameTime(?x, ?y) \end{aligned}}$$

Règle 4.3 : Parallélisme des services sélectionnés pour traiter le même problème

$$\boxed{Service(?x) \wedge Service(?y) \wedge estUtiliséPour(?y, ?b) \wedge estUtiliséPour(?x, ?a) \rightarrow sameTime(?x, ?y)}$$



Tommy

RÉSUMÉ

SYSTÈME D'INFORMATION DE MÉDIATION POUR LE PILOTAGE RÉACTIF ET ANTICIPATIF DE LA RÉPONSE À UNE SITUATION DE CRISE : APPLICATION AUX PERTURBATIONS SUR LES RÉSEAUX ROUTIERS

La réponse aux situations de crise routière hivernale est gérée en France au niveau zonal par les Centres Régionaux d'Information et de Coordination Routière (CRICR). Le pilotage de ces crises est réalisé à une échelle multi départementale et fait intervenir de multiples parties prenantes (gestionnaires routiers, préfetures, forces de l'ordre...). La coordination de ces acteurs hétérogènes apparaît donc comme indispensable pour assurer une réponse efficace à la situation de crise. C'est le rôle de la cellule de crise, de garantir cette coordination afin de permettre une bonne exécution de la réponse. C'est surtout son rôle d'assurer la qualité de la réponse quelque soient les aléas et les perturbations rencontrés. Malheureusement, force est de constater que les acteurs en présence ne disposent pas des outils adéquats pour atteindre ces objectifs. Les présents travaux de thèse ambitionnent d'améliorer cette situation par la mise en place d'un système d'information de médiation agile. Celui-ci repose sur la constitution d'une base de connaissances (ontologie), alimentée à partir de la collecte de données issues de systèmes d'information hétérogènes, pour permettre la définition tactique d'une solution adaptée de réponse allant jusqu'à la formalisation des processus collaboratifs à mettre en œuvre. La réalisation de la collaboration s'assoit alors sur une orchestration informatique de ces processus. Dans notre proposition, la détection « à chaud » de problèmes et les recommandations d'adaptation générées soutiennent le pilotage « réactif » de la réponse dans un environnement complexe et particulièrement instable. Cette fonctionnalité est complétée par un système capable de détecter a priori les problèmes, en établissant une projection de la situation courante (crise et réponse) à partir des éléments dont la cellule de crise dispose. Cette projection donne lieu à une évaluation de la situation future et contribue à la conception d'une nouvelle réponse. Ces mécanismes permettent un pilotage « anticipatif » de la gestion de crise. Les résultats de cette thèse ont été principalement développés et validés dans le cadre du projet PREDIT SIM-PeTra sur l'amélioration de la coordination dans la gestion des crises par la mise en place d'un Système d'Information de Médiation dans le cadre de Perturbations dans les Transports.

Mots clés : Gestion de crise, Aide à la décision, Ontologie, Collaboration, Système d'information, Transport

ABSTRACT

A MEDIATION INFORMATION SYSTEM FOR REACTIVE AND ANTICIPATIVE CRISIS MANAGEMENT : A ROAD CRISIS APPLICATION

In France, the response to winter road emergencies are managed by Regional Centres for Information and Road Coordination (CRICR). The management of these crises is performed at a multi county level and involves multiple stakeholders (road operator, local representative of national authority, police. . .). Therefore, the coordination of such heterogeneous actors must be assumed by the crisis cell to ensure an effective response. The crisis cell has also to provide a good response facing hazards and disturbances encountered. Unfortunately, it is clear that the involved actors do not have a relevant and adequate set of ICT tools to achieve these goals. This thesis aims at improving this situation by setting up an agile mediation information system. This is based on the creation of a knowledge base (structured as an ontology), fed from the gathering of data from all the available heterogeneous information systems, to enable the tactical definition of a suitable response. The final goal is to formalize this response as collaborative processes to implement and to orchestrate through a computer system. In our proposal, detecting "hot" issues (such as disruptions or unexpected events) and making recommended adaptation support the "reactive" control of the response in a complex and highly unstable environment. This feature is completed by a system able to detect a priori problems, by establishing a projection of the current situation (crisis response), based on the collected forecasts owned by the crisis manager (traffic, weather, etc.). This projection leads to an assessment of the future situation and contributes to the design of a new response. This mechanism allows a " proactive " oversight of crisis management. The results of this PhD have mainly been developed and validated in the SIM Petra project (funded by PREDIT) regarding the establishment of a Mediation Information System to improve the coordination of the management of crisis concerning disruptions in transport.

Keywords : Crisis Management, Decision Making, Ontology, Collaborative process, Mediation Information System, Transport