

---

# Modélisation sémantique et programmation générative pour une simulation multi-agent dans le contexte de gestion de catastrophe

Claire Prudhomme<sup>1</sup>, Ana Roxin<sup>2</sup>, Christophe Cruz<sup>2</sup>,  
Frank Boochs<sup>1</sup>

1. Institut i3mainz de l'Université des Sciences appliquées, Lucy-Hillebrand-Str. 2, 55128 Mainz, Allemagne  
{claire.prudhomme, frank.boochs}@hs-mainz.de
2. Laboratoire d'Informatique de Bourgogne (LIB) - EA 7534, Université de Bourgogne Franche-Comté, Bâtiment i3 M rue Sully, 21000 Dijon, France  
{ana-maria.roxin, christophe.cruz}@ubfc.fr

---

*RÉSUMÉ.* La gestion de catastrophe nécessite une préparation collaborative entre les divers intervenants. Les exercices collaboratifs visent à entraîner les intervenants à appliquer les plans préparés ainsi qu'à identifier les problèmes et points d'améliorations potentiels. Ces exercices étant coûteux, la simulation informatique est un outil permettant d'optimiser la préparation à l'aide d'une plus grande diversité de cas. Cependant, les travaux de recherche centrés sur la simulation et la gestion de catastrophe sont spécialisés sur un problème spécifique plutôt que sur l'optimisation globale des plans préparés. Cette limite s'explique par le défi que constitue la réalisation d'un modèle de simulation capable de représenter et de s'adapter à une large diversité de plans provenant de diverses disciplines. Les travaux présentés dans cet article répondent à ce défi en adaptant le modèle de simulation en fonction des informations et des plans de gestion de catastrophes intégrés dans une base de connaissances. Le modèle de simulation généré est ensuite programmé automatiquement afin d'exécuter des expériences de simulation. Les résultats sont ensuite analysés afin de générer de nouvelles connaissances et d'enrichir les plans de gestion de catastrophe dans un cycle vertueux. Cet article présente une preuve de concept sur le plan national français NOVI (NOmbreuses VICTimes), pour lequel les expériences de simulation ont permis de savoir quel est l'impact de la répartition des médecins sur l'application du plan et d'identifier la meilleure répartition.

*ABSTRACT.* Disaster management requires collaborative preparedness among the various stakeholders. Collaborative exercises aim to train stakeholders to apply the plans prepared and to identify potential problems and areas for improvement. As these exercises are costly, computer simulation is an interesting tool to optimize preparation through a wider variety of contexts. However, research on simulation and disaster management focuses on a particular problem rather than on the overall optimization of the plans prepared. This limitation is explained by the challenge of creating a simulation model that can represent and adapt to a wide variety of plans from various disciplines. The work presented in this paper addresses this challenge by adapting the simulation model based on disaster management information and plans integrated into a

*knowledge base. The simulation model created is then automatically programmed to perform simulation experiments to improve action plans. The results of the experiments are analyzed in order to generate new knowledge to enrich disaster management plans in a virtuous cycle. This paper presents a proof of concept on the French national NOVI plan, for which simulation experiments have made it possible to know the impact of the physicians distribution on the plan application as well as to identify their best distribution.*

*MOTS-CLÉS : gestion de catastrophe, simulation multi-agents, web sémantique, modélisation.*

*KEYWORDS: disaster management, multi-agent simulation, semantic web, modeling.*

---

DOI: [10.3166/rig.2020.00102](https://doi.org/10.3166/rig.2020.00102) © 2020 Lavoisier

## 1. Introduction

Avec l'augmentation des catastrophes naturelles et attaques terroristes ces dernières décennies, la gestion de catastrophe est au cœur des préoccupations des organismes de sécurité civile, de secours, et aide humanitaire (Barkaoui *et al.*, 2016). Elle repose sur la préparation de plans. Ces plans ont pour objectif de formaliser le déroulement des réponses lors de la gestion de catastrophe en fonction des risques propres à chaque localité (ex. municipalité). La préparation ne se résume pas seulement à la conception de plans, mais aussi à un cycle d'évaluation et d'amélioration de ces plans. Les exercices à des fins d'évaluation et d'amélioration ont un coût financier important limitant la complexité et la récurrence de leur mise en place. C'est pourquoi, la simulation informatique est un support de décision souvent utilisé dans ce contexte afin d'étudier des scénarios de complexité variable et divers paramètres. Cependant, une simulation informatique vise à optimiser un modèle correspondant ici à un plan. Or les plans de gestion de catastrophes sont conçus et appliqués en fonction des événements, des ressources et de la situation géographique. Certains de ces éléments peuvent être considérés comme des variables du modèle, cependant la diversité de plans en fonction des besoins se traduit par une diversité de modèles. À titre d'exemple, un plan d'évacuation et un plan de secours aux victimes ne sont pas composés des mêmes services et intervenants. Un plan d'évacuation est composé des services ayant pour but d'informer, guider la population et réguler, organiser l'évacuation, alors qu'un plan de secours est composé de services ayant pour but de secourir (mettre hors de danger), apporter les premiers soins et évacuer vers un établissement de soins adapté. Dans un plan d'évacuation, le rôle de pompier se définit par un service d'évacuation des populations en difficulté et le rôle de la police ou gendarmerie est de fournir une régulation et organisation de l'évacuation des autres populations, alors que dans un plan de secours, les pompiers fournissent un service de secours aux victimes et les médecins un service de premiers soins. L'objectif des travaux présentés dans cet article est de soutenir la préparation de plans pour la gestion de catastrophe par une optimisation de la gestion des ressources. Afin d'atteindre l'objectif, la solution présentée dans cet article répond à la problématique suivante : comment fournir un enrichissement des connaissances explicites par retour d'expérience pour des plans de gestion de catastrophe dans diverses situations ? Cette problématique nécessite de lever les verrous tels que l'adaptation de la simulation en fonction des plans et la génération de connaissances basée

sur les résultats de simulation. La solution proposée se base sur un cycle vertueux utilisant la modélisation sémantique et la simulation afin de générer de nouvelles connaissances. Ce cycle commence par l'intégration des connaissances de gestion de catastrophe dans une ontologie représentant ce domaine et appelée *SemDM* (*Semantic Disaster Management*). Il se poursuit par l'instanciation de l'ontologie du domaine de simulation multi-agent, appelée *SemMAS* (*Semantic Multi-agent Simulation*) par l'usage de requêtes SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language*) CONSTRUCT. Cette dernière ontologie est ensuite utilisée comme base pour la programmation générative de simulations. La programmation générative est définie par (Cointe, 2004) comme « une tentative de fabriquer des composants logiciels de manière automatisée en développant des programmes qui synthétisent d'autres programmes ».

La solution proposée dans cet article est un programme qui génère des modèles de simulation programmés en fonction d'une ontologie afin d'exécuter diverses expérimentations. Enfin, les résultats de simulation sont analysés afin de créer de nouvelles connaissances qui sont ajoutées à l'ontologie *SemDM*. Les travaux existant de recherche sur la modélisation du domaine de gestion de catastrophe et du domaine de simulation multi-agent sont présentés dans la section 2. La méthode proposée dans cet article, basée sur les ontologies, est décrite dans la section 3. La section 4 présente une preuve de concept à travers le cas d'étude du plan NOVI<sup>1</sup> (NOMBREUSES VICTIMES) appliqué dans le cadre d'une catastrophe hypothétique touchant la ville de Montbard (Côte d'Or, France). Ce plan vise à secourir un grand nombre de victimes (supérieur à 100) dans un même lieu et à organiser les premiers soins. Ce cas d'étude a pour objectif d'étudier la répartition des médecins entre les divers services dont ils sont responsables, soit le soin des victimes à l'hôpital ou au poste médical avancé, afin d'améliorer les plans en les enrichissant. Les conclusions sur ces travaux sont présentées dans la section 5.

## 2. Travaux connexes

La majorité des travaux de recherche visant à améliorer la collaboration pour la gestion de catastrophe propose des solutions basées sur la représentation des connaissances dans une ontologie, afin de faciliter la communication et la collaboration entre les divers intervenants. De même, certains travaux de simulation multi-agents utilisent les ontologies afin de faciliter l'interopérabilité des systèmes et la réutilisation des modèles de simulation. Les ontologies ont été définies par Studer *et al.* (1998)

---

1. Plan NOVI (<https://www.gouvernement.fr/risques/plan-novi>), déclinaison du plan français ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile). Le plan ORSEC, aussi appelé dispositif ORSEC, a été élaboré suite à « la loi de modernisation de la sécurité civile du 17 août 2004 [définissant] les mesures à mettre en place pour prévenir la population et les infrastructures des risques majeurs » (Barkaoui *et al.*, 2016). Le plan NOVI peut être déclenché en cas d'incendie de grande intensité, d'effondrement d'immeuble, d'accident du trafic routier, ferroviaire, ou aérien, d'actes criminels (ex. prise d'otages, terrorisme), de catastrophe naturelle ou technologique. Le plan NOVI a été choisi pour la diversité de situations dans lesquelles il peut être déclenché.

comme « une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée d'un domaine de connaissances ».

Leur usage facilite l'interopérabilité entre différents systèmes, permettant le partage de connaissances sur un domaine. Cet avantage joue un rôle important tant pour la représentation d'une grande diversité de plan de gestion de catastrophe que pour la modélisation de simulation multi-agent. La sous-section 2.1 présente les ontologies et vocabulaires pour la gestion de catastrophe et la sous-section 2.2 présente les ontologies pour l'ingénierie de simulations.

### **2.1. Ontologies et vocabulaires pour la gestion de catastrophe**

Les ontologies et vocabulaires développés pour la gestion de catastrophe ont principalement pour but de faciliter la collaboration entre les différents intervenants de la gestion de catastrophe à travers l'échange d'information ou la planification. Parmi les ontologies visant à faciliter l'échange d'information, l'ontologie *EMERGEL* (Casado *et al.*, 2015) a été créée lors du projet européen *Disaster*<sup>2</sup> (*Data Interoperability Solution At Stakeholders Emergencies Reaction*) afin de fournir une structure internationale de connaissances communes permettant l'échange d'information sur les tâches effectuées entre les différents pays de l'Union européenne en cas d'urgence. Cette ontologie a l'avantage de fournir une description détaillée des tâches pouvant être effectuées durant la gestion d'une catastrophe puisque celle-ci a été étudiée afin de permettre la compréhension des symboles tactiques utilisés pour décrire les actions menées sur le terrain. Un autre vocabulaire intéressant pour la gestion de crise est *MOAC*<sup>3</sup> (*Management Of A Crisis*). Il a pour but de fournir des termes permettant aux praticiens de relier différentes « choses » dans les activités de gestion de crise sous forme de données liées. Ce vocabulaire est axé sur la description d'un événement (tel qu'un risque naturel, une urgence) et des activités humanitaires par le biais de « Qui, Quoi, Où ». L'avantage principal de ce vocabulaire est la richesse pour la description de l'événement d'une catastrophe, leurs conséquences matérielles, et les dangers qui peuvent résulter d'une catastrophe. Son principal inconvénient est l'absence de concepts pour la description des différents intervenants dans la gestion des catastrophes. De plus, ce vocabulaire se concentre sur les activités humanitaires. Dans (Beneito-Montagut *et al.*, 2013), la plateforme web *Disaster 2.0* permet aux acteurs de déposer ou de rechercher des informations, des requêtes de besoins et de proposer des réponses. Les informations et les requêtes ajoutées sur cette plateforme sont stockées dans une ontologie. Cette ontologie est appelée *Dires*. L'avantage de cette ontologie est la définition du domaine de réponse à travers les ressources, les opérations, les victimes, les rôles, les types de catastrophe et les infrastructures. La limite de cette ontologie apparaît au niveau de la description des plans. L'ontologie *EPISECC* (EPISECC, 2016) a été développée dans OWL (*Web Ontology Language*) pour améliorer le partage

2. Site web du projet *Disaster*: <http://disaster-fp7.eu/node/5>

3. Spécification du vocabulaire MOAC : <http://observedchange.com/moac/ns/>

d'information par le biais d'un espace commun. Il s'agit d'une ontologie spatio-temporelle permettant de modéliser une image opérationnelle commune pour les premiers intervenants. Elle traite de l'interopérabilité pendant l'intervention. Elle a l'avantage de bien détailler les actions menées lors des interventions, mais est limitée en matière de description de plans et des rôles des différents intervenants. Les ontologies d'échange d'information destinées à faciliter la collaboration ont pour principal avantage de fournir un large vocabulaire pour décrire une situation de crise et les activités de réponse. Cependant, elles sont assez limitées en matière de concepts permettant de décrire les éléments d'un plan.

Parmi les ontologies visant à faciliter la planification en cas de catastrophe, *AKTiveSA* (Smart *et al.*, 2007) vise à représenter les opérations humanitaires et de secours pour les agences militaires. Dans ce contexte de catastrophe, les agences militaires doivent échanger leur connaissance avec les agences humanitaires. Pour représenter cette connaissance, l'ontologie *AKTiveSA*, exprimée en OWL, décrit les domaines de connaissances suivants : géographie, météorologie, activité, aide humanitaire, militaire, équipement, organisations, armes. L'avantage d'*AKTiveSA* est son haut niveau de description du vocabulaire avec une grande diversité pour chaque domaine de connaissances. Toutefois, cette ontologie possède peu de relations entre les différents concepts. L'ontologie *IsyCri* (Bénaben *et al.*, 2008) est un méta-modèle de gestion de crise défini en *OWL-DL* (*Ontology Web Language Description Logics*). Un méta-modèle est un modèle de modélisation : il définit la structure d'un ensemble de modèles conformes à une syntaxe et une sémantique donnée. Ce méta-modèle a été conçu pour recueillir des informations et des connaissances sur la gestion des crises dans un système de coordination de la réponse aux crises. Il vise à caractériser une crise pour coordonner le processus de réponse entre les partenaires hétérogènes. Cette ontologie présente l'avantage d'une description de haut niveau pour couvrir l'ensemble des concepts requis. Ainsi, un méta-modèle fournit une base pour la description d'une diversité des cas d'utilisation et pour un raisonnement générique sur des concepts de haut niveau. Un autre méta-modèle pour la gestion de catastrophe a été présenté par (Othman et Beydoun, 2013). Contrairement à *IsyCri*, ce méta-modèle n'a pas été créé pour un système en particulier mais pour représenter le domaine de gestion de catastrophe. C'est pourquoi, il réunit tous les concepts haut niveaux utilisés dans ce domaine (rôle, organisation, plan, service, tâches, etc.). Ce méta-modèle couvre donc plus largement que *IsyCri* le domaine de gestion de catastrophe. Cependant, les méta-modèles ont besoin d'être complétés afin de fournir des concepts plus bas niveau et plus spécifiques au cas d'application. La spécificité du système *SIADDEX* est l'aide à la décision dans la lutte contre les incendies de forêt (De la Asunción *et al.*, 2005). Il dispose d'un algorithme de surveillance qui suit en temps réel les changements en fonction de l'exécution du plan actuel. Cet algorithme met à jour l'ontologie et vérifie que l'exécution soit conforme à la prédiction afin de détecter un problème comme un échec d'exécution ou un retard inattendu et de fournir une solution par une re planification en fonction des circonstances du problème. Cette ontologie, appelée *BACAREX*, est une ontologie des objets de planification et des activités liées au plan de lutte contre les incendies de forêt. La limite de cette ontologie est son accent sur le

Tableau 1. Bilan sur les ontologies existantes par rapport aux principaux concepts de gestion de catastrophe requis pour la solution proposée

	Plan	Ressource	Tâche	Rôle	Organisation	Total
<i>EMERGEL</i>		X	X	X	X	4/5
<i>MOAC</i>		X	X			2/5
<i>Dires</i>		X	X	X	X	4/5
<i>EPISECC</i>		X	X		X	3/5
<i>AKTiveSA</i>		X	X		X	3/5
<i>IsyCri</i>	X	X	X			3/5
<i>BACAREX</i>	X	X	X			3/5
(Othman et Beydoun, 2013)	X		X	X	X	4/5

domaine de la lutte contre l'incendie qui limite le vocabulaire (pour un plan, les ressources, la description de la situation) à ce domaine.

Le [tableau 1](#) résume l'état de l'art des ontologies et vocabulaires pour la gestion de catastrophe. Cet état de l'art a permis d'identifier l'approche de (Othman et Beydoun, 2013) comme la plus complète pour la description des concepts de préparation de plan à haut niveau d'abstraction, c'est-à-dire en matière de concepts communs à des plans très divers. Les ontologies *EMERGEL* et *Dires* sont-elles très complètes en matière de concepts pour la description des éléments contenus dans un plan tels que les tâches et ressources pouvant intervenir dans l'application d'un plan. Parmi ces deux ontologies, l'ontologie *EMERGEL* a été retenue pour compléter les concepts haut-niveau de (Othman et Beydoun, 2013) en raison de sa conception liée aux symboles tactiques. Cet avantage facilite l'extraction de connaissances de plans tactiques correspondant à des cartes contenant les symboles tactiques. Ainsi, l'usage des concepts haut-niveau de (Othman et Beydoun, 2013) permet de représenter une grande diversité de plans basés sur une grande diversité de tâches, rôles, ressources dont les concepts sont décrits par l'ontologie *EMERGEL*.

## 2.2. Modélisation et génération de simulations multi-agents à base d'ontologies

Dans le cadre de la préparation de gestion de catastrophe, les simulations informatiques sont souvent utilisées pour optimiser divers plans de réponses et déterminer les tâches, les actions, ou les ressources les plus adaptées à une situation.

Parmi les approches existantes, celles basées sur les systèmes multi-agents sont les plus utilisées dans ce contexte pour simuler les comportements et interactions des intervenants (Mishra *et al.*, 2018). Il est à noter que les intervenants dans la gestion de catastrophe et leur comportement varient d'une localité à une autre. Ils varient également au sein de même localité en fonction de la situation de catastrophes et des besoins. La définition d'un modèle de simulation capable de s'adapter aux diverses organisations et planifications implique une variabilité des entités, de leurs comportements et de leurs interactions. Or, les approches de simulation multi-agents sont généralement créées par rapport à un objectif particulier ce qui limite leur réutilisation et explique le grand nombre de modèle dans ce domaine. Ainsi que cela est souligné par les auteurs de (Poveda *et al.*, 2015), le manque d'intérêt de partager ou connecter les travaux réalisés condamne les chercheurs de ce domaine à réinventer la roue en créant de nouveaux modèles de simulation et de nouvelles implémentations de ces modèles afin d'exécuter les simulations. Cependant, quelques travaux traitent de l'adaptation des simulations multi-agents pour la gestion de catastrophe.

Parmi ces approches, l'approche présentée par les auteurs de (Poveda *et al.*, 2015) présente un modèle général pour la conception de services de gestion des urgences dans des environnements intérieurs. Ce modèle est composé de trois couches : une couche sémantique, une couche de simulation et une couche contenant les composants de service d'urgence. Cette dernière est basée sur la couche simulation, qui doit être adaptée au contexte. Pour résoudre le problème de réutilisation et d'adaptation de divers contextes, Poveda *et al.* (2015) ont utilisé une couche sémantique composée de l'ontologie *EinSim* qui relie les données externes et guide la simulation sociale à base d'agent. L'utilisation d'une ontologie pour représenter le processus de simulation des situations d'urgence permet de modéliser les simulations indépendamment du modèle d'implémentation d'une simulation. Cet avantage offre une flexibilité dans l'extension et la réutilisation du modèle d'implémentation pour simuler une diversité de contexte. Un modèle d'implémentation est une représentation du code lisible par ordinateur. Cependant, cette ontologie étant spécialisée pour la simulation sociale dans un environnement intérieur n'est pas suffisamment générale pour la simulation de plans de gestion des catastrophes qui ne sont pas limités à un environnement intérieur. Contrairement, au contexte des plans d'urgence dans un environnement intérieur, la simulation de plans de gestion des catastrophes nécessite une représentation plus complexe avec la structure organisationnelle des acteurs, une gestion des ressources et une grande diversité de plans. Une autre approche intéressante de modélisation pour la préparation aux situations d'urgence en cas de catastrophe est présentée dans (Kruchten *et al.*, 2007). Les auteurs y présentent un modèle conceptuel (formalisé par une ontologie) des catastrophes affectant les infrastructures critiques (énergie, transport, communication, etc.). Un modèle conceptuel est une abstraction des caractéristiques essentielles du système étudié. Ce modèle conceptuel a l'avantage de représenter à un haut niveau d'abstraction les enjeux et principaux composants des plans de gestion de catastrophe en utilisant des concepts du paradigme agent. Ce modèle a été créé afin de fournir un langage commun pour communiquer, analyser et simuler les interdépendances des infrastructures critiques. La simulation de ces interdépendances vise à



détecter de potentiels problèmes dans les plans. Cet objectif explique le manque de description du modèle de simulation dans le sens où celui-ci ne permet pas de définir les variables et objectifs du modèle de simulation. En effet, ce modèle limite l'usage de la simulation à l'étude de problèmes potentiels dans les plans. Parmi les approches non spécifiques à la gestion de catastrophe, les travaux de (Boufedji *et al.*, 2017) présentent l'adoption de modèles de variabilité afin de décrire les aspects génériques et spécifiques d'un modèle de système multi-agent. Ces modèles sont respectivement reliés à l'implémentation de composants de systèmes multi-agents réutilisables, génériques et spécifiques. Bien que ces travaux ne traitent pas des aspects spécifiques à la modélisation de simulation (ex. variables du modèle, expérimentation), ils fournissent une méthode permettant de réutiliser des composants de systèmes multi-agents pour diverses applications représentées par divers modèles. Une autre approche intéressante non spécifique au domaine de gestion de catastrophe mais spécifique au domaine de la simulation multi-agent est présentée dans (Christley *et al.*, 2004). Ces travaux présentent une ontologie visant à automatiser les tâches de modélisation et de simulation à base d'agent. Cette ontologie décrit les différents modèles intervenant dans la conception de simulation (ex. modèle conceptuel, expérimental, programmé), les concepts de base du paradigme agent (ex. agent, environnement *i.e.* l'espace dans lequel les agents évoluent, action *i.e.* opération permettant à un agent d'interagir avec son environnement), ainsi que des concepts en lien avec les expérimentations de simulation (ex. données de simulation), et la programmation de la simulation nécessaire à son exécution (ex. programmation logicielle). Cette ontologie est adaptée à toute modélisation et conception de simulation multi-agents, quel que soit le domaine d'application. Elle offre un ensemble de concepts idéal pour la représentation de divers modèles de simulation, diverses expérimentations et leur développement sous forme de programme exécutable.

Le [tableau 2](#) résume l'étude des approches de simulation multi-agents pour l'adaptation de modèle. Cette étude a permis de montrer les avantages des ontologies pour la modélisation de simulation. En effet, la modélisation à travers une ontologie favorise la réutilisation du modèle de simulation ainsi que son interopérabilité. Dans la majorité des approches présentées, les éléments des modèles sont mis en relation avec des simulateurs ou composants de plateforme de simulation afin de produire les simulations correspondantes aux modèles. Parmi les ontologies étudiées, l'ontologie de (Christley *et al.*, 2004) offre le plus haut et le plus approprié niveau d'abstraction de modélisation de simulation multi-agent pour notre approche. Bien que ces approches facilitent le développement de simulations à travers une ontologie permettant d'accueillir une diversité de modèles de simulation, elles ne traitent pas le problème d'adaptation du modèle de simulation en fonction des connaissances de gestion de catastrophe. Cependant, les travaux de (Kruchten *et al.*, 2007) apportent un premier niveau de visualisation des relations entre les connaissances de gestion de catastrophe et la modélisation de simulation. En effet, les infrastructures et la population, généralement considérées comme les éléments à risque en cas de catastrophe, sont les principales cibles des actions menées par les agents.



Tableau 2. Bilan sur les ontologies existantes par rapport aux principaux concepts de simulation multi-agents requis pour la solution proposée

	Modèle	Agent	Environnement	Action	Total
<a href="#">Christley et al. (2004)</a>	X	X	X	X	4/4
<a href="#">Kruchten et al. (2007)</a>		X	X (Indirectement)	X	3/4
<a href="#">Poveda et al. (2015)</a>	X	X	X	X	4/4
<a href="#">Boufedji et al. (2017)</a>		X	X	X	3/4

### 2.3. Bilan

L'étude des ontologies pour la gestion de catastrophes, présentée dans la section 2.1, a permis d'identifier les travaux présentés par ([Othman et Beydoun, 2013](#)) ainsi que l'ontologie *EMERGEL* comme les plus adaptés pour modéliser les connaissances de gestion de catastrophe liées à la préparation. L'étude des approches visant à faciliter l'adaptation de simulation, section 2.2, a permis de montrer que l'usage d'une ontologie pour la modélisation de simulation a l'avantage de permettre d'automatiser le développement de simulation et fournit une forte interopérabilité. Cette étude a également permis d'identifier l'ontologie présentée par ([Christley et al., 2004](#)) comme la plus complète pour la modélisation de simulation. L'usage d'une ontologie à la fois pour la représentation des connaissances métiers de gestion de catastrophe et la modélisation de simulation permet de bénéficier des technologies du web sémantique pour l'adaptation de la modélisation de simulation par rapport aux connaissances de gestion de catastrophes ainsi que pour l'enrichissement des connaissances de gestion de catastrophe en fonction des résultats de simulation. Les approches existantes de simulation de gestion de catastrophe fournissent un modèle de simulation spécifique à une catégorie de plan. Cette spécificité est nécessaire pour fournir une réponse ou un plan adapté à la situation. Cependant, il n'y a pas d'approche permettant de créer un modèle spécifique en fonction de la description d'un plan. Afin de pallier cette limite, l'approche proposée dans cet article prend en entrée une représentation des connaissances métiers du domaine de gestion de catastrophe et pas un modèle de simulation multi-agent afin d'adapter le modèle en fonction du ou des plans à améliorer. Les principales contributions de cette approche sont (1) la conceptualisation automatique du modèle multi-agents de simulation par rapport à la description des connaissances métiers et (2) la programmation générative de simulation pour une exécution par la plateforme GAMA. Ces contributions utilisent une ontologie pour la gestion de catastrophe, basée sur les travaux de ([Othman et Beydoun, 2013](#) et [Casado et al., 2015](#)), ainsi qu'une ontologie pour la simulation multi-agent, basée sur les travaux de ([Christley et al., 2004](#)).

### 3. Méthode

Adapter une simulation aux divers scénarios pour optimiser les plans requiert de modifier la conception de la simulation pour chaque cas de figure. La grande diversité de cas de figure en gestion de catastrophe nécessite donc un grand nombre d'adaptations ne pouvant être effectuées manuellement. Cela requiert donc d'automatiser les changements de simulation. Une telle automatisation nécessite (1) la formalisation des connaissances sur les scénarios et plan de gestion de catastrophe, (2) l'utilisation de ces connaissances pour concevoir un modèle de simulation dans le paradigme multi-agent et (3) la génération d'une simulation basée sur ces connaissances. Les résultats des diverses simulations doivent ensuite être analysés pour permettre l'optimisation des plans. C'est pourquoi la solution proposée dans cet article est constituée :

1) de la formalisation dans une ontologie (appelée *SemDM* pour *Semantic Disaster Management*) des connaissances expertes sur les plans de gestion de catastrophe et sur les situations. Cette ontologie, présentée en section 3.1, se base sur les travaux de (Othman et Beydoun, 2013), l'ontologie *EMERGEL* (Casado et al., 2015), et *GeoSPARQL* (Perry et Herring, 2011) pour représenter les connaissances spatiales ;

2) de la formalisation dans une ontologie (appelée *SemMAS* pour *Semantic Multi-agent Simulation*) des modèles de simulation multi-agents. Cette ontologie, qui se base sur les travaux de (Christley et al., 2004), est instanciée par des requêtes *SPARQL* (Prud'hommeaux et Seaborne, 2008) et présentée en section 3.2 ;

3) de la génération automatique de simulation adaptée aux connaissances sur le modèle de simulation multi-agent, présentée en section 3.3.

Enfin, les résultats sont analysés dans l'optique d'optimiser les plans et ainsi d'enrichir les connaissances de gestion de catastrophe. Les enrichissements et optimisations des plans permettent d'itérer de nouveau les étapes (1), (2) et (3) pour vérifier et optimiser davantage les plans. Ce mécanisme d'analyse, d'enrichissement des connaissances et d'itération constitue un cercle vertueux présenté plus en détail en section 3.4. La [figure 1](#) présente une vue d'ensemble du cercle vertueux. Les processus et composants intervenant dans ce cercle vertueux sont regroupés en trois grandes étapes :

- L'ontologie de gestion de catastrophe (*SemDM*) instanciée par l'intégration des connaissances métiers construites à partir des données (processus 1 de la [figure 1](#)).

- La modélisation et conception de simulation (processus 2 et 3 de la [figure 1](#), utilisant l'ontologie *SemMAS*)

- L'analyse des simulations pour enrichir la base de connaissances (processus 4 et 5 de la [figure 1](#)).

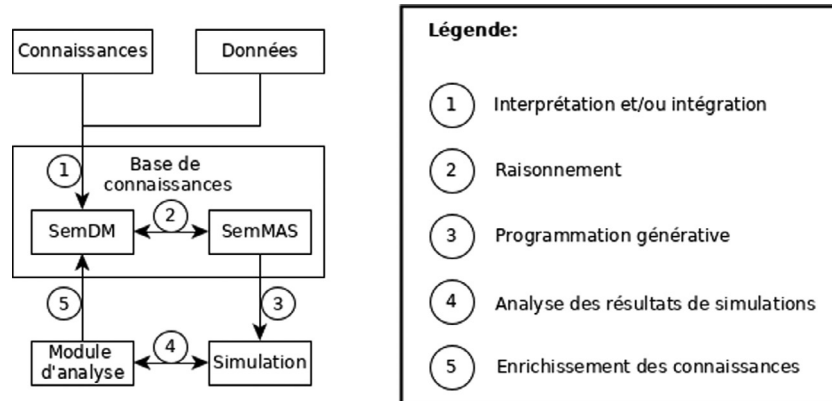


Figure 1. Vue d'ensemble du cycle vertueux

### 3.1. Représentation et construction des connaissances de gestion de catastrophe

La gestion de catastrophe se base sur les connaissances expertes, la préparation de plans et les informations sur les ressources et capacités de chaque intervenant. Afin de formaliser toutes ces connaissances, notre système propose une ontologie représentant le domaine de la gestion de catastrophe, appelée *SemDM*. Les principaux concepts de cette ontologie et leurs relations (*Service, Plan, Organisation, Action, etc.*) sont illustrés figure 2<sup>4</sup> et ont été présentés dans (Prudhomme *et al.*, 2019b). Cette ontologie utilise les concepts de (Othman et Beydoun, 2013) et permet la définition des connaissances et plans préparés pour gérer une catastrophe. Ces plans dépendant des événements et de la situation géospatiale, les informations à leur sujet sont essentielles. Ainsi, il est nécessaire d'intégrer et structurer ces informations sous forme de connaissances dans l'ontologie.

Le processus de traitement des données hétérogènes géospatiales pour extraire des connaissances est automatique. Ce processus est basé sur l'approche de (Prudhomme *et al.*, 2019a) qui correspond à l'extension de l'approche (Prudhomme *et al.*, 2017). Celui-ci permet d'interpréter sémantiquement divers types de données géospatiales sous forme de tableaux tels que les fichiers vecteurs (*Shapefile*) ou *csv*. Ce traitement combine l'usage de traitement du langage naturel, des outils de gestion de données géospatiales (tels que *Google Map*) et des technologies du web sémantique afin d'interpréter les données. L'objectif de cette approche est de déterminer le concept représentant les données à partir de la comparaison des géométries contenues dans les données avec celles présentes sur le web. Les en-têtes de colonne ainsi que le contenu des cellules du tableau sont également interprétés afin d'identifier des concepts et individus existants dans le web sémantique.

4. Les préfixes utilisés dans la figure 2 correspondent aux URI: `ogc` : `<http://www.opengis.net/ont/geosparql#>`, `xsd` : `<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>`, et `semDM` : `<http://www.semgiis.de/semDM#>`.

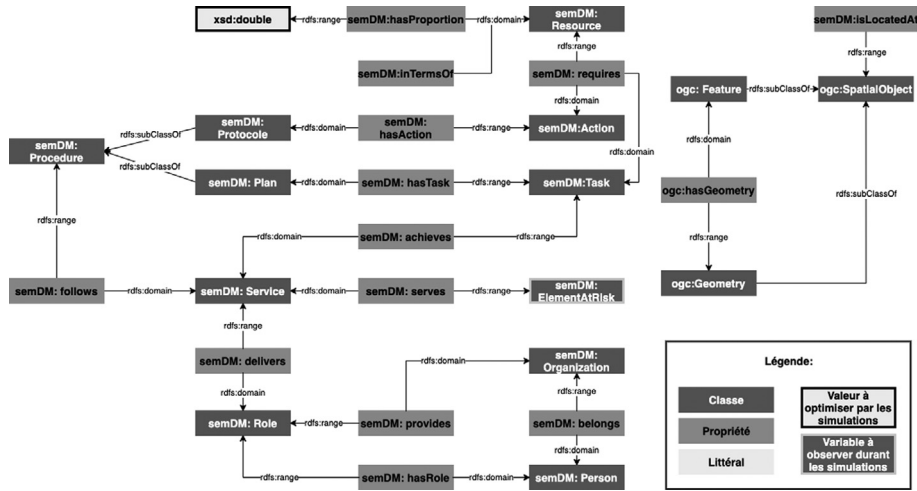


Figure 2. Base terminologique<sup>5</sup> de l'ontologie SemDM

osm_id	name	highway	railway
8043441	Route de Châtillon	primary	
75279144	Ligne PLM de Paris à Lyon		rail

Figure 3. Exemple de données à traiter pour construire des connaissances

5. La base terminologique, aussi appelée TBox, regroupe la terminologie permettant de définir les concepts et relations sur lesquels se base la définition d'individus et de faits regroupés dans la base assertionnelle, aussi appelée ABox.

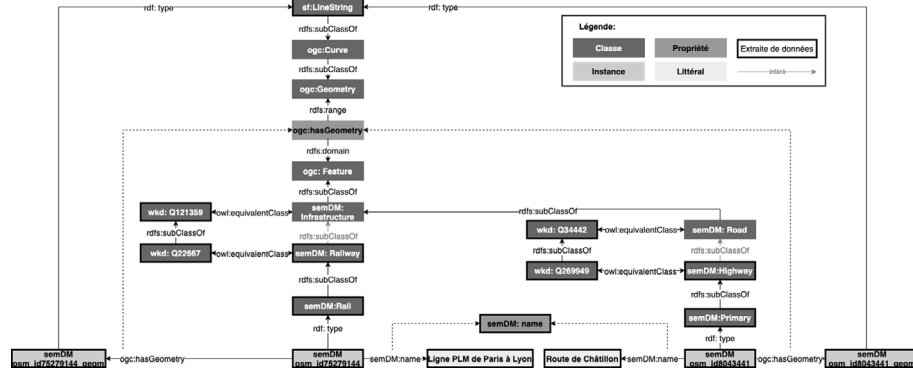


Figure 4. Illustration des connaissances construites à partir de l'exemple de données (figure 3), et intégrées à l'ontologie *SemDM*

La figure 3 illustre un exemple de données et la figure 4 illustre l'intégration des connaissances construites à partir de cet exemple de données.

Les connaissances construites sont intégrées dans l'ontologie *SemDM*. L'inférence basée sur l'axiomatique de l'ontologie *SemDM*, déduit les relations entre les connaissances construites à partir des données et les classes de *SemDM*, grâce à la définition de liens (*mapping*) avec les concepts de *Wikidata* (identifiés avec le préfixe « wkd » dans la figure 4). La figure 4 souligne les relations inférées pour l'exemple de données précédemment présenté. Les connaissances construites sont manipulables en utilisant des requêtes *GeoSPARQL*.

### 3.2. Formalisation des connaissances de simulation multi-agent

Afin de simuler divers scénarios et plans, il est nécessaire de générer des modèles de simulation en fonction des connaissances sur les plans et scénarios, intégrées dans l'ontologie *SemDM*.

D'une part, ces différents modèles de simulation reposent sur le paradigme agent représenté par un ensemble de concepts tels que Agents, Artefacts, et Environnement. D'autre part, ils dépendent également de la plateforme de simulation utilisée pour leur exécution. Dans cette approche, la plateforme GAMA (Taillandier *et al.*, 2019) a été choisie pour exécuter les expériences de simulation en raison de sa capacité à créer un environnement basé sur des données géographiques réelles. Cette plateforme utilise son propre langage GAML basé sur le langage de programmation Java. Les agents dans le langage GAML sont spécifiés par leur espèce (*Species*), qui ont un ensemble d'attributs, d'actions, et de réflexes (*Reflex*) (Taillandier *et al.*, 2019). Toute espèce peut être imbriquée dans une autre espèce et peut aussi hériter des propriétés d'une autre espèce. De même, tout modèle est imbriqué dans une expérience. Dans le langage GAML, le modèle et l'expérience sont des catégories d'espèces « spécialisées ». Les concepts du paradigme agent sont liés aux concepts spécifiques de la plateforme d'exécution de simulation.

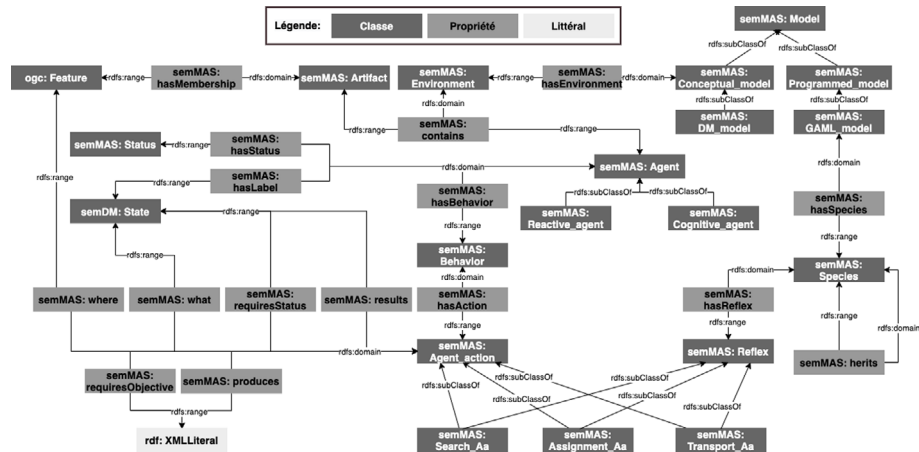


Figure 5. Principaux concepts de la base terminologique de l'ontologie SemMAS, utilisés pour la preuve de concept

Les spécificités de chaque modèle dépendent des connaissances sur les situations et des plans décrits dans *SemDM*. Elles dépendent aussi bien de connaissances sur le nombre et la répartition d'acteurs tels que des pompiers et médecins, que de leur description telle que la distinction entre un médecin et un chirurgien ou un pompier volontaire, et un pompier professionnel. Les concepts du paradigme agent ainsi que ceux propres à la plateforme d'exécution choisie sont définis dans une ontologie appelée *SemMAS*, inspirée de l'ontologie de (Christley *et al.*, 2004). La figure 5 illustre les principaux concepts de la base terminologique de l'ontologie *SemMAS* pour la modélisation de simulation répartis en deux groupes : (1) le modèle conceptuel basé sur les concepts du paradigme agent et (2) le modèle d'implémentation propre à la plateforme de simulation utilisée.

Nous proposons ensuite d'intégrer dans *SemMAS*, les connaissances de simulation multi-agents liées aux spécificités des situations et des plans décrits dans *SemDM*. Ces spécificités sont intégrées sous forme d'instanciation du modèle conceptuel et du modèle d'implémentation propre à la plateforme de simulation. Cette instanciation est réalisée à l'aide d'un ensemble de requêtes SPARQL CONSTRUCT qui récupèrent les connaissances de gestion de catastrophe afin d'instancier le modèle conceptuel et le modèle d'implémentation de l'ontologie *SemMAS*. Une partie des relations entre les concepts de l'ontologie *SemDM* et *SemMAS* ont été décrites dans (Prudhomme *et al.*, 2019b).

### 3.3. Génération automatique de simulation

Enfin, notre approche de simulation générative exploite les instances du modèle d'implémentation, afin de produire le programme de simulation dans le langage de la plateforme de simulation choisie.

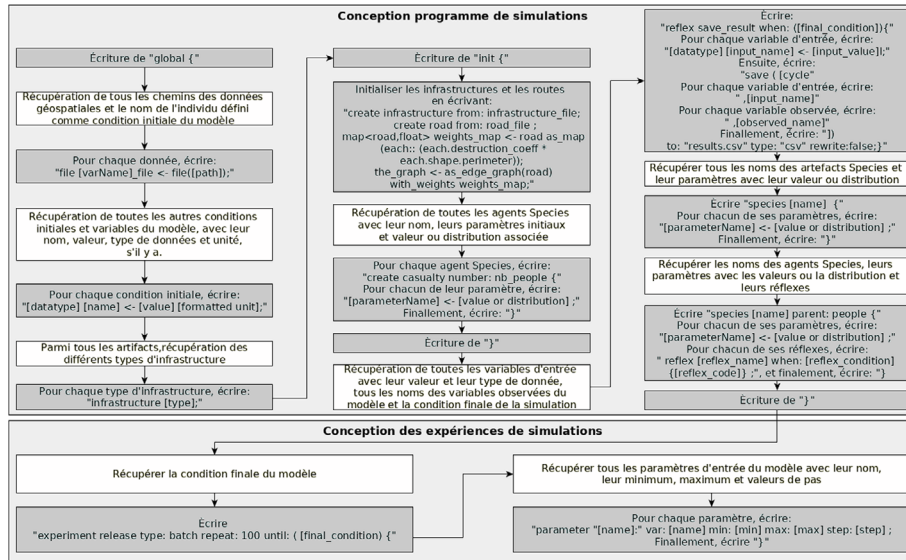


Figure 6. Principales étapes du processus de programmation générative, utilisant des actions de récupération par le biais de requêtes SPARQL (sur fond blanc) et des actions d'écriture (sur fond gris)

Ce processus de programmation générative suit la structure linéaire de la programmation en *GAML* composée : 1) d'un en-tête de modèle avec son nom, 2) d'une partie *globale*, qui est une espèce particulière représentant le monde des espèces, 3) de la définition des espèces courantes représentant les agents avec leurs attributs, actions, et réflexes, et 4) de la définition des expériences.

Le programme de simulation est conçu à partir du contenu de *SemMAS*. Comme présenté dans la section 3.2, *SemMAS* contient toutes les informations relatives à la programmation en *GAML*.

Le processus de programmation générative utilise *SPARQL* pour récupérer les différentes informations liées à la programmation *GAML* dans un ordre spécifique pour, ensuite, écrire le programme de simulation. La figure 6 illustre ce processus de programmation générative. Le programme de simulation généré est par la suite exécuté par la plateforme *GAMA*<sup>6</sup>.

6. Présentation du langage *GAML* utilisé par la plateforme *GAMA*: <https://gama-platform.github.io/wiki/Home>



### 3.4. Analyse des résultats de simulation et enrichissement de l'ontologie *SemDM*

Le programme de simulation permet ainsi l'exécution des plans dans lesquels les connaissances non définies sont considérées comme les variables dont nous souhaitons étudier l'impact sur la résolution des objectifs du plan. Ces variables, par exemple le nombre de médecins d'astreinte à l'hôpital, correspondent aux points de prise de décision lors de l'application des plans. Elles sont identifiées par l'absence de valeur associée à leur instance dans le modèle de gestion de catastrophe et visent à être optimisées. Le module d'analyse présenté dans la [figure 1](#), permet d'optimiser ces variables étudiées et d'enrichir l'ontologie *SemDM* à partir des valeurs optimales identifiées pour chacune des variables étudiées. L'optimisation des variables se base sur une analyse de sensibilité qui permet de discriminer leur importance sur l'ensemble du plan et de produire in fine des améliorations de plans. Cette discrimination est réalisée par l'analyse automatique des résultats d'expérimentation, visant à déterminer les valeurs optimales des variables étudiées. L'optimalité de ces variables est inversement proportionnelle à la valeur des variables observées liées aux éléments à risques définis dans *SemDM* tels que le nombre de morts lié aux victimes. Par exemple, chercher à optimiser le nombre de médecins d'astreinte à l'hôpital par rapport à un nombre de victimes, revient à minimiser le nombre de morts et le nombre de médecins. Dans cet exemple, l'optimisation correspond à sauver le plus de victimes (*i.e.* minimiser le nombre de morts) avec un minimum d'effectif.

La production de connaissances se base sur la relation entre les valeurs optimales des variables étudiées et les autres variables observées de la simulation constituant la configuration de la simulation. Dans le cas où une valeur optimale reste constante quelle que soit la configuration de la simulation, cela produit des triplets RDF (*Resource Description Framework*) (Pan, 2009) (sujet, prédicat, objet) permettant de représenter cette observation. Dans le cas où une valeur optimale varie en fonction de la configuration de simulation, cela se traduit par une connaissance exprimée sous forme d'équation paramétrique. La connaissance sous forme d'équation paramétrique permet de définir une valeur optimale en fonction d'autres valeurs. Ces équations sont prises en charge par des *built-ins SPARQL*, utilisés dans des règles SHACL (*Shapes Constraint Language*) (Knublauch et Kontokostas, 2017) basées sur SPARQL. Par exemple, la valeur optimale de la répartition de médecins entre le poste médical avancé et l'hôpital peut être définie en fonction du nombre de victimes. L'analyse de sensibilité entre le nombre de victimes fournit en entrée et la valeur optimale de médecins à l'hôpital en sortie a pour objectif d'identifier l'équation paramétrique permettant (lorsque cela est possible) d'approximer la valeur optimale de médecins à l'hôpital en fonction du nombre de victimes. Elle permet ainsi de tirer des conclusions sur les simulations en créant des règles à base d'équations permettant d'enrichir l'ontologie *SemDM* et d'améliorer les plans préparés automatiquement.

Dans le cas où les expériences de simulation menées n'ont pas permis de définir la valeur optimale de certaines variables étudiées, le cycle vertueux est exécuté de nouveau. Dans cette nouvelle itération, seules les variables pour lesquelles la valeur optimale n'a pas été identifiée, resteront des variables étudiées. La valeur optimale des

autres variables ayant été identifiées et ajoutées à l'ontologie *SemDM*, elles ne seront plus considérées comme des variables étudiées. Ces nouvelles itérations d'expériences permettent d'affiner les observations et tirer des conclusions progressivement.

#### 4. Preuve de concept

La preuve de concept de cette méthode a été appliquée sur une version simplifiée du plan français NOVI de gestion de catastrophes en cas de victimes nombreuses. Les données utilisées ne sont pas les données officielles. Ce cas d'étude a été créé à titre d'exemple afin d'illustrer l'approche et ne constitue pas une simulation officielle. Celui-ci est décrit dans la première sous-section. La seconde sous-section présente sa modélisation dans le domaine de gestion de catastrophes, puis le modèle multi-agent de simulation correspondant. Le modèle conceptuel multi-agent résulte de l'interprétation automatique du modèle de gestion de catastrophes. Le modèle conceptuel multi-agent a l'avantage d'être indépendant de toute plateforme, ce qui permet de le partager et d'utiliser la plateforme souhaitée pour exécuter la simulation. Cependant, l'exécution de la simulation requiert un modèle d'implémentation correspondant au modèle conceptuel et à la plateforme choisie. Enfin, la dernière sous-section présente les résultats de la simulation et l'enrichissement de l'ontologie *SemDM* résultant de l'application de la méthode.

##### 4.1. Description du cas d'étude

###### 4.1.1. Le plan étudié

Le cas d'étude concerne le plan français national, appelé plan *NOVI*, visant à gérer un grand nombre de victimes (plus de 100 victimes). La [figure 7](#) illustre ce plan. Ce plan est basé sur un système de triage des victimes visant à optimiser leur gestion. Il consiste à définir un poste médical avancé à la fois proche de la catastrophe et proche des routes pour un accès rapide aux secours. Ce poste médical avancé est un point intermédiaire entre la zone de catastrophe (parfois également appelée zone de danger) et l'hôpital, cela peut être un bâtiment existant ou un système modulaire (ex. tentes). Il vise à trier les victimes afin de les répartir de manière adaptée dans les hôpitaux et éviter une surcharge d'un hôpital qui pourrait dégrader la prise en charge des victimes.



Figure 7. Illustration du plan NOVI

Les sauveteurs (ex. les pompiers) ou autres intervenants dans la gestion de catastrophe (ex. la police ou le groupe d'intervention de la gendarmerie nationale en cas de terrorisme) habilités à intervenir sur la zone de catastrophe ont pour objectif de secourir les victimes, ce qui consiste à rechercher, identifier et évacuer les victimes de la zone de danger avant leur brancardage vers le poste médical avancé, appelé *Petite Noria* (Préfecture des Landes, 2012). Dans le cas de nombreuses victimes hors terrorisme, le ramassage est généralement effectué par les pompiers qui appliquent le plan multi-victime. Afin de rester sur un exemple simple pour ce cas d'étude, cette étape a été simplifiée en 3 sous-étapes : la recherche, l'étiquetage et le transport de victimes au poste médical avancé. Les victimes acheminées au poste médical avancé y reçoivent des premiers soins de stabilisation et sont de nouveau triées afin d'être évacuées vers un hôpital. L'évacuation des victimes vers l'établissement de soins le plus adapté après régulation par le SAMU (Service d'aide médicale urgente) est appelée *Grande Noria* (Préfecture des Landes, 2012).

#### 4.1.2. Données et informations du cas d'étude

Le cas d'étude consiste à optimiser le plan NOVI dans la ville de Montbard. Ce cas d'étude a donc requis le traitement des données géospatiales de la ville telles que celles représentant les routes et les bâtiments. Les connaissances construites à partir des données géospatiales sont ensuite utilisées afin de générer les données d'entrée requises par le modèle de simulation. L'instanciation du modèle d'implémentation dans l'ontologie *SemMAS* permet d'identifier les éléments ayant une composante géospatiale, nécessaires à l'élaboration de l'environnement. Puis, un processus crée les données requises pour la simulation à partir de leur représentation dans l'ontologie. Les informations intégrées dans le cadre de la gestion de catastrophe sont les effectifs des pompiers (24), des médecins (10) et des ambulances (4).

## 4.2. Génération de l'implémentation et expériences de simulation

La génération des simulations est basée sur les connaissances de gestion de catastrophe contenues dans l'ontologie *SemDM*, représentant le plan NOVI. Ce plan *NOVI* est représenté dans l'ontologie *SemDM* comme étant composé de trois tâches : la *Petite Noria*, la gestion du poste médical avancé et la *Grande Noria*. Prenons l'exemple de la tâche *Petite Noria* de l'ontologie *SemDM* afin d'illustrer la méthode précédemment présentée. Cette tâche est réalisée par le service de *Petite Noria* fournit par les pompiers. La [figure 8](#) représente ce service dans l'ontologie *SemDM*.

### 4.2.1. Du modèle de gestion de catastrophe au modèle d'implémentation de simulation

Ces connaissances sont ensuite traitées pour instancier les modèles de simulation représentés dans l'ontologie *SemMAS* à travers des requêtes *SPARQL CONSTRUCT*. Ces requêtes expriment tout d'abord la relation entre les concepts du modèle conceptuel

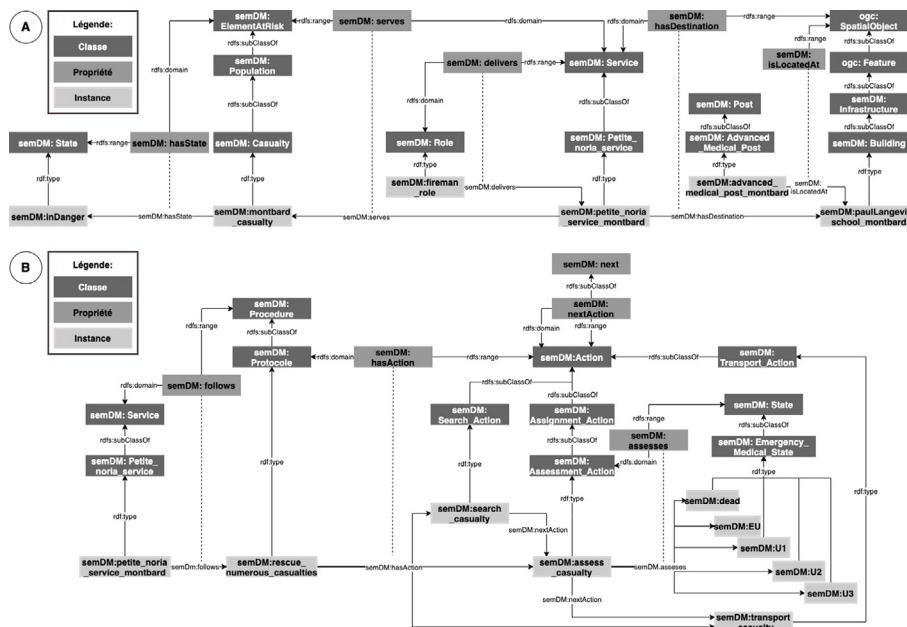


Figure 8. Illustration du contenu de l'ontologie SemDM représentant la gestion de catastrophe décomposée en deux parties (A et B), toutes deux basées sur le service Petite Noria

de simulation (dans *SemMAS*) par rapport aux concepts de gestion de catastrophe (dans *SemDM*) tel que présenté dans (Prudhomme *et al.*, 2019b). Puis, elles représentent la relation entre les concepts du modèle d'implémentation de simulation (dans *SemMAS*) par rapport aux concepts du modèle conceptuel de simulation. Cette relation a été définie par rapport à la documentation des concepts de *GAML*<sup>7</sup>. La figure 9 illustre l'instanciation des modèles multi-agents par rapport à la portion du plan *NOVI* représentée dans la figure 3.

Dans cet exemple, le rôle de pompier, tel que décrit en gestion de catastrophe, est traduit par la création d'un agent de type espèce (*Species*) en *GAML*, appelé pompier. Cet agent possède les capacités (ensemble d'actions possibles) correspondant aux tâches que peut accomplir un pompier en cas de catastrophe. Chacune de ses capacités repose sur des actions d'agent ou *Reflex* en *GAML* déjà implémentés. L'instanciation des concepts de simulation multi-agents de l'ontologie *SemMAS* permet ainsi de générer le code de simulation dynamiquement. L'application du processus de génération de code présenté dans la figure 6 pour ce cas d'étude aboutit au modèle de simulation présenté dans la figure 10.

7. Documentation: <https://gama-platform.github.io/wiki/Home>



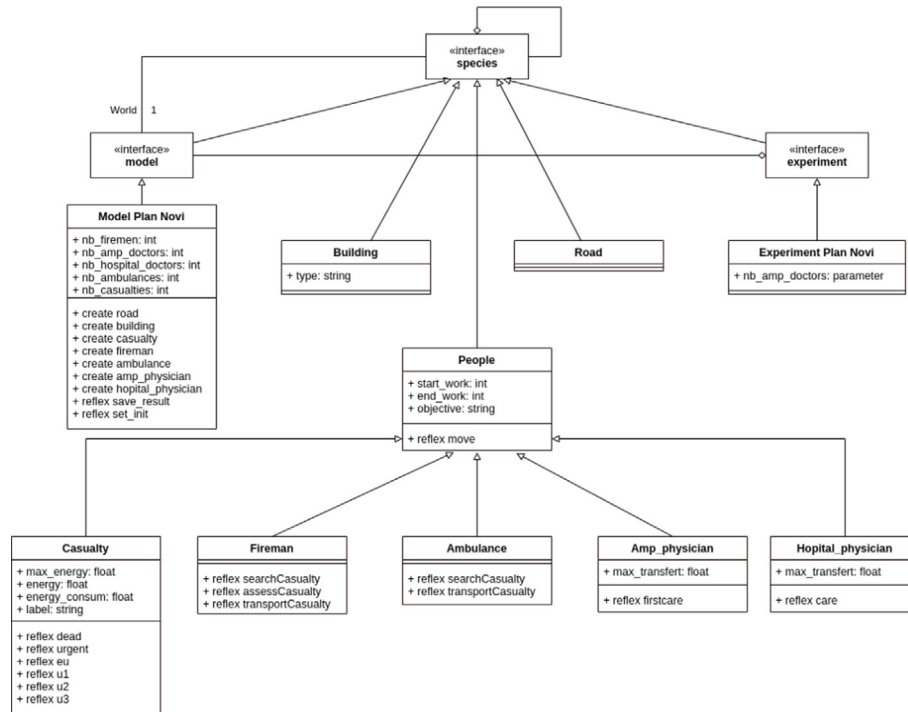


Figure 10. Modèle UML de simulation

La capacité de la salle Paul Éluard étant de 750 personnes, le nombre de victimes a été fixé en proportion de sa capacité, soit une configuration correspondant à un tiers de sa capacité (250 victimes), une configuration correspondant à deux tiers de sa capacité (500 victimes), et une configuration correspondant à sa capacité totale (750 victimes). Pour chacune de ces configurations, la répartition de victimes parmi les différents échelons d'urgence a été tirée aléatoirement. La répartition des médecins entre le poste médical avancé et l'hôpital a été étudiée en pourcentage avec une définition de configuration tous les 10 %. Cent expérimentations ont été exécutées pour chaque combinaison des configurations de victimes et de médecins. La figure 11 présente la visualisation d'une de ces expérimentations.

#### 4.3. Résultats

La première partie présente les résultats des expérimentations de simulations. Puis, ces résultats sont analysés afin de produire de nouvelles connaissances permettant d'enrichir la base de connaissances. Les nouvelles connaissances résultant de ce cas d'étude sont présentées dans la seconde partie.



Figure 11. Vue d'une simulation du cas d'étude du plan NOVI sur Montbard

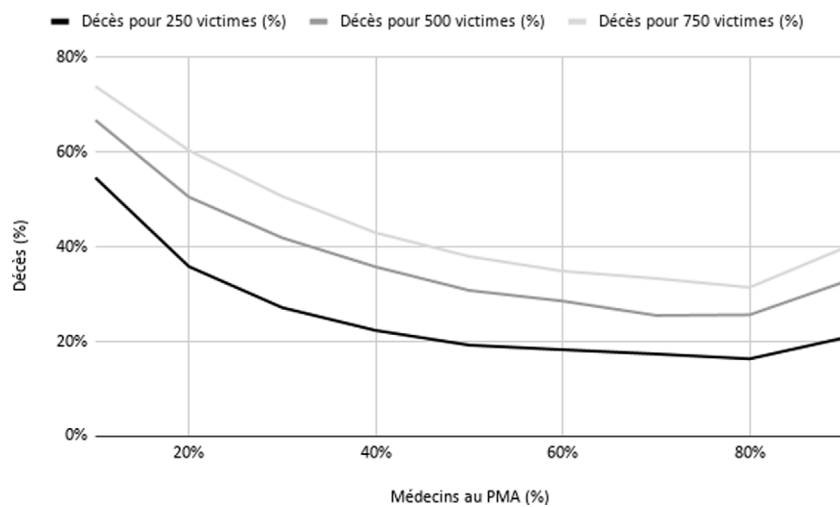


Figure 12. Graphique représentant le pourcentage de décès en fonction du pourcentage de médecins au poste médical avancé du premier cas d'étude

#### 4.3.1. Résultats des expérimentations

Les simulations ont permis d'observer l'impact de la proportion des médecins assignés au poste médical avancé. Le graphique de la figure 12 illustre les résultats obtenus par les simulations en matière de décès en fonction de la proportion des



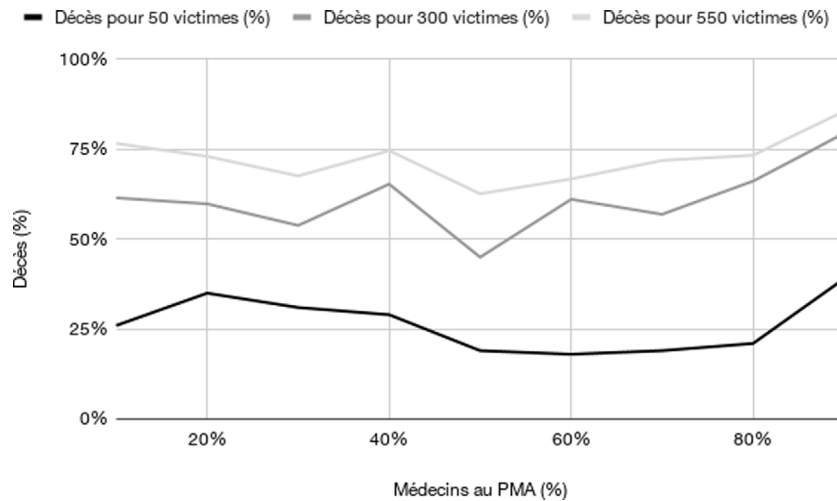


Figure 13. Graphique représentant le pourcentage de décès en fonction du pourcentage de médecins au poste médical avancé du second cas d'étude

médecins assignés au poste médical avancé. Chacune de ces valeurs est exprimée en pourcentage et correspond à la moyenne des résultats obtenus pour les cent simulations. Le graphique représente trois courbes, une pour chaque configuration du nombre de victimes (250, 500, et 750 victimes). L'observation de ces trois courbes montre que plus le nombre de victimes est grand, plus le nombre de décès l'est également. Cette évolution naturelle traduit le manque d'effectif des médecins par rapport à la quantité de victimes.

Dans chacune des configurations de victimes, la proportion optimale de médecins assignés au poste médical avancé est de 80 %. Une seconde expérimentation de la méthode a été appliquée sur un cas d'étude similaire, c'est-à-dire sur l'application du plan NOVI, mais dans un autre contexte (une autre ville, et donc d'autres données en entrées). La figure 13 illustre les résultats obtenus par les simulations de ce second cas d'étude dans trois configurations du nombre de victimes : 50, 300 et 550.

Pour ce second cas d'étude, dans la configuration de 50 victimes, la proportion optimale de médecins assignés au poste médical avancé est de 60 %. En revanche, dans les configurations de 300 et 550 victimes, la proportion optimale de médecins est de 50 %. Ces résultats s'expliquent par la modélisation d'un traitement des victimes plus long à l'hôpital qu'au poste médical avancé, mais plus critique au poste médical avancé qu'à l'hôpital. Ainsi, dans la configuration avec un nombre de victimes minimum (50), l'aspect critique du traitement au poste médical avancé est mis en avant, alors que lors du traitement d'un grand nombre de victimes (plus de 300), le traitement long à l'hôpital aboutit à un niveau aussi critique que le traitement au poste médical avancé.

Tableau 3. Triplets RDF créés suite à l'étude des valeurs optimales des variables étudiées (fond blanc) reposant sur les triplets de l'ontologie SemDM (fond gris)

Sujet	Prédicat	Objet
semDM: AmpManagement	rdfs:subClassOf	semDM: Task
semDM: physician	rdf:type	semDM: Role
semDM:am1_montbard	rdf:type	semDM: AmpManagement
semDM:am1_montbard	semDM:requires	semDM: r1_montbard
semDM: r1_montbard	rdf:type	semDM: Resource
semDM: r1_montbard	semDM: inTermsOf	semDM: physician
semDM: r1_montbard	semDM: hasProportion	"0.8"^^xsd:double

#### 4.3.2. Connaissances enrichissant la base de connaissances

L'analyse des résultats précédemment présentés permet d'enrichir l'ontologie *SemDM*. Pour le premier cas d'étude sur la ville de Montbard, le résultat de la proportion optimale de médecins assignés au poste médical avancé ayant montré une constance de valeurs pour chaque configuration de victimes, permet d'enrichir l'ontologie *SemDM* par l'ajout de triplets RDF traduisant le besoin d'envoyer 80 % des médecins au poste médical avancé. Les triplets RDF ajoutés sont présentés dans le [tableau 3](#)<sup>8</sup>.

Pour le second cas d'étude, les résultats montrent une constance de valeurs dans deux configurations successives sur trois (configurations de 300 et 550 victimes). Ces résultats permettent d'enrichir l'ontologie *SemDM* par la règle logique présentée par l'équation (1). Cette règle est représentée dans le formalisme de la logique mathématique pour faciliter sa compréhension et correspond à une règle SHACL basée sur SPARQL. Elle permet d'assigner un besoin de 50 % (en matière de quantité de médecins) au poste médical avancé lors d'une catastrophe ayant engendrée un nombre de victimes (*nbc*) compris entre 300 et 550 (inclus). La classe *Casualty* est une sous-classe de la classe *ElementAtRisk*, telle qu'illustrée dans la [figure 8](#).

8. Les préfixes utilisés dans le tableau sont les suivants: - rdf : <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>, RDF (Pan, 2009), - rdfs : <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>, RDF Schema (Brickley et Guha, 2014), - xsd : <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>, - semDM : <http://www.semgis.de/semDM#>.

$$\begin{aligned}
& semDM : Casualty(?c) \wedge semDM : AmpManagement(?am) \\
& semDM : hasQuantity(?c, ?nbc) \wedge greaterEqThan(?nbc, 300) \\
& lowerEqThan(?nbc, 550) ?semDM : Resource(?r) \\
& semdDM : requires(?am, ?r) \wedge semdDM : hasProportion(?r, 0.5) \\
& semdDM : inTermsOf(?r, semDM : physician)
\end{aligned} \tag{1}$$

Les résultats, montrant une variation de valeur optimale dans la configuration de 50 victimes comparée à la configuration de 300 victimes, nous définissons manuellement une équation paramétrique permettant d'approximer la valeur optimale pour l'intervalle de victimes de 50 à 300 (inclus). L'équation paramétrique utilisée dans cet exemple est une interpolation linéaire. Afin de pouvoir utiliser cette équation paramétrique pour approximer la valeur optimale de médecins en fonction des victimes, nous avons créé une extension de fonctionnalité de *SPARQL*, appelée un *built-in*. Nous avons ensuite configuré l'équation paramétrique en fonction des résultats de simulations obtenus. Dans ce contexte le *built-in* prend les 5 valeurs suivantes en paramètre :  $x$ , le nombre de victimes de la catastrophe;  $vv0$ , le nombre minimal de victimes (ici 50) ;  $vv1$ , le nombre maximal de victimes (ici 300) ;  $vp0$ , le pourcentage de médecins associé au nombre minimal de victimes (ici 0,6) ; et  $vp1$ , le pourcentage de médecins associé au nombre maximal de victimes (ici 0,5). Les valeurs de ces paramètres sont définies par rapport aux valeurs optimales obtenus dans les diverses configurations de victimes. Dans le cas d'étude présenté ici, les valeurs des paramètres correspondent à celles présentées dans la [figure 13](#) pour l'intervalle d'un nombre de victimes compris entre 50 et 300. À partir de ces valeurs de paramètres le *built-in*, appelé *LinearInterpo*, calcule une estimation de la proportion de médecins adaptée au nombre de victimes, lorsque celui-ci est compris entre 50 et 300 (exclus). L'équation (2) présente le calcul de cette estimation à travers la fonction  $f(t)$ , où  $t = (x-vv0)/(vv1-vv0)$ .

$$f(t) = (1 - t) \cdot vp0 + t \cdot vp1 \tag{2}$$

Basée sur ce *built-in*, l'ontologie *SemDM* est enrichie de la règle logique présentée dans l'équation (3). Cette règle logique permet d'assigner un besoin en matière de quantité de médecins (exprimée en pourcentage) requis au poste médical avancé. Cette règle s'applique lors d'une catastrophe ayant engendrée un nombre de victimes compris entre 50 (inclus) et 300 (exclus). Ce besoin est estimé par la fonction d'interpolation linéaire précédemment expliquée.

$$\begin{aligned}
& semDM : Casualty(?c) \wedge semDM : AmpManagement(?am) \\
& semDM : hasQuantity(?c, ?nbc) \wedge greaterEqThan(?nbc, 50) \\
& lowerThan(?nbc, 300) \\
& \rightarrow semDM : Resource(?r) \wedge semdDM : requires(?am, ?r) \\
& semdDM : hasProportion(?r, spbi : LinearInterpo(?nbc, 50, 300, 0.6, 0.5)) \\
& semdDM : inTermsOf(?r, semDM : physician)
\end{aligned} \tag{3}$$

L'enrichissement de l'ontologie *SemDM* par ces faits et règles logiques permet de définir les valeurs optimales d'un paramètre dans une situation donnée. Dans le cas de divers paramètres à optimiser, l'enrichissement des connaissances se fait progressivement en optimisant tout d'abord les paramètres ayant le plus fort impact sur la simulation. Les paramètres ayant été optimisés ne sont ensuite plus considérés comme des paramètres puisque leur valeur a été définie par la valeur optimale. Ainsi, une nouvelle simulation est exécutée avec les paramètres restants, et ce, de manière récursive jusqu'à ce que tous les paramètres aient été optimisés. Une fois, l'ontologie *SemDM* enrichie par les valeurs optimales de paramètres, elle peut être utilisée lors de la réponse à une catastrophe pour aider à la décision lors de l'application des plans. Prenons par exemple, le cas d'une catastrophe similaire au second cas d'étude engendrant 200 victimes. L'ajout d'une instance de la classe *Casualty* ayant la valeur 200 associée à sa propriété *hasQuantity*, suivi d'une inférence basée sur le système de règles définies précédemment, permet de définir la proportion en matière de médecin associée à la gestion du poste médical avancé. Dans ce cas, l'exécution de la règle présentée dans l'équation (3) associerait la valeur 0,54 comme proportion de médecins requis au poste médical avancé. Cette valeur pourrait ainsi, être fournie à la communauté de gestion de catastrophe et soutenir leur prise de décision en interrogeant l'ontologie *SemDM*.

## 5. Conclusion

Cet article présente une approche de génération automatique d'expérimentations de simulation basée sur les connaissances de gestion de catastrophes visant à améliorer les plans d'actions et la préparation à la gestion de catastrophe. Les principales contributions de cette approche sont (1) la conceptualisation automatique du modèle multi-agent de simulation par rapport à la description des connaissances métiers et (2) la programmation générative de simulation pour une exécution par la plateforme *GAMA*. De plus, contrairement aux approches d'optimisation généralement utilisées pour fournir la réponse optimale à un problème ou une situation, l'approche présentée fournit un enrichissement des plans par les valeurs optimales en fonction de la situation de catastrophe. Cette approche permet ainsi de constituer une base de connaissances à l'issue de la préparation offrant un support d'aide à la décision pendant la réponse à une catastrophe. Elle a également l'avantage de pouvoir s'adapter à une nouvelle situation qui n'aurait pas été envisagée durant la phase de préparation. La solution proposée, basée sur un cycle vertueux semi-automatisé, a été appliquée au cas d'étude du plan NOVI afin d'optimiser la répartition des médecins entre l'hôpital et le poste médical avancé. Bien que ce cas d'étude soit limité à l'étude d'une seule variable, il illustre le fonctionnement du système et les résultats obtenus par les deux principales contributions de l'approche présentée, ce qui constitue une preuve de concept. Les expériences de simulation ont optimisé la répartition des médecins en fonction du nombre de victimes générés par l'événement. Elles ont également permis de présenter les connaissances en fonction de la situation résultant de l'optimisation. Ce cas d'étude a ainsi enrichi les connaissances sur la gestion de catastrophe avec les valeurs optimales

de répartition des médecins en fonction du nombre de victimes. L'approche actuelle est limitée dans la gestion de plus d'une variable en raison du module d'analyse des résultats (présenté dans la [figure 1](#)) semi-automatique. Celui-ci est composé de deux fonctionnalités. La première fonctionnalité d'identification des valeurs optimales pour chaque configuration de simulation (illustré par les graphiques des figures 11 et 12) est automatique. En revanche, la seconde fonctionnalité d'enrichissement des connaissances par rapport aux valeurs optimales est actuellement manuelle et constitue l'un de nos futurs travaux afin d'automatiser cette fonctionnalité. Ce futur travail consistera tout d'abord à développer un ensemble de *built-in* permettant d'appliquer diverses équations paramétriques permettant d'approximer la relation entre variables d'entrées observées et valeurs optimales. Puis, nous implémenterons un processus de régression linéaire visant à identifier l'équation paramétrique adaptée (parmi l'ensemble développé) et à configurer en fonction du cas de figure. À terme, le cycle vertueux d'amélioration des plans vise à être complètement automatisé, en plus de considérer diverses autres variables. Il pourrait ainsi, permettre à l'avenir de soutenir la mise en place des plans lors d'une catastrophe, et d'aider à la décision lors des réponses à produire après une catastrophe. Pour cela, il sera également nécessaire de valider le modèle de simulation créé. Le cas d'application présenté dans cet article étant un cas fictif, nous n'avons pas pu valider le modèle. Par conséquent, un autre travail futur consistera à appliquer cette méthode sur un cas d'application testé en exercice réel afin de pouvoir comparer leurs résultats et ajuster le modèle si nécessaire afin de le valider. Nous pourrions ensuite, poursuivre ces travaux en appliquant la méthode à d'autres cas d'application afin d'étudier les aspects d'optimisation généraux et spécifiques d'un plan.

#### Remerciements

*Ces travaux de recherche sont soutenus par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (« Bundesministerium für Bildung und Forschung ») [numéro de subvention 03FH032IX4]. Nous remercions également la ville de Montbard et plus particulièrement Madame Laurence Porte, maire de Montbard, pour sa collaboration.*

#### Bibliographie

- Barkaoui H., Guinet A., Wang T., Meskens N. (2016). Les plans de gestion de crises dans les pays francophones. *8ème Conférence francophone en Gestion et Ingénierie de Systèmes Hospitaliers (GISEH 2016)*, Casablanca, Maroc.
- Bénaben F., Hanachi C., Lauras M., Couget P., Chapurlat V. (2008). A metamodel and its ontology to guide crisis characterization and its collaborative management. In *Proceedings of ISCRAM 2008-5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, p. 189-196. ISBN 9780615206974. [http://idl.iscram.org/files/benaben/2008/301\\_Benaben\\_etal2008.pdf](http://idl.iscram.org/files/benaben/2008/301_Benaben_etal2008.pdf)
- Beneito-Montagut R., Shaw D., Brewster C. (2013). *Web 2.0 and social media in disaster management: Using web 2.0 applications and semantic technologies to strengthen the public*

- resilience to disasters (disaster 2.0 emergency management agencies use and adoption of web 2.0).* Technical report, Aston University, UK, 2013.
- Boufedji D., Guessoum Z., Brandão A., Ziadi T., Mokhtari A. (2017). Towards a mas product line engineering approach. In *International workshop on engineering multi-agents systems*, p. 161-179.
- Brickley D., Guha R.V. (2014). RDF Schema 1.1.W3C Recommendation, <https://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf-schema-20140225/>
- Casado R., Rubiera E., Sacristan M., Schütte F., Peters R. (2015). Data interoperability software solution for emergency reaction in the Europe Union. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, n° 7, p. 1563-1576. ISSN 16849981. URL <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-15-1563-2015>.
- Christley S., Xiang X., Madey G. (2004). An ontology for agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the Agent 2004 conference*.
- Cointe P. (2004). Towards generative programming. In *International Workshop on Unconventional Programming Paradigms*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 315-325.
- De la Asunción M., Castillo L., Fdez-Olivares J., García-Pérez O., González A., Palao F. (2005). SIADEX: An interactive knowledge-based planner for decision support in forest fire fighting. *Ai Communications*, vol. 18, n° 4, p. 257-268.
- EPISECC (Establish Pan-European Information Space to Enhance seCurity of Citizens) (2016). *D4. 4. – Ontology model for the EPISECC use case*. Technical report, EPISECC project, grant agreement [607078]. [https://episecc.eu/sites/default/files/EPISECC\\_WP4\\_D4%204\\_Deliverable\\_Report.pdf](https://episecc.eu/sites/default/files/EPISECC_WP4_D4%204_Deliverable_Report.pdf)
- Knublauch, H., Kontokostas D. (2017). Shapes constraint language (shacl).W3C Recommendation, <https://www.w3.org/TR/shacl/>.
- Kruchten P., Woo C., Monu K., Sotoodeh M. (2007). A human-centered conceptual model of disasters affecting critical infrastructures. In *Proceedings of the 4th international conference on information systems for crisis response management (iscram)*, p. 327-344.
- Mishra D., Kumar S., Hassini E. (2018). Current trends in disaster management simulation modelling research. *Annals of Operations Research*, p. 1-25.
- Othman S.H., Beydoun G. (2013). Model-driven disaster management. *Information & Management*, vol. 50, n° 5, p. 218-228.
- Pan J. Z. (2009). Resource description framework. *Handbook on ontologies*, Springer, p. 71-90.
- Perry M., Herring J. (2011). GeoSPARQL—A Geographic Query Language for RDF Data. *OGC Candidate Standard*.
- Poveda G., Serrano E., Garijo M. (2015). Designing emergency management services by ontology driven social simulation. *IT CoNvergence PRActice*, vol. 3, n° 1, p. 17-32.
- Préfecture des Landes (2012). Plan ORSEC nombreuses victimes. *ORGANISATION DE LA REPONSE DE SECURITE CIVILE TOME I DISPOSITIONS GENERALES*, [http://landes.gouv.fr/IMG/pdf/Plan\\_NOVI\\_2012\\_cle59bd48.pdf](http://landes.gouv.fr/IMG/pdf/Plan_NOVI_2012_cle59bd48.pdf)

- Prud'hommeaux E., Seaborne A. (2008). SPARQL Query Language for RDF.*W3C recommendation*.
- Prudhomme C., Homburg T., Ponciano J.-J., Boochs F., Cruz C., Roxin A. (2019a). Interpretation and automatic integration of geospatial data into the Semantic Web: Towards a process of automatic geospatial data interpretation, classification and integration using semantic technologies.*Computing*, Springer, p. 1-27. Consultable sur <https://doi.org/10.1007/s00607-019-00701-y>
- Prudhomme C., Cruz C., Boochs F. (2019b). Semantic and logic modeling of disaster simulation for multi-agents systems. *International Journal of Modeling and Optimization*, vol. 9, n° 4, p. 198-204. DOI: 10.7763/IJMO.2019.V9.709
- Prudhomme C., Homburg T., Ponciano J.-J., Boochs F., Roxin A., Cruz C. (2017). Automatic Integration of Spatial Data into the Semantic Web. In *Proceedings of the 13th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WEBIST 2017)*, p. 107-115, Porto, Portugal. DOI: 10.5220/0006306601070115. Consultable sur <https://hal-univ-bourgogne.archives-ouvertes.fr/hal-01493390>
- Smart P.R., Russell A., Shadbolt N.R. (2007). AKTiveSA: Supporting civil-military information integration in Military Operations Other Than War. In *2007 International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-agents Systems, KIMAS 2007*, p. 434-439. IEEE. ISBN 1424409454. URL <http://dx.doi.org/10.1109/KIMAS.2007.369849>.
- Studer R., Benjamins R., Fensel D. (1998). Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, vol. 25, n° 1-2, p. 161-198.
- Taillandier P., Gaudou B., Grignard A., Huynh Q.-N., Marilleau N., Caillou P.*et al.* (2019). Building, composing and experimenting complex spatial models with the gama platform. *GeoInformatica*, vol. 23, n° 2, p. 299-322.