

CAS D'APPLICATION UNE CRUE CENTENNALE EN LOIRE MOYENNE

« Elle n'aime pas les hommes, disais-tu ? Mais pourquoi les hommes la bravent-ils comme ils le font ? Jour à jour, ils lui volent son domaine ; là où elle coulait hier, ils viennent et sèment leur blé, plantent leur vigne et construisent leurs maisons. Ils ramassent l'argile limoneuse, le sable même qu'elle a laissé, les amoncellements sur sa rive et lui disent : "Tu ne passeras plus". [...] Que lui dirai-je, demain, si elle reprend son bien, et si, rentrant là-bas après la crue, je ne retrouve qu'un peu de vase à la place tiède où je dormais ? » - Le Père Jude

– Maurice Genevoix, *Rémi des Rauches*

Introduction

Le projet de recherche Granularité des Niveaux de Pilotage (GéNéPi), financé par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) (Bénaben, 2014), vise à élaborer un système d'aide à la décision capable de soutenir les cellules de crise suite à un évènement majeur. Son objectif est de définir un processus de réponse d'après un modèle de la situation courante, de l'orchestrer et de l'adapter, si besoin, aux évolutions de la crise.

Le projet GéNéPi réunit de nombreux chercheurs, industriels et institutions :

- le Centre d'Etude et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) Ouest, chargé de rencontrer les parties prenantes usuelles en Loire Moyenne, de rédiger les scénarios de tests et le cahier des charges du projet ;
- l'Institut de Droit de l'Espace, des Territoires, de la Culture et de la cOMMunication (IDETCOM), chargé d'évaluer le démonstrateur logiciel selon les critères d'acceptation des futurs utilisateurs ;
- le Centre de Génie Industriel (CGI) d'IMT Mines-Albi, chargé de modéliser la situation de crise et de détecter le moment où le processus de réponse en cours n'est plus adapté à la situation courante ;

- l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), chargé de déduire un processus de réponse remplissant les objectifs d'une cellule de crise, sur la base du modèle de la situation envoyé par le CGI ;
- l'entreprise Iterop, chargée d'orchestrer le processus déduit entre les différentes parties-prenantes à la réponse à la crise.

Parmi les partenaires impliqués dans le projet GÉNéPi, le laboratoire CGI héberge un système d'aide à la décision dédié à supporter les collaborations et appelé RIO-Suite.

Le prototype logiciel RIO-Suite, développé par [Salatgé et al. \(2018\)](#), a pour objectif de soutenir les collaborations d'organisations, dans toutes leurs formes. Dans le cas d'une situation de crise, il permet, tout comme le démonstrateur GÉNéPi, de définir, orchestrer et maintenir un processus de réponse à la crise en cours (cf. [Figure 0.1](#)).

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du projet [GÉNéPi](#) et ils sont hébergés par le laboratoire CGI qui développe le prototype [RIO-Suite](#).

La [Figure 4.1](#) montre la place du système d'information proposé au [chapitre 3](#) par rapport au prototype logiciel et au démonstrateur GÉNéPi. Le système d'information utilise les événements simulés par le « S(t)imulateur » de RIO-Suite pour modéliser la situation de crise en cours. Le modèle obtenu est ensuite transmis au démonstrateur GÉNéPi ou au prototype logiciel RIO-suite, représenté en bas à gauche, pour alimenter une Common Operational Picture (COP) en cellule de crise, déduire un processus de réponse à la crise en cours, ou détecter des imprévus.

La [figure 4.1](#) présente aussi l'organisation de ce chapitre. L'objectif est de démontrer une des possibilités d'utilisation du système d'information proposé. La [Section 1](#) décrit la simulation d'un scénario d'une crue centennale en Loire Moyenne. La [Section 2](#) présente l'implémentation de notre système d'information intégré au prototype RIO-Suite. La [section 3](#) présente le fonctionnement du nouveau système d'aide à la décision d'urgence face à la situation de crise simulée. La [section 4](#) décrit les différentes utilisations du modèle de situation mis à jour. Enfin, la [section 5](#) termine en évaluant la capacité du système d'information implémenté à suivre la dynamique de la crise en temps réel.

4.1 Le cas d'étude proposé

Dans le monde, 500 millions de personnes ont été, au moins une fois, affectées par un phénomène d'inondation ([Nabet, 2013](#)). En France, ce danger menace deux millions de personnes, qui représentent 4% du territoire et 3% de la population totale ([MEDD, 2004](#); [DREAL, 2016](#)). Les dégâts occasionnés par des crues se chiffrent chaque année à 250 millions d'euros ([MEDD, 2004](#)). Le risque d'inondation à l'origine de ces pertes se renforce au fur et à mesure de l'urbanisation de nouvelles

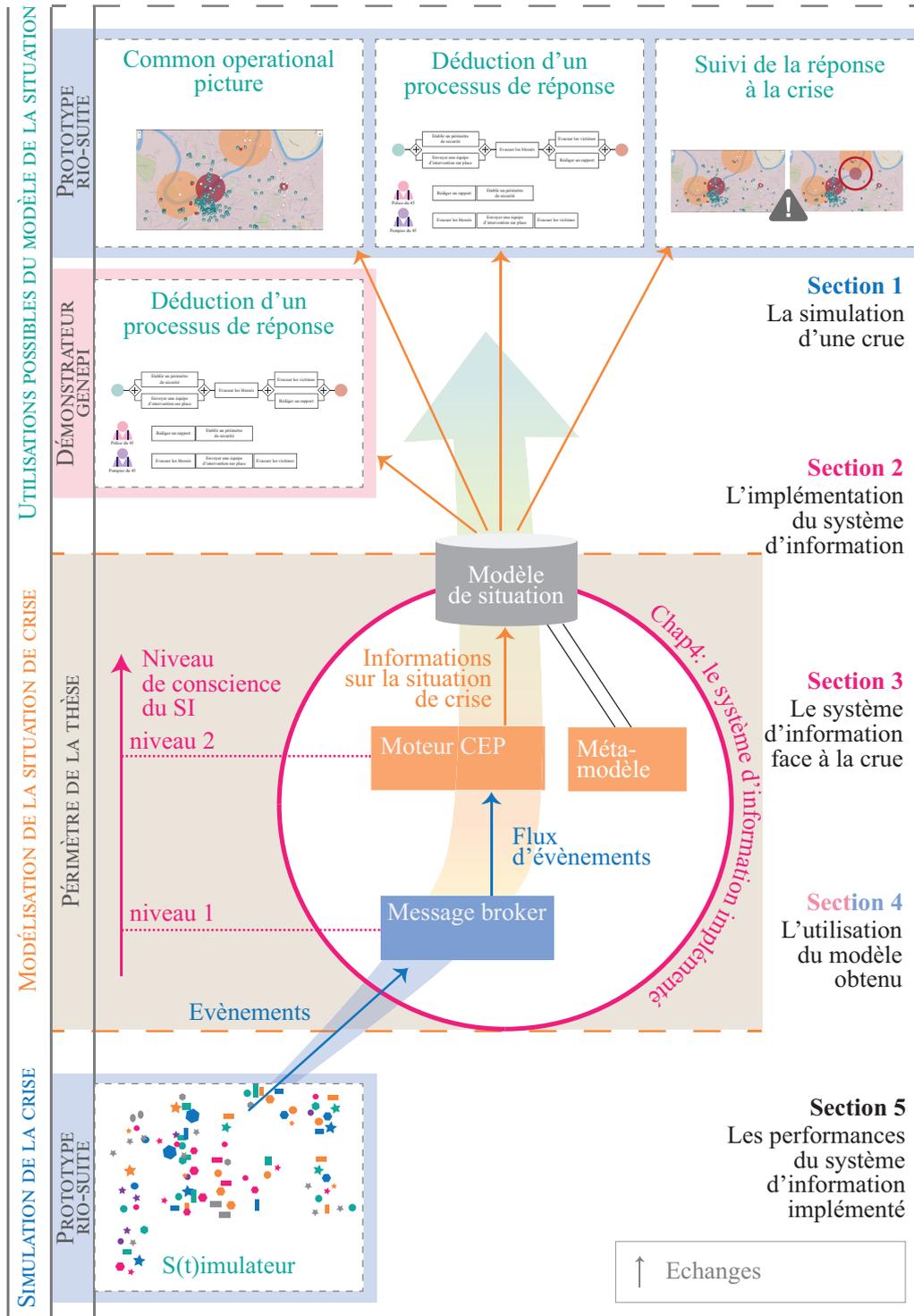


FIGURE 4.1 – Périmètre d'étude du chapitre 4

4. Cas d'application : une crue centennale en Loire Moyenne

zones inondables (Rode, 2009), du vieillissement des protections mises en place ou de l'aménagement des cours d'eau (MEDD, 2004).

Les partenaires du projet GÉNEPi ont choisi de travailler sur une crue centennale en Loire Moyenne ; la Loire moyenne est caractérisée par ses variations importantes de débits (DREAL, 2016) et ses taux importants d'endiguement et d'urbanisation. En 1856, une telle crue avait inondé 110 000 hectares où se situe aujourd'hui 300 000 personnes, 13600 entreprises et 72 000 emplois (DREAL, 2016).

Pour permettre la simulation d'un tel scénario, le CEREMA Ouest a collaboré avec les Services de Prédiction des Crues (SPC) Loire-Cher-Indre et Maine-Loire. Deux modèles de propagations ont été mis au point : une crue cinquennale et une crue centennale sur la Loire Moyenne, entre le bec d'Allier et le bec de Maine.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur un événement de crue centennale qui correspond au plus fort événement de crue connu pour une région donnée (MEDD, 2004).

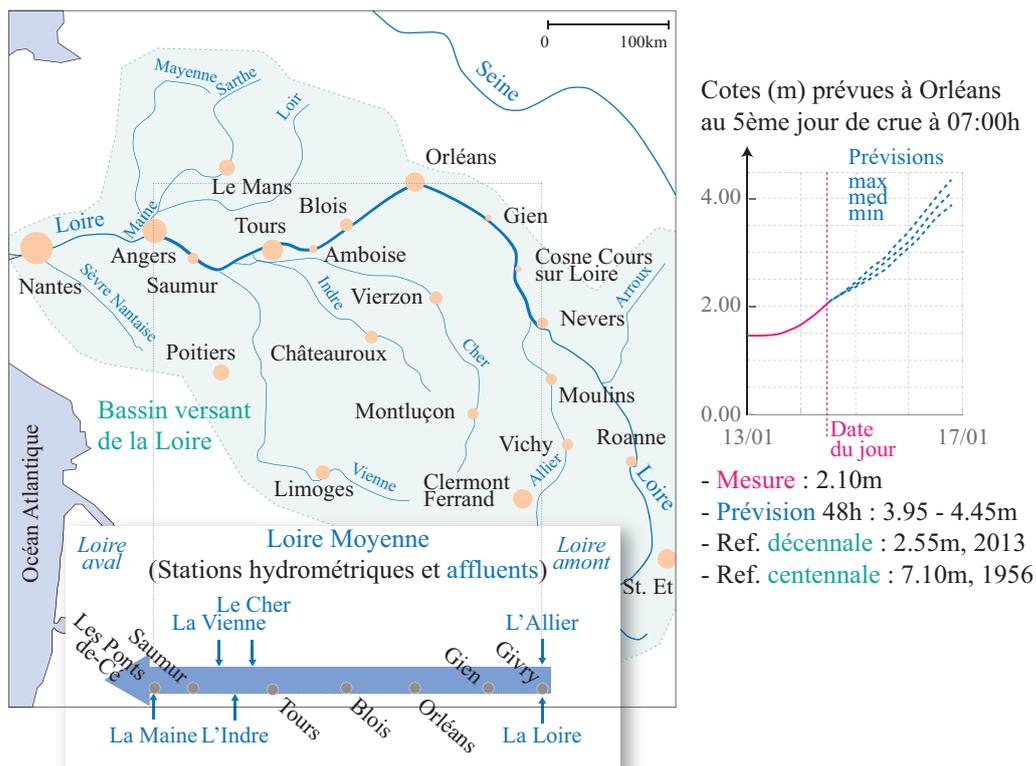


FIGURE 4.2 – La Loire Moyenne, ses affluents et ses stations hydrométriques, accompagnée d'un exemple de relevé pour le 5ème jour de crue. Inspiré de Rode (2009), Dolidon (2016b) et SHAPI et al. (2017)

La Figure 4.2 présente la géographie de la région Française correspondant à la Loire Moyenne : la Loire entre sa confluence avec l'Allier (Nevers), en amont, et sa confluence avec le Maine (Angers), en aval. Un scénario hydrométéorologique,

reporté dans [Dolidon \(2016b\)](#), modélise de manière *réaliste* les apports d'eau des six affluents présents en Loire Moyenne dans le cas d'une crue centennale. Ainsi trois relevés de *débits* et de hauteur d'eau (*côte*) journaliers ont été élaborés pour les sept stations hydrométriques de référence, localisées sur la Figure 4.2, et les 11 jours de crue prévus. Chaque relevé contient les prévisions des débits et des côtes sur les 56h à venir et selon trois échelons de probabilité : haute, médiane et basse. Un exemple de relevé hydrométrique est donné à droite de la Figure 4.2. Il correspond aux prévisions de cotes et débits d'eau, prévus sur la station de mesure située à Orléans au 11ème jour de la crue simulée par les SPCs Maine-Loire et Loire-Cher-Indre.

4.1.1 Les parties prenantes usuelles

Pour enrichir ce scénario, deux partenaires du projet GÉNéPi, le CEREMA Ouest et le laboratoire IDETCOM, ont interrogé les parties-prenantes usuelles à la réponse à une crue de la Loire. Les résultats de leurs entretiens ont servi de base à la rédaction du cahier des charges du projet ([Renou et Dolidon, 2015](#)) et ont permis de lister les principales parties-prenantes à la gestion d'une crue majeure, selon l'organisation de crise présentée dans ([Dautun et Roux-Dufort, 2011](#)). La Figure 4.3 représente ainsi le nombre de cellules de crise et de partenaires lié à chaque niveau de la chaîne stratégique française et listés ci-dessous.

Niveau chaîne stratégique	Présents en L.M.	Cellules par territoire	Partenaires par territoire
<i>Pays (France)</i>	x1	1+7	9
<i>Zone de défense</i>	x2	1	7
<i>Département</i>	x6	1	13
<i>Local</i>	x250	1	
<i>Autre</i>	x3		3
Total sur la L. M. :		266	110

Abbreviations: L.M. Loire Moyenne

FIGURE 4.3 – Récapitulatif des cellules de crises activées et des parties prenantes mobilisées, par défaut, lors de la réponse à une crue majeure en Loire Moyenne, inspiré de [Dolidon \(2016b\)](#), [Dautun et Roux-Dufort \(2011\)](#) et [SIDPC \(2005\)](#)

Au niveau national, les aspects stratégiques et tactiques de la réponse à la crise ([Dautun et Roux-Dufort, 2011](#)) sont assurés par la **Cellule Interministérielle des Crises (CIC)** qui coordonne sept cellules de crise ministérielles dont trois au sein du Ministère de l'intérieur¹. Au niveau opérationnel, le CIC recoupe les informations provenant de neuf institutions dont ([Dolidon, 2016a](#)) :

- les directions générales des services déconcentrés ;

1. Le CIC coordonne quatre cellules hébergées au Ministère de la défense, au Ministère de la santé au Ministère de l'écologie du développement durable des transports et du logement, et au Ministère des affaires étrangères et européennes

4. Cas d'application : une crue centennale en Loire Moyenne

- la société concessionnaire d'autoroutes ;
- les sept opérateurs réseaux, dont France Télécom ou GRDF ;
- le Service central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SHAPI) qui, dans le cas d'un risque inondation, recoupe les prévisions reçues des SPCs.

Au niveau de chaque zone de défense menacée par la crue, un **Centre Opérationnel de Zone (COZ)** recoupe les informations des sept services ci-dessous pour anticiper et allouer des moyens supplémentaires aux départements (Dolidon, 2016a) :

- l'état major de zone ;
- l'état major interarmées de la zone de défense et de sécurité ;
- l'agence régionale de santé ;
- la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement ;
- le centre régional d'information et de coordination routière ;
- la direction zonale Compagnie Républicaine de Sécurité (CRS) ;
- la direction interdépartementale des routes ;

Au niveau de chaque région, dépourvue de cellule de crise, on retrouve aussi trois partenaires usuels qui se réfère au COZ de leur zone de défense (Dolidon, 2016a) :

- la direction régionale des entreprises, de la concurrence et de la consommation, du travail et de l'emploi ;
- la direction régionale des finances publiques ;
- le service interministériel régional des affaires civiles et économiques de défense et de protection civile.

Au niveau de chaque département touché, un **Centre Opérationnel Départemental (COD)** coordonne les actions pour 13 partenaires mobilisés en cas de crue majeure (Dolidon, 2016a) :

- le centre opérationnel départemental d'incendie et de secours ;
- le centre d'opération et de renseignement de la gendarmerie ;
- le système d'information et de communication ministériel ;
- la direction départementale des territoires ;
- la chambre de commerce et d'industrie ;
- le conseil général ;
- la direction départementale de la protection des populations ;
- la direction départementale de la sécurité publique ;
- la direction militaire départementale ;
- la direction des services départementaux de l'éducation nationale ;
- la gendarmerie ;
- le service d'aide médicale urgente ;
- le service départemental d'incendie et de secours.

Enfin, au niveau de chaque commune menacée par la crue, le **Poste de Commandement Communal (PCC)** doit enclencher son plan communal de sauvegarde, diriger les opérations de secours et informer sa population.

Comme illustré sur la Figure 4.3, cette organisation de crise requiert l'activation de 266² cellules de crise pour coordonner 110³ parties-prenantes autonomes, réparties à tous les niveaux de la chaîne stratégique couvrant les 250 communes menacées par une crue en Loire Moyenne (SIDPC, 2005). De plus, selon les évolutions de la crise en cours, de nouvelles parties-prenantes peuvent être mobilisées pour leur expertise ou leur soutien.

4.1.2 Les risques encourus en Loire Moyenne

Le projet GÉNÉPi a aussi permis de dresser une liste des risques pouvant impacter les enjeux des territoires menacés ou le processus de réponse suivi par les cellules de crise. Le CEREMA Ouest Dolidon (2016a) en a identifié 16 types, répartis ici en 2 catégories.

Les risques *émergents* sont directement dus aux conséquences de la crise et sont au nombre de sept (Dolidon, 2016a) :

- Le risque sanitaire pour les populations, ou les animaux ;
- Le risque d'une population démunie (sans eau, sans électricité ou sans nourriture par exemple) ;
- Le risque de panique ;
- Le risque de victimes ;
- Le risque d'aggravation de la crise ;
- Le risque de rupture d'une protection, telle que le système d'endiguement ;
- Le risque de pollution ;
- Le risque de dysfonctionnement des réseaux (routier, aérien, électrique, déchets, etc.).

Les risques d'*implémentation* sont liés à la mise en œuvre de la réponse à la crise par les parties-prenantes, qui souhaitent ainsi faire face aux conséquences de la crise (Dolidon, 2016a) :

- Le risque de manquer de moyen ;
- Le risque d'une mauvaise répartition des moyens ;
- Le risque d'oublier un acteur ou une population ;
- Le risque d'insécurité ;
- Le risque de dysfonctionnement (voir d'arrêt) du service public ;
- Le risque économique ;
- Le risque de perte de confiance dans les pouvoirs publics ;
- Le risque de mise en danger de la population.

Le métamodèle implémenté au sein du prototype RIO-Suite propose un troisième type de risque, qui n'a pas été testé par le scénario de crise GÉNÉPi : les risques *intrinsèques* (Li et al., 2018a). Par exemple, un bâtiment peut menacer de s'écrouler à cause d'une malfaçon (risque intrinsèque), suite à un tremblement de terre (risque émergent) ou lorsqu'un de ses murs est

2. $1 * 250 \text{ communes} + 1 * 6 \text{ départements} + 1 * 2 \text{ zones de défenses} + 8$

3. $13 * 6 \text{ départements} + 3 * 3 \text{ régions} + 7 * 2 \text{ zones de défense} + 9$

abattu volontairement (risque d'implémentation). Les risques intrinsèques à l'environnement de la collaboration peuvent être identifiés en phase de préparation, en amont de la situation de crise. L'intérêt du système d'information proposé dépend donc plutôt de la détection en temps réel des risques émergents.

L'objectif pour notre système d'information est d'être capable de détecter tous ces risques et tous les événements à même de les concrétiser.

4.1.3 Les enjeux présents en Loire Moyenne

Les risques émergents peuvent être identifiés grâce au raisonnement représenté sur la Figure 3.9 : les situations à risque concernent les enjeux vulnérables à un danger avéré.

Les interviews, l'étude des plans d'urgence et l'étude des bases topographiques menés par le CEREMA Ouest nous ont permis de lister 18 types d'enjeux vulnérables aux crues et présents sur la Loire Moyenne (Dolidon, 2016a) :

- les établissements d'enseignement, les établissements de santé, les établissements pénitentier ;
- les Installations classées pour la protection de l'environnement (IPPC), les installations classées SEVESO ;
- les établissements utiles à la gestion de crise ;
- les campings ou villages vacances ;
- les zones d'activité ;
- les transformateurs électriques, les antennes relais, les installations d'eau potable, les stations d'épuration, les gares, les aéroports ou aérodromes, les voies ferrées, les routes, les zones protégées et les populations.

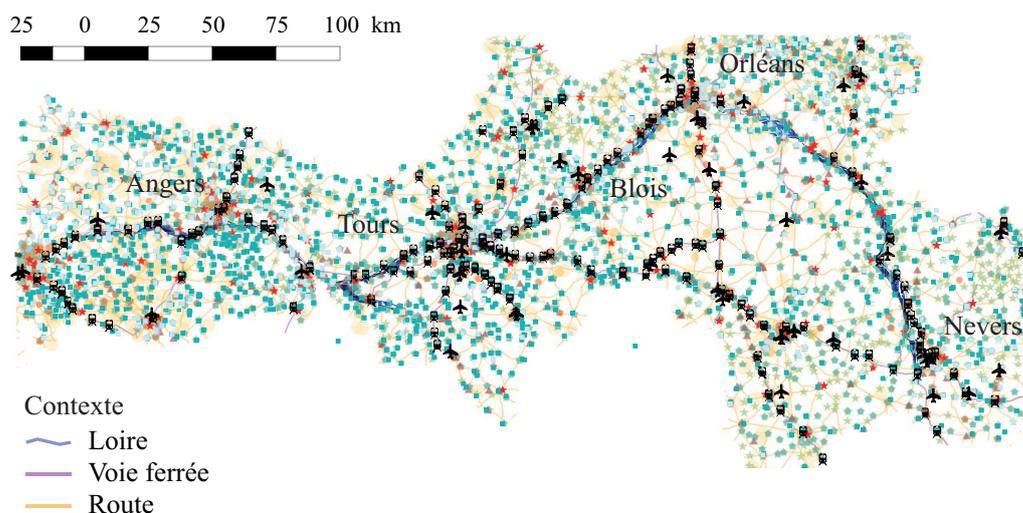


FIGURE 4.4 – Les enjeux présents en Loire Moyenne, tirés de la base de données BD TOPO® appartenant à IGN (2011) et sélectionnés par le CEREMA Ouest (Dolidon, 2016a). La légende a été omise volontairement pour respecter la confidentialité des données présentées

La Figure 4.4 illustre le Système d'Information Géographique (SIG) mis au point par le CEREMA Ouest (Dolidon, 2016a) et qui reprend les enjeux de tous les types présentés ci-dessus. A chaque type d'enjeux, un fichier a été créé pour lier le concept décrit à un de nos concepts de la couche Crise du métamodèle (cf. Figure 3.3). Un exemple est présenté en Annexe F. Ce fichier permet une transformation de modèle entre les concepts utilisés par le SIG du CEREMA et les concepts de notre métamodèle.

Ce travail a permis de valider la couverture de la partie Contexte de la couche Crise de notre métamodèle (cf. Section 3.1.3), sur 15569⁴ points d'intérêt.

4.2 L'implémentation du système d'information proposé

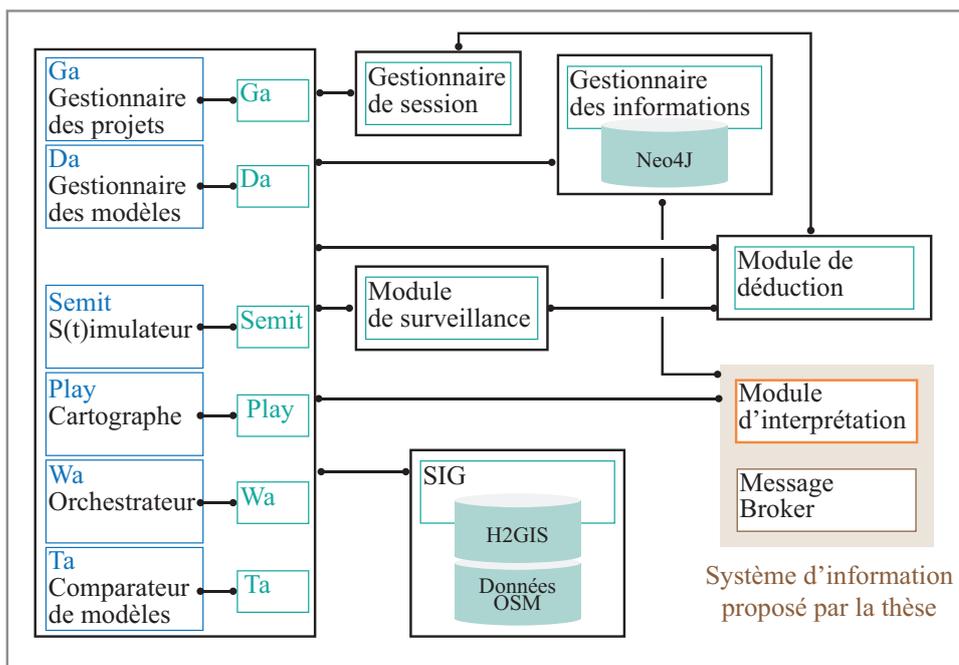
Le scénario d'une crue centennale en Loire Moyenne, avec ses parties-prenantes, ses enjeux et ses risques, peut maintenant être utilisé pour tester le système d'information présenté au chapitre 3. Pour ce faire, celui-ci doit d'abord être implémenté dans un système informatique. Nous avons convenu d'implémenter le système d'information proposé directement dans le logiciel RIO-Suite, hébergé par le laboratoire CGI.

Le prototype RIO-Suite, originaire des prototypes logiciels IO-Suite (Benaben et al., 2017) et Pro-(R)isk (Nguyen et al., 2013; Marmier et al., 2014), est dédié à supporter la gestion des (R)isques et l'(I)nteropérabilité au sein de collaborations d'(O)rganisations. RIO-Suite est ainsi porté par une architecture commune à plusieurs projets de recherche.

4.2.1 Le système d'aide à la décision implémenté

Avec le prototype RIO-Suite, nous avons hérité de la version du métamodèle originaire des travaux de Benaben et al. (2017), d'une interface homme/machine, d'un gestionnaire de session, d'une base de données orientée graphe conservant le modèle de situation, d'un module de déduction capable de déduire un processus de réponse collaboratif adapté à la situation décrite par le modèle enregistré dans la base, d'un orchestrateur capable de jouer le processus déduit entre les parties-prenantes à la crise, et d'un module de surveillance capable de comparer le modèle de la situation de crise à la situation attendue au lancement du processus de réponse. Chaque partie de l'architecture comprend des fonctionnalités qui répondent aux besoins de l'utilisateur (*frontend*) ou qui sont nécessaires à leur fonctionnement (*backend*). Les modules, représentés par des boîtes sur la Figure 4.5, s'organisent autour d'une Architecture orientée services (« Service Oriented Architecture (SOA) ») telle que définie dans (Brown et al., 2002).

4. 47 aéroports ou aérodromes, 213 gares, 798 installations d'eau potable, 1732 stations d'épuration, 2467 antennes relais, 254 transformateurs électriques, 10 établissements pénitenciers, 519 Campings ou villages vacances, 856 établissements hospitaliers, 4787 établissements scolaires, 3120 établissements utiles à la gestion de crise, 518 IPPC, 85 établissements classés SEVESO et 163 ouvrages de protection.



Un utilisateur peut se connecter via *RIO-Ga (Governance assistant)* pour créer un nouveau projet de collaboration. Le *module de session* lie les données par projet et par utilisateur. Ce dernier peut sélectionner un cas d'application existant ou peut modéliser **manuellement** sa situation collaborative. A partir du **modèle de situation** enregistré dans une base de données orientée graphes (*Neo4J*), le *module de déduction* propose un processus adapté aux objectifs de la collaboration. *RIO-Wa (Workflows assistant)* orchestre le processus validé entre les partenaires décrits par l'utilisateur. Pendant l'orchestration, des données de suivies sont transmises au *module de surveillance* et *RIO-Ta (Tracker assistant)* qui compare la situation de crise (**le modèle terrain**) avec la situation que peuvent attendre les décideurs du processus de réponse enclenché (le modèle attendu).

FIGURE 4.5 – Les modules composant l'architecture du prototype logiciel RIO-Suite au 13/07/2018 tirée de [Salatgé et al. \(2018\)](#) et organisée sur deux niveaux d'utilisation (frontend ou backend)

La Figure 4.5 illustre l'architecture du prototype RIO-Suite, couplée à l'architecture, détaillée au chapitre 3, du système d'information proposé. Elle permet maintenant de mettre à jour le modèle de situation de crise, au fur et à mesure des évènements, grâce à :

- la collecte d'évènements informatiques, selon des topics prédéfinis ;
- l'interprétation des évènements collectés, grâce à des règles Complex Event Processing (CEP) élaborées à partir de règles métier, pour automatiquement tenir à jour l'ensemble des instances composant le modèle de la situation de crise.

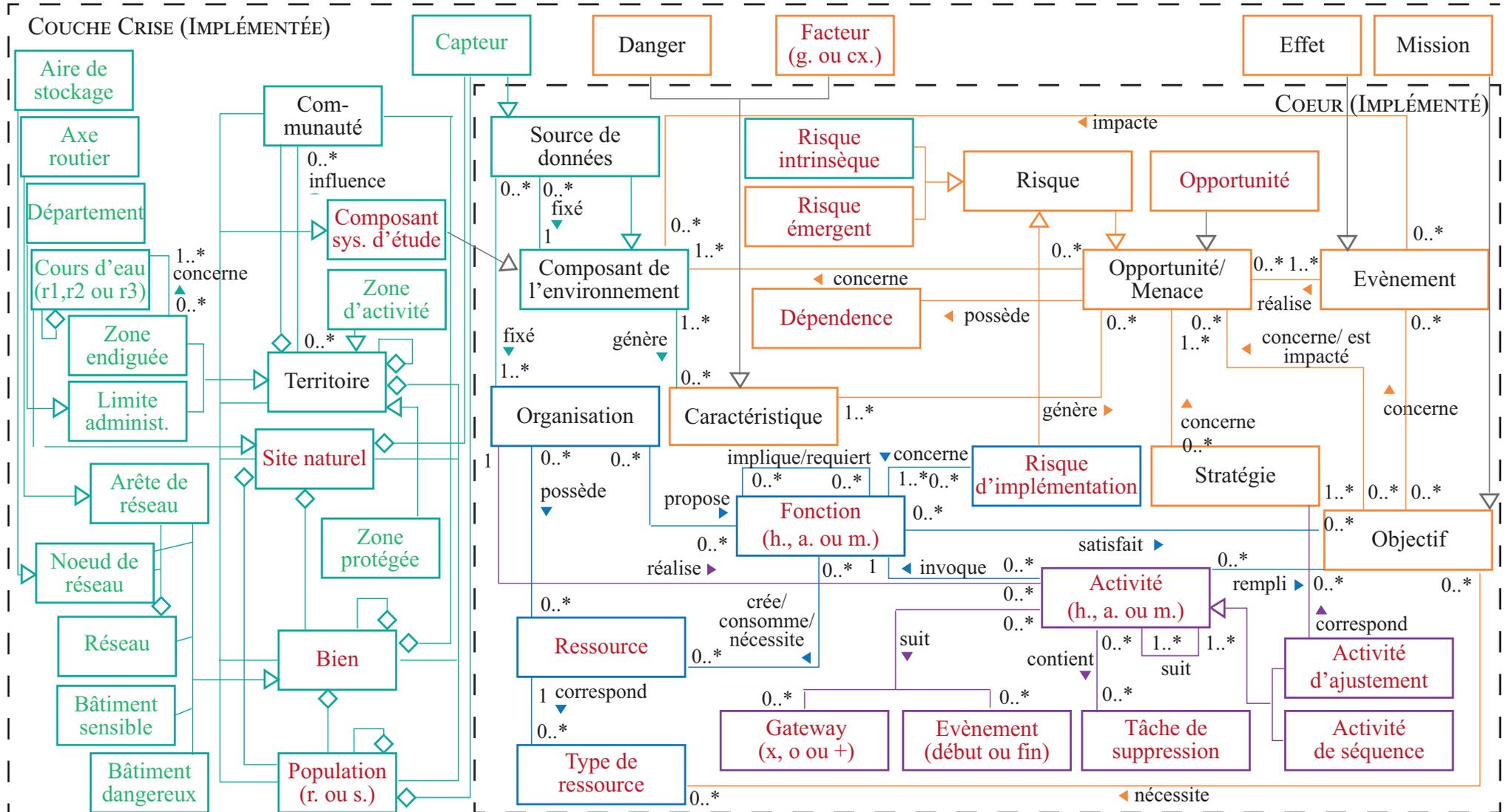
Pour permettre le test et l'utilisation de ces deux nouveaux modules « Collecte » et « Interprète », l'équipe de développement (Salatgé et al., 2018) de RIO-Suite a choisi de mettre au point :

- un « S(t)imulateur », et son interface utilisateur RIO-Semit, qui permettent d'émettre en cadence des évènements informatisés par nos soins pour simuler une situation de crise lors d'un exercice ;
- une interface supplémentaire, appelée RIO-Play (*Field assistant*), prenant la forme d'une COP pour présenter les informations contenues dans le modèle de situation aux décideurs en cellule de crise.

4.2.2 Le métamodèle implémenté

Le prototype logiciel RIO-Suite se réfère à une version du métamodèle Cœur présentée à la section 3.3. La Figure 4.6 représente ce métamodèle tel qu'il était implémenté en Janvier 2018, à la clôture du projet GÉNÉPi. Certains concepts, écrits en vert, ont été ajoutés au cours des travaux présentés dans ce manuscrit. Parmi ces concepts, ceux décrivant le Contexte d'une collaboration de crise, encadrés en vert sur la Figure 4.6, ont été particulièrement retravaillés. Grâce à eux, tous les types d'enjeux identifiés par le CEREMA Ouest (cf. Figure 4.4) pourront être représentés au bon niveau d'abstraction. Les fichiers sources décrivant cette partie du métamodèle sont disponibles en Annexe G.

Concepts (différents, équivalent à la théorie, ou ajoutés/généralisés par la thèse) liés au: **Contexte de la collaboration**; **Objectifs de la collaboration et aux Risques la menaçant**; **Partenaires de la collaboration, leur Savoir-faire et leur Ressources**; **Processus collaboratif** (selon le langage BPMN) (Salatgé et al, 2018)



Remarque: tous les concepts héritent d'un concept abstrait qui n'est pas représenté ici. Abréviations: sys. système, m. de médiation, h. humaine, a. artificielle, g. gravité, cx. complexité, r. résidente, s. saisonnière, r1 ruisseau, r2 rivière, r3 fleuve, administ. administrative (communale, départementale, régionale, zonale ou nationale)

FIGURE 4.6 – Le métamodèle proposé tel qu'implémenté dans RIO-Suite, en Janvier 2018, à la clôture du projet GénÉPi

4.3 Le fonctionnement du système d'information mis au point

La nouvelle version de RIO-Suite, implémentant le système d'information proposé, peut maintenant être testée sur le scénario de crise décrit à la section 4.1.

4.3.1 La simulation d'une crue centennale en Loire Moyenne

La première étape consiste à créer les sources de données hydrauliques, qui simulent l'envoi journalier des prévisions des SPCs (cf. Figure 4.2). Elles sont au nombre de 10 et couvrent les villes de Blois, Gien, Givry, Langeais, Montjean, Orléans, Pont de Cé, Saumur et Tours. Chacune a permis la création d'un capteur simulant l'émission journalière d'un relevé contenant les prévisions hydrométéorologiques heure par heure, pour les 56h à venir. Un aperçu de ces événements est disponible en Annexe H.

Pour répondre à notre hypothèse 3, sur la variété des données en entrée, les données simulées par les SPCs, ont été retranscrites selon un schéma commun présenté sur la Figure 4.7. Le format Extensible Markup Language (XML) utilisé ici comme modèle est décrit dans (Bray et al., 2008) et est recommandé par les standards OASIS présentés au chapitre 3.

Schéma XML décrivant un événement de type «Prévision hydraulique»

1. Type décrit	<code><xsd:element name="Event_ForecastMeasures"></code>
2. Attributs possibles pour les événements de type «Event_ForecastMesures»:	<code><xsd:complexType><xsd:sequence></code>
Id	<code><xsd:element name="id" type="xsd:string" /></code>
date	<code><xsd:element name="date" type="xsd:dateTime" /></code>
nom de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationName" type="xsd:string" /></code>
latitude de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationLat" type="xsd:float" /></code>
longitude de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationLong" type="xsd:float" /></code>
heure de la prévision	<code><xsd:element name="nbHours" type="xsd:int" /></code>
débit prévu (prévision basse)	<code><xsd:element name="f_min" type="xsd:float" /></code>
débit prévu (prévision médiane)	<code><xsd:element name="f_med" type="xsd:float" /></code>
débit prévu (prévision haute)	<code><xsd:element name="f_max" type="xsd:float" /></code>
côte prévue (prévision basse)	<code><xsd:element name="wl_min" type="xsd:float" /></code>
côte prévue (prévision médiane)	<code><xsd:element name="wl_med" type="xsd:float" /></code>
côte prévue (prévision haute)	<code><xsd:element name="wl_max" type="xsd:float" /></code>
	<code></xsd:sequence></xsd:complexType></xsd:element></code>

FIGURE 4.7 – Le schéma XSD, mis au point pour encadrer l'émission des événements de type hydraulique

Le type d'évènement hydraulique décrit sur la Figure 4.7 permet à la source émettrice de communiquer :

- son nom, sa latitude, sa longitude ;
- l'identifiant et la date d'émission de l'évènement qu'elle émet ;
- l'heure de la prévision, par rapport à la date d'émission de l'évènement, le débit prévu selon une fourchette (haute, médiane et basse) et la côte prévue selon la même fourchette de valeurs.

De la même façon, il a fallu mettre au point un schéma commun aux événements trafic. Il est disponible sur la Figure 4.8 et permet à chaque station de mesure de communiquer :

4. Cas d'application : une crue centennale en Loire Moyenne

Schéma XML décrivant un évènement de type «Prévision hydraulique»

1. Type décrit	<code><xsd:element name="Event_TrafficMeasures"></code>
2. Attributs possibles pour les évènements de type «Event_TrafficMeasures»:	<code><xsd:complexType><xsd:sequence></code>
Id	<code><xsd:element name="id" type="xsd:string" /></code>
date	<code><xsd:element name="date" type="xsd:dateTime" /></code>
nom de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationName" type="xsd:string" /></code>
latitude de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationLat" type="xsd:float" /></code>
longitude de la station de mesure	<code><xsd:element name="stationLong" type="xsd:float" /></code>
direction n°1 (ville)	<code><xsd:element name="direction1" type="xsd:string" /></code>
direction n°2 (ville)	<code><xsd:element name="direction2" type="xsd:string" /></code>
nombre de P.L. direction n°1	<code><xsd:element name="pl1" type="xsd:int" /></code>
nombre de véhicules direction n°1	<code><xsd:element name="tv1" type="xsd:int" /></code>
nombre de P.L. direction n°2	<code><xsd:element name="pl2" type="xsd:int" /></code>
nombre de véhicules direction n°2	<code><xsd:element name="tv2" type="xsd:int" /></code>
	<code></xsd:sequence></xsd:complexType></xsd:element></code>

Abbréviations: P.L. poids lourd, T.V. tout véhicule

FIGURE 4.8 – Le schéma XSD, mis au point pour encadrer l'émission des évènements de type trafic

- son nom, sa latitude, sa longitude, les deux villes aux extrémités de la route qu'elle surveille (direction n°1 et direction n°2);
- l'identifiant et la date d'émission de l'évènement qu'elle émet;
- le nombre journalier de camions allant vers la direction n°1, le nombre journalier de camions allant vers la direction n°2 et de même avec les véhicules légers.

Un aperçu des évènements trafic mis à disposition dans le scénario d'une crue majeure en Loire Moyenne est disponible en Annexe H.

La simulation de la crue centennale est lancée par un utilisateur, via l'interface RIO-Semit du « S(t)imulateur » : à chaque jour simulé, les capteurs correspondants doivent être lancés. Les évènements qu'ils émettent sont reçus par le Message broker (cf. Figure 3.11). Celui-ci peut alors les transmettre à tous les services abonnés, dont le module d'interprétation.

4.3.2 L'interprétation des évènements en un modèle de la situation courante

Pour le scénario d'une crue centennale, les règles d'interprétation ajoutées au moteur CEP utilisent le raisonnement expliqué sur la Figure 3.9 : les règles de niveau 1 identifient des dangers, et les règles de niveau 2 les incidents et les risques auxquels doivent faire face les cellules de crise.

Ces règles métiers, fournies par le CEREMA Ouest, ont été implémentées en langage **SIDDHI QL**⁵ qui permet de traiter des flux d'évènements pour en déduire des évènements complexes (cf. Figure 3.7). L'avantage principal de ce langage réside dans les fonctions qui peuvent être décrites et ajoutées manuellement. Par exemple, nos règles utilisent régulièrement une fonction ajoutée et permettant d'interroger la base Neo4J de RIO-Suite pour récupérer un certain type d'instances du modèle de situation, comme les bâtiments sensibles sur un territoire menacé.

5. <https://docs.wso2.com/display/CEP300/Introduction+to+Siddhi+Query+Language>

Le scénario d'une crue centennale, proposé par les partenaires du projet GÉNéPi, a permis de tester quatre règles de niveau 1 et six règles de niveau 2, caractéristiques de trois moments de la gestion de crise. Les premières règles se basent sur une prévision d'inondation centennale « probable », quelques jours avant la montée des eaux. Les autres se déclenchent lorsque le danger se renforce devenant « très probable » ou « imminent ». Dès lors, les risques ne sont plus déduits à l'échelle d'une ville menacée, mais à l'échelle d'un bâtiment, comme une école ou un hôpital. Enfin, si une brèche apparaît sur une levée, les incidents sont eux aussi identifiés enjeu par enjeu.

Toutes ces règles sont tirées des plans d'urgence utilisés aujourd'hui par les cellules de crise pour réagir aux crues majeures en Loire Moyenne. Ce travail a été réalisé notre partenaire du projet GÉNéPi : le CEREMA Ouest, qui a pu choisir les règles métier à implémenter, par ordre de priorité pour tester notre système d'aide à la décision.

La Figure 4.9 présente les règles de niveau 1 utilisées par le module d'interprétation pour déduire :

- un danger d'inondation probable, ici dans le Loiret et le Loir-et-Cher, grâce aux données simulées des stations de mesure à Orléans, Gien et Blois. Le cas du Loir-et-Cher est présenté sous sa forme originelle, en SIDDHI QL, dans l'encart bleu ;
- un danger d'inondation très probable en Loire Moyenne, à partir des données simulées de la station de Givry, en aval du bec d'Allier ;
- un danger d'inondation imminent, ici pour le Loiret, à partir des données simulées des stations de mesure d'Orléans et de Gien.

La Figure 4.10 présente les règles de niveau 2 utilisées par le module d'interprétation pour déduire les risques liés aux enjeux présents en Loire Moyenne :

- un risque de submersion d'un enjeu déduit du danger probable d'inondation, dans le Loiret ou le Loir-et-Cher, et de la présence d'un bâtiment sensible dans la zone de danger ;
- un risque de submersion très probable en zone urbaine déduit du danger très probable d'inondation dans le Loiret ou le Loir-et-Cher ;
- un risque de submersion imminente de maison de retraites dans le Loiret, déduit du danger imminent d'inondation dans le département et de la présence de maisons de retraite dans la zone de danger. Cette règle est présentée sous sa forme originelle, en SIDDHI QL, dans l'encart bleu. La partie jaune correspond à la requête envoyée à la base de données Neo4J pour récolter des informations sur le modèle de situation courant ;
- un risque de coupure imminente d'eau potable à Orléans, déduit du danger imminent d'inondation dans le département et de la présence d'une station d'eau potable à Orléans, au sein de la zone de danger ;
- un risque de coupure imminente de l'A71, déduit du danger imminent d'inondation dans le Loiret et de la présence d'une des portions de l'autoroute en zone inondable. Ici, la règle est dédiée à une instance en particulier : la règle recherche toutes les instances du concept « axe routier » qui s'appellent « A71 » et qui sont présentes dans la zone de danger ;

RÈGLES DE NIVEAU 1

Type d'événement		→ Danger
Mesure hydraulique	SI Ceau(ORLEANS) > 5m OU Ceau(GIEN) > 4.5m	Inondation probable Loiret
Mesure hydraulique	SI Ceau(BLOIS) > 4.1m	Inondation probable Loir-et-Cher
Mesure hydraulique	SI Deau(GIVRY) > 3500m ³ /s	Inondation très probable Loire Moyenne
Mesure hydraulique	SI Ceau(ORLEANS) > 5.5m	Inondation imminente Loiret

Règle CEP en SIDDHI QL pour «dan01»: «Inondation probable Loir-et-Cher»

```
define stream Mesure_hydraulique (id string, date string, stationName string,
    stationLat float, stationLong float, nbHours int, f_min float,
    f_med float, f_max float, wl_min float, wl_med float, wl_max float);
from Event_ForecastMeasures[stationName == 'BLOIS' and wl_max > 4.1] select
    'Loire Flooding response' as collaborationName,
    'Loire Flooding' as knowledgeSpaceName,
    'Inondation probable Loir-et-Cher' as node_name,
    'Flood' as node_type, wl_max as node_threshold, '1' as node_gravity,
    'characteristic' as node_role0, 'danger' as node_role1,
    '60000' as node_radius,
    stationLat as node_longitude, stationLong as node_latitude,
output first every 30 events
insert into addNodeEvent;
```

Extrait du modèle de situation correspondant

:Danger	:Danger
id: dan01 nom: Inondation probable Loir-et-Cher type: Flood threshold: 4.263 gravity: 1 radius: 60000 latitude: 1.3351479 longitude: 47.584957	id: dan02 nom: Inondation probable Loiret type: Flood threshold: 5.12 gravity: 1 radius: 60000 latitude: 1.9047891 longitude: 47.897324
id: dan04 nom: Inondation imminente Loiret type: Flood threshold: 5.642 gravity: 3 radius: 60000 latitude: 1.9047891 longitude: 47.897324	id: dan03 nom: Inondation très probable Loire Moy. type: Flood threshold: 3956 gravity: 2 radius: 180000 latitude: 3.072113 longitude: 47.015995

*Ceau(Ville) = côte de la Loire à une station de mesure de la Ville

** Deau(Ville) = débit d'eau de la Loire à une station de mesure de la Ville

FIGURE 4.9 – Les règles d'interprétation utilisées pour les quatre dangers déduits dans le cadre du scénario GÉNéPi

RÈGLES DE NIVEAU 2: LES RISQUES

* p. probable, t.p. très probable, sub. submersion

Type d'Enjeu	X Danger	- - - - - →	Risques	Application
Bâtiment sensible	Inondation probable	SI ∃ bâtiment sensible € danger(lat,long, radius)	Submersion probable d'un enjeu	Loiret et Loir-et-Cher
Val urbanisé	Inondation très probable	—	Submersion très p. en zone urbaine	Loiret et Loir-et-Cher
Maison de retraite	Inondation imminente	SI ∃ bâtiment sensible € danger(lat,long, radius) / type =«retirement home»	Submersion imminente de maisons de retraite	Loiret, pour trois maisons de retraite d'Orléans
Station d'eau potable	Inondation imminente	SI ∃ bâtiment sensible € danger(lat,long, radius) / type =«water station»	Coupure imminente d'eau potable	Loiret pour la station d'Orléans
Autoroute A71	Inondation imminente	SI ∃ axe routier € danger(lat,long, radius)/ nom = «A71»	Coupure imminente autoroute A71	Loiret pour l'A71
Digue	Inondation imminente	—	Rupture imminente	Loiret pour la digue d'Orléans

Règle CEP en SIDDHI QL pour «ris01»: «Submersion imminente d'une maison de retraite»

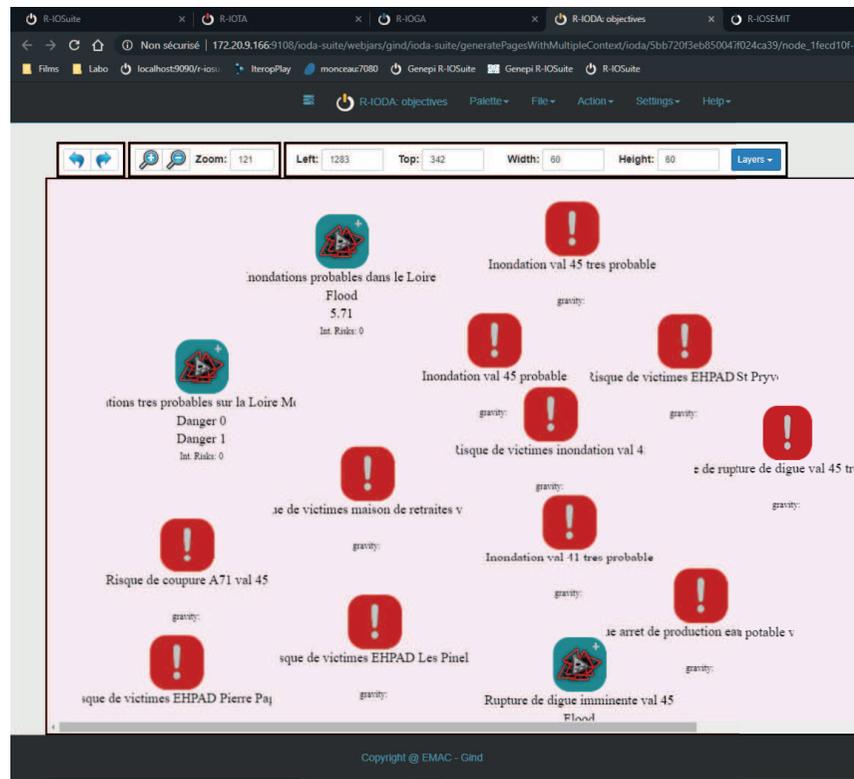
```
define stream addNodeEvent (inputnode object);
from addNodeEvent[inputnode_type=='Danger' and inputnode_name=='Inondation imminente Loiret']#cypher:query("MATCH(n:sensitive_building) WHERE n_altitude < $1 and n_type = 'Retirement home' WITH distance(point({n_long,n_lat}), point({$2,$3})) AS dis WHERE dis < $4 RETURN nn", 'Loire Flooding response', 'resCypher', inputnode_threshold, inputnode_long, inputnode_lat, inputnode_rayon) select resCypher as model, 'Loire Flooding response' as collaborationName, 'Loire Flooding' as knowledgeSpaceName, 'Submersion Retirement home Loiret' as node_name, 'characteristic' as node_role0, 'risk' as node_role1, stationLat as node_longitude, stationLong as node_latitude, having not(model is null) insert into addNodeEvent_New;
```

Extrait du modèle de situation correspondant

:Risque id: ris01 nom: Sub. p. d'un enjeu Loiret latitude: 1.9047891 longitude: 47.897324	:Risque id: ris02 nom: Sub. p. d'un enjeu Loir-et-Cher latitude: 1.3351479 longitude: 47.584957
:Risque id: ris03 nom: Sub. t.p. en zone urbaine Loiret latitude: 1.9047891 longitude: 47.897324	:Risque id: ris04 nom: Sub. t.p. en zone urbaine Loir-et-Cher latitude: 1.3351479 longitude: 47.584957
:Risque id: ris05 nom: Coupure imminente eau potable Orléans latitude: 1.9995117 longitude: 47.847725	:Risque id: ris06 nom: Coupure imminente autoroute A71 latitude: 1.856553 longitude: 47.891591
	:Risque id: ris07 nom: Rupture Digue d'Orléans imminente latitude: 2.035 longitude: 47.855

FIGURE 4.10 – Les règles d'interprétation utilisées pour les six risques déduits dans le cadre du scénario GÉNéPi

PARTIE OBJECTIFS DU MODÈLE DE SITUATION



PARTIE OBJECTIFS DU MODÈLE DE SITUATION, VUE DE LA COP

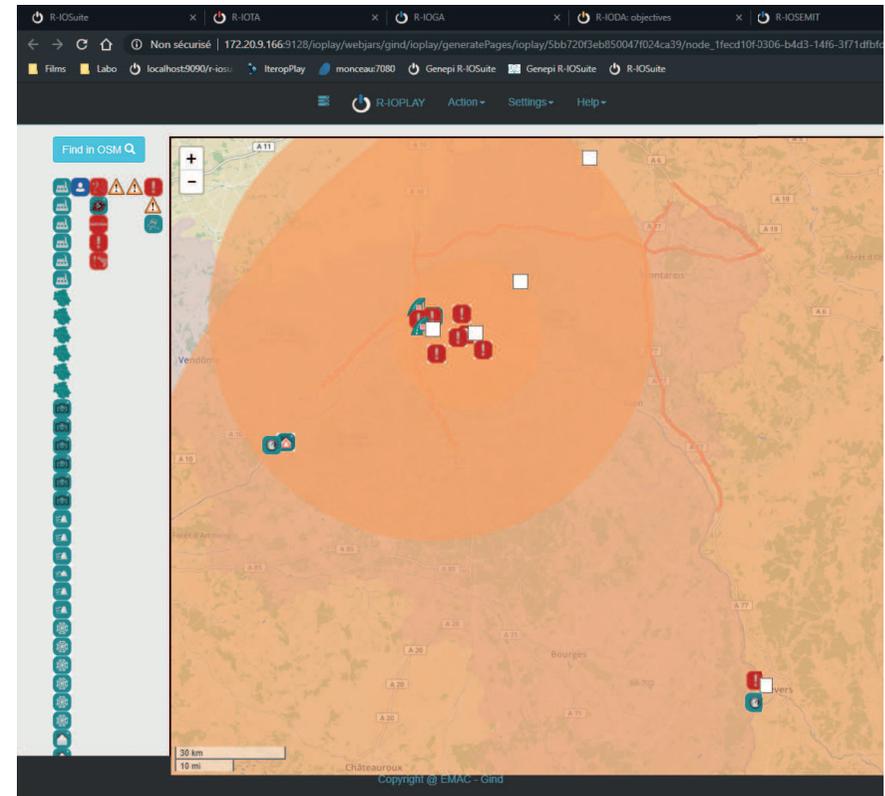


FIGURE 4.11 – La partie Objectifs du modèle de situation mise à jour automatiquement par le système d'information proposé

- un risque imminent de rupture de digue à Orléans déduit directement, sans condition, du danger imminent d'inondation dans le Loiret ; la règle est directement dictée par une règle métier.

Toutes les règles, testées sur le scénario GÉNéPi et décrites en langage SIDDHI QL, sont disponibles en Annexe I. Quelques règles ont aussi été testées en parallèle, comme, par exemple, la règle permettant de vérifier que la mesure « évacuer Orléans » est bien appliquée. Cette règle compare les évènements de trafic au trafic moyen journalier pour détecter des ralentissements et donc une évacuation.

Chaque instance ajoutée au modèle de la situation instancie l'un des concepts de la partie **Objectifs** du métamodèle présenté à la Figure 4.6. Ces instances, présentées à gauche des Figures 4.9 et 4.10, sont visibles sur la Figure 4.11. Cette dernière présente deux vues du modèle de la situation entre Orléans et Givry. A gauche, la vue énumère les Dangers (en verts) et les Risques (en rouges) menaçant le territoire touché. A droite, les instances sont présentées sur une carte jouant le rôle de COP. Les zones oranges représentent les zones de Danger, les icônes vertes les Enjeux (de la partie **Contexte**) utilisés pour déduire les Risques, représentés par des icônes rouges.

4.4 L'utilisation du modèle de situation mis à jour

Cette section présente des travaux du centre de recherche et des partenaires du projet GÉNéPi. Il ne s'agit pas de présenter de nouvelles contributions, mais de mettre en évidence le potentiel d'utilisation des résultats obtenus. Cette section trace donc quelques connections explicites avec des travaux de recherche et d'innovation en cours.

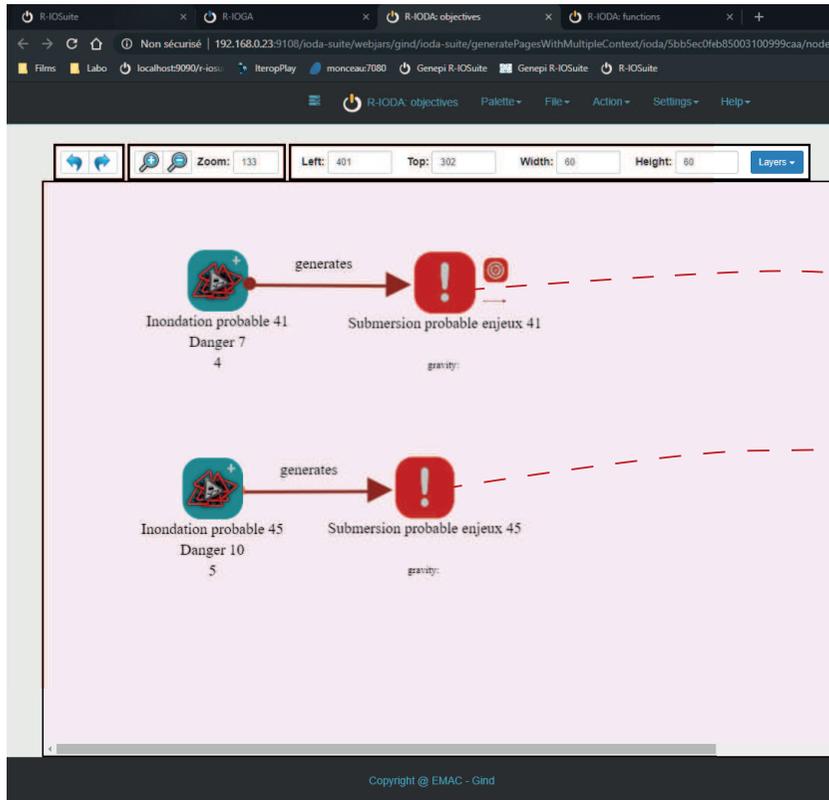
4.4.1 Le modèle de la situation de crise pour déduire un processus de réponse adapté

Dans le cadre de GÉNéPi, le modèle de situation, obtenu grâce à notre système d'information, est transmis à l'IRIT.

L'équipe de recherche de ce laboratoire utilise son propre métamodèle pour décrire une situation de crise. Une transformation de modèles, mise au point entre les concepts de notre métamodèle et les concepts de l'IRIT, a donc du être mise en place au sein de RIO-Suite, au bénéfice du projet GÉNéPi.

Au sein de RIO-Suite, le modèle de situation est mis à disposition du « module de déduction » (cf. Figure 4.5).

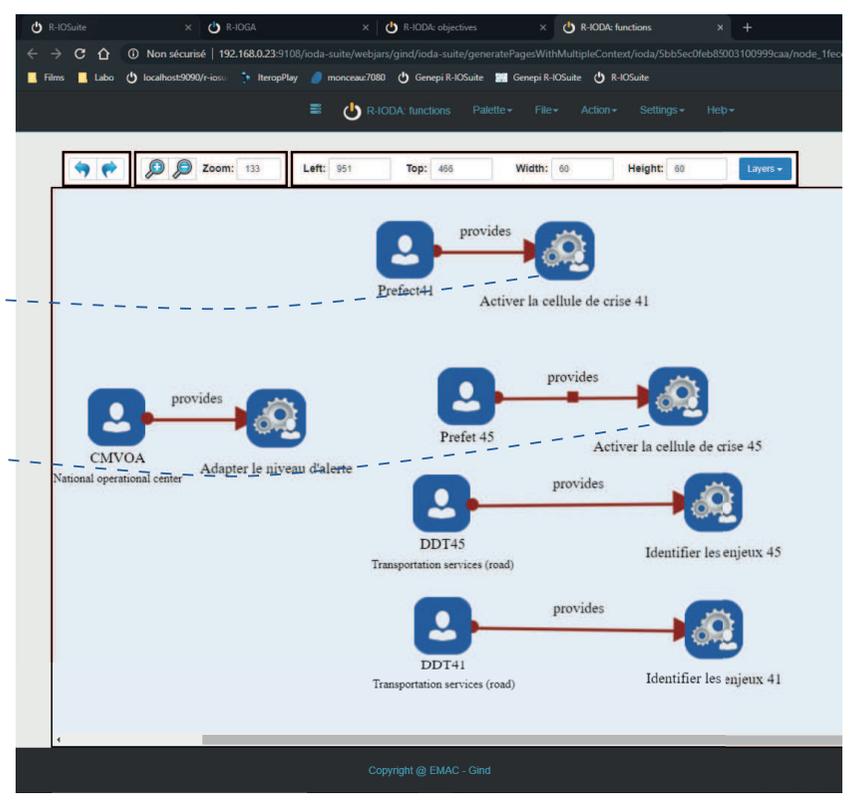
PARTIE OBJECTIFS DU MODÈLE DE SITUATION



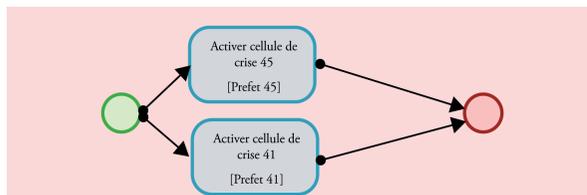
EXTRAIT DE LA BASE DE CONNAISSANCE



PARTIE PARTENAIRES DU MODÈLE DE SITUATION



PROCESSUS DÉDUIT GRÂCES AUX RELATIONS LIANT LES INSTANCES LES UNES AUX AUTRES



— ➤ Lien «near» entre une instance de la base de connaissance et une instance du modèle de situation

- - ➤ Relation «contributes to prevent» entre un Risk et une Capacité

FIGURE 4.12 – Le processus déduit par le "module de déduction" de RIO-Suite pour prévenir les risques d'inondation probable dans le 45 (Loiret) et le 41 (Loir-et-Cher)

Le module de déduction fait appel à une base de connaissances constituée au fil des exercices de gestion de crise, ou plus généralement, au fil des collaborations. Chaque instance du modèle peut ainsi être associée à une instance de crise passée. Par exemple, le risque de « coupure imminente de l'A71 » peut être rapproché d'un risque, plus abstrait, de « coupure d'une route nationale ». Ainsi, si une capacité connue en phase de préparation peut répondre à ce dernier risque, tout en étant liée à une capacité réellement disponible en phase de réponse, un processus de réponse adapté peut être déduit.

La Figure 4.12 montre un exemple de déduction de processus de réponse. L'interface en haut à gauche montre les instances correspondant à la partie **Objectifs** du métamodèle. Ellesinstancient les concepts de Danger en vert et de Risque en rouge. L'interface en haut à gauche montre les instances correspondant à la partie **Partenaires** du métamodèle. Ellesinstancient les concepts Partenaire et Capacité, représentés respectivement par une tête et des engrenages.

Un **Danger** génère un **Risque** et un **Partenaire** propose des **Capacités** pour prévenir ces Risques.

Les risques étant ajoutés automatiquement par notre système d'information pendant la crise, les capacités ne peuvent pas être liées à eux en phase de préparation. A leur création, les capacités sont donc rapprochées d'instances plus abstraites de la base de connaissance. Ainsi, les relations, en bleues sur la Figure 4.12, sont ajoutées en amont de la crise. Ici, une cellule de crise sera activée si un risque de type « flood likely » est identifié.

A leur création, les risques générés sont eux aussi rapprochés d'instances plus abstraites de la base de connaissance. Les règles d'interprétation présentées à la Figure 4.10 génèrent ainsi un attribut de plus : l'identifiant d'un concept similaire connu. Ici, le risque « submersion probable enjeux 41 » est considéré proche de l'instance de risque « flood likeliy 41 ». Grâce à ce dernier lien, en rouge sur la Figure 4.12, le module de déduction de Rio-Suite peut automatiquement proposer la capacité « activer cellule de crise 41 » pour prévenir le risque « submersion probable enjeux 41 ». Le processus, présenté en bas à gauche de la figure, peut alors être déduit.

4.4.2 Le modèle de la situation de crise pour mettre à jour la COP en cellule de crise

Le modèle est aussi transmis au module RIO-Play (*Field assistant*) de RIO-Suite chargé de mettre à jour la COP affichée en cellule de crise.

La forme des informations disponibles sur la COP dépend des attributs de chaque concept instancié. Par exemple, parmi les concepts dédiés à décrire le contexte de la collaboration de crise (cf. Figure 3.3 :

- les nœuds de réseaux, les bâtiments sensibles, les individus et les risques (associés à leur enjeu) sont représentés par des « points » et une icône dédiée ;

4. Cas d'application : une crue centennale en Loire Moyenne

- les réseaux, comme le réseau électrique, et les protections, comme les digues, sont représentés sous forme de « polygones » d'une certaine couleur ;
- les communautés, les territoires, les incidents et les dangers sont, quant-à eux, représentés sous formes de « polygones » formant une zone colorée, non opaque, d'une certaine couleur.

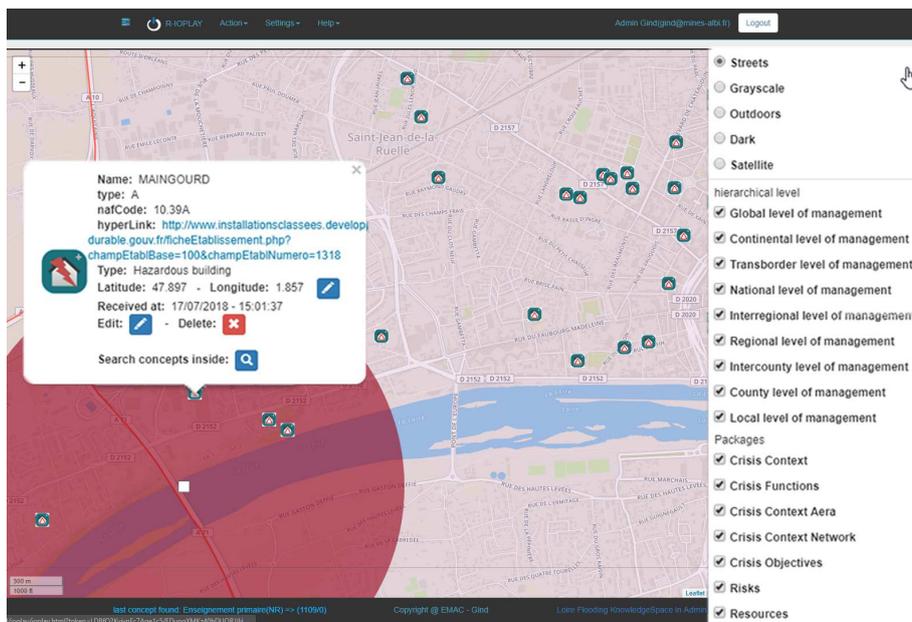


FIGURE 4.13 – Capture d'écran de l'interface RIO-Play adapté à une cellule de crise au niveau départemental, zoom sur la zone inondée proche de l'A71

La Figure 4.13 présente la COP telle qu'elle a été souhaitée par le laboratoire CGI. A ce moment-ci de la réponse à la crise, un bâtiment sensible classé dangereux, Maingourd, est inondé et l'utilisateur peut :

- accéder à la fiche IPPC de l'industrie concernée, grâce au lien disponible sur la fiche descriptive de l'enjeu ;
- adapter la COP à ses besoins courants, en sélectionnant les informations affichées selon leur place dans la hiérarchie au sein de la collaboration, grâce à l'encart à droite de l'écran ;
- modifier une information contenue dans le modèle de situation, grâce à l'action « edit » disponible sur la fiche descriptive.

Dans le cas d'une crue majeure en Loire Moyenne, la hiérarchie des services correspond à la chaîne stratégique illustrée sur la Figure 4.3.

Comme référence pour le projet GÉNéPi, Dolidon (2016a) a documenté la place de chacune des parties prenantes usuelles dans la chaîne stratégique. Par exemple, le Centre Régional d'Information et de Coordination Routière (CRICR) évolue au niveau de la zone de défense alors que la Direction Départementale des Territoires (DDT) répond du niveau départemental.

4.4.3 Le modèle de la situation de crise pour réagir aux imprévus

Le modèle de situation, mis à jour par le système d'information proposé, est aussi transmis au module de surveillance de RIO-Suite, représenté sur la Figure 4.5.

Le module de surveillance, et son interface utilisateur RIO-Ta (*Tracker assistant*), sont chargés d'illustrer l'évolution de la situation de crise. Pour ce faire, le modèle de situation, mis à jour à partir des événements simulés, est présenté à côté d'un autre modèle (le modèle attendu) mis à jour à partir des données provenant de l'orchestration du processus de réponse. Par exemple, si un ordre de « déviation de l'autoroute A71 » est émis, RIO-Ta peut supprimer le risque de « submersion de véhicule sur l'A71 » du modèle attendu dès la validation de la tâche. Par contre, le risque sera supprimé du modèle de situation seulement si les données de trafic de cette partie de l'autoroute s'avèrent nulles. Ainsi, le module de surveillance sera capable d'alerter les cellules de crise lorsque l'écart entre le modèle attendu et le modèle de situation dépasse un certain seuil (Barthe, 2013). Un nouveau processus de réponse, plus adapté à la situation présente, pourra alors être déduit.

La qualité du modèle de situation impacte directement la capacité de RIO-Suite, et donc de la collaboration, à suivre la dynamique de la crise en cours. Les producteurs d'événements, connectés au système d'information proposé, doivent donc couvrir tous les aspects de la situation de crise en cours : dans le cas contraire, un écart pourrait ne pas être détecté et un processus de réponse inadapté pourrait continuer à être déroulé par les parties-prenantes.

Dans le cas du projet GÉNéPi, la demande de déduction d'un nouveau processus de réponse est demandée à l'IRIT, via la mise à jour automatique de leur base de données. Les événements de suivis générés par l'orchestration du processus sont quant-à eux reçus du logiciel Iterop.

4.5 Les performances du système d'information proposé

Pour finir, nous souhaitons vérifier la capacité du système d'information implémenté à suivre la dynamique d'une situation de crise. Aujourd'hui, en cas de crue majeure, en amont du pic de crue, les décideurs du niveau stratégique (cf. Figure 4.3) sont informés lors d'audioconférences journalières ou bi-journalières (Dolidon, 2016a). Notre objectif serait d'arriver à (i) collecter, (ii) interpréter et (iii) afficher les événements utiles aux décideurs, en moins d'une minute, sur la COP disponible en cellule de crise.

Le scénario mis au point par les partenaires du projet GÉNéPi, déroulé en Annexe E, prévoit :

- la collecte de 155 événements de type hydrauliques sur un jour et trois stations : Blois, Orléans et Givry (au bec d'Allier) ;
- l'interprétation des événements collectés via l'activation d'une règle de niveau 1 et de cinq règles de niveau 2 sur la ville d'Orléans ;

4. Cas d'application : une crue centennale en Loire Moyenne

- le chargement des 1122 enjeux reconnus par les autorités sur le département du Loiret ;

Ce scénario réaliste a été validé par le SPC Maine-Loire pour les données hydraulique et par le CEREMA Ouest pour les règles métiers utilisées. Il a été joué trois fois⁶ pour estimer le temps nécessaire à un évènement pour être collecter, interpréter et afficher en cellule de crise. Les résultats sont présentées sur la Figure 4.14.

	Collecte & interprétation	Visualisation	Total
Test n°1	47s	222s	269s
Test n°2	68s	190s	258s
Test n°3	47s	171s	218s
Moyenne :	54s	194s	248s

FIGURE 4.14 – Les temps mesurés lors de la collecte et l'interprétation de 155 évènements, l'activation de 6 règles et la mise à jour de la COP sur le département du Loiret, contenant au préalable 1122 enjeux

La Figure 4.14 nous permet de conclure que :

- 155 évènements envoyés en parallèle par trois capteurs différents, à raison d'un toutes les millisecondes, prennent en moyenne 54 secondes pour être collectés et interprétés par le système d'information implémenté. Ils activent une règle seuil de niveau 1 et cinq règles de niveau 2 qui interrogent pour cela la base de données orientée graphe sur les enjeux présents dans la zone de danger ;
- les informations obtenues, sous la forme d'instances du modèle de la situation de crise, mettent en moyenne 194 secondes à s'afficher sur la COP présente en cellule de crise, via l'interface RIO-Play.

L'objectif est de donner un ordre d'idée du temps nécessaire aux producteurs d'évènements, au module d'interprétation ou au gestionnaire d'information pour informer les décideurs d'un fait nouveau. Ce test n'utilise que des évènements de type hydraulique, malgré la variété réelle des données disponibles (mesure de trafic, tweets, ...). Mais si les évènements sont reçus sous un même et unique format, comme le prévoit notre hypothèse 3, le type d'évènement reçu n'affectera pas les performances de notre système d'information. Par contre, ces nouvelles sources de données multiplieraient le volume d'information à traiter et sans notre hypothèse sur la capacité de traitement infinie de notre système d'information (cf. hypothèse 2) cela démultiplierait très vite le temps nécessaire à l'interprétation.

Finalement, ce scénario, proche de la réalité, utilisant de réelle règles métier, permet de collecter, interpréter et mettre à jour une COP en moins de cinq minutes. C'est cinq fois plus que le temps espéré initialement, mais beaucoup mieux que ce qui se fait humainement selon le mode de communication actuellement en place.

6. Sur la version du 01 janvier 2018 de RIO-Suite, lancée sous Windows 10 avec un processeur de 2.80 GHz et une mémoire vive de 16 Go

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce manuscrit visent à soutenir les cellules de crise activées suite à un évènement majeur. Pour représenter la situation de crise, soutenir la collaboration des parties-prenantes et suivre les évolutions de la crise, nous proposons de profiter des données disponibles sur les réseaux informatiques. Pour cela, nous définissons et implémentons un système d'information capable de collecter et interpréter des données brutes pour déduire un ensemble d'informations formalisé, tenu à jour en temps réel, malgré le volume, la variété, la vélocité et la véracité des données et des informations manipulées.

La Figure 5.1 présente le système d'information proposé qui combine les règles d'interprétation d'un moteur Complex Event Processing (CEP) à un métamodèle configurable selon la nature de la crise. Le chapitre 3 présente, étape par étape, l'architecture choisie et le chapitre 4 illustre son fonctionnement sur un cas réaliste de crise : une crue centennale en Loire Moyenne. Les contributions de nos travaux nécessaires à la définition et l'implémentation d'un tel système d'information sont listées ci-dessous et représentées à droite de la Figure 5.1 :

1. l'amélioration du métamodèle choisi, à partir des nombreux éléments de contexte rapportés par le Centre d'Etude et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) sur les types d'enjeux vulnérables à une crue en Loire Moyenne ;
2. la mise en pratique du principe de déduction : « Danger x Enjeu = Risque » grâce à la science d'analyse d'évènements complexe (CEP) couplée à l'utilisation d'un métamodèle commun à tout type de crises, ou plus généralement, tout type de collaboration ;
3. la mise au point d'un cas d'étude *réaliste* grâce à dix règles d'interprétation représentatives de règles métiers utilisées en 2016 (Dolidon, 2016a), des évènements hydrauliques correspondant à une crue centennale en Loire Moyenne, validés par deux Services de Prévision des Crues (SPC) de la région, et des évènements trafic récupérés à la source par le CEREMA Ouest ;

Pour contrôler les 4Vs du Big data, plusieurs composants du système d'information proposé sont mis à contribution :

1. le mécanisme publish/subscribe, utilisé à l'étape de collecte, permet de suivre en temps réel les évolutions de la situation de crise (*vélocité*), tout en recevant des évènements émis par topics, par de nombreuses sources connues ou inconnues (*véracité*) ;
2. le métamodèle choisi permet de formaliser l'ensemble des informations mises à disposition des décideurs, tout en limitant le nombre de concepts à instancier pour décrire la situation de crise (*volume* et *variété*) ;

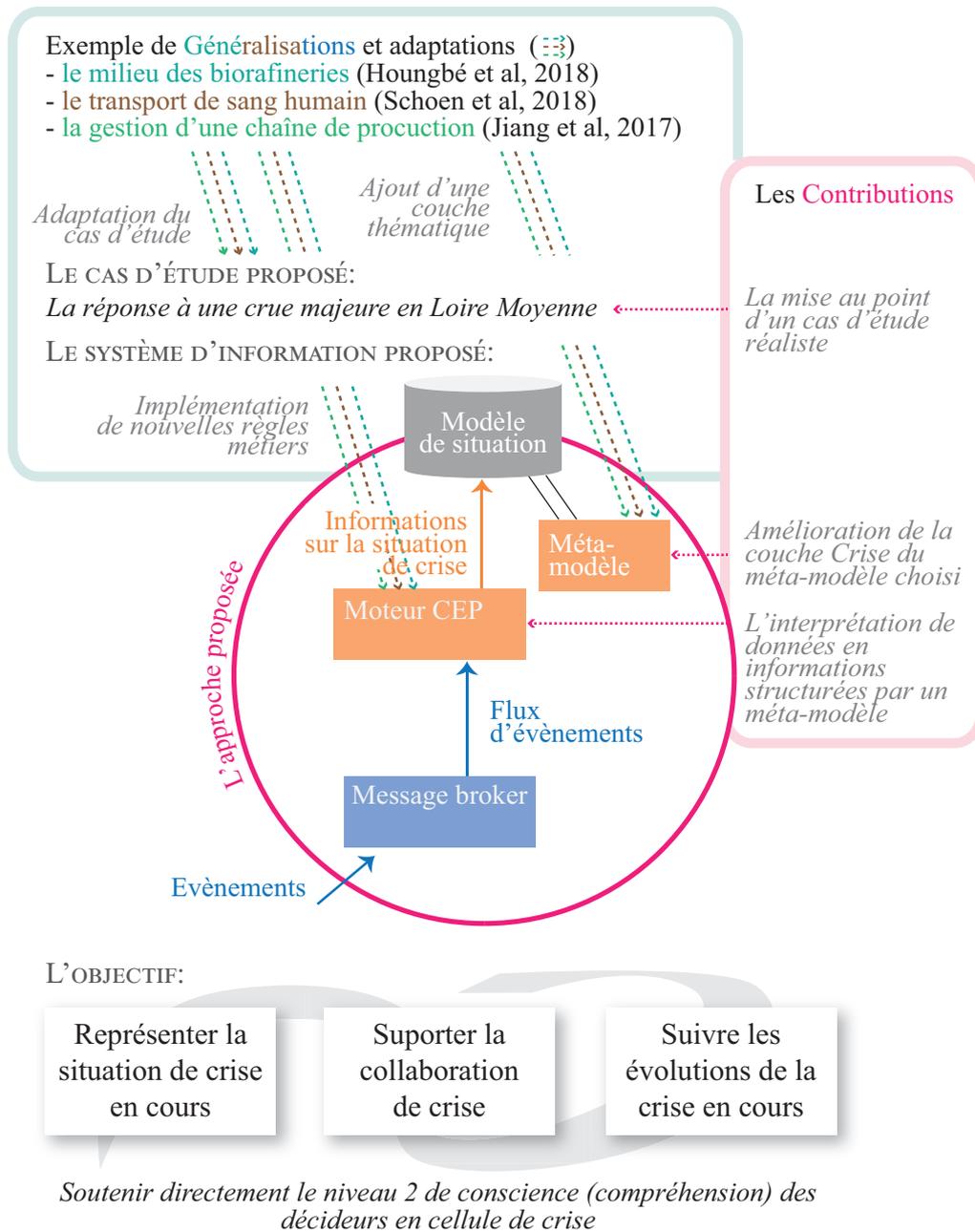


FIGURE 5.1 – L'approche proposée, les contributions identifiées et quelques exemples de généralisations possibles

-
3. le moteur CEP permet d'associer chaque règle d'interprétation à un agent Event Processing Agent (EPA) responsable d'un type d'évènement en particulier : le nombre d'évènements à analyser par agent EPA diminue (*volume*). Chaque règle activée émet 1 évènement complexe agrégeant n évènements analysés : le nombre d'évènements émis est donc inférieur au nombre d'évènements reçus par les EPA (*volume*). Des fenêtre temporelles permettent d'agréger des évènements de même type sur une fenêtre de temps fixe ou glissante (*vélocité*). Et, les règles d'interprétation utilisées ont été élaborées à partir de règles métiers utilisées lors de situations de crise réelles (*véracité*).

Comme illustré sur la Figure 5.1, le système d'information proposé peut facilement être transposé à de nouveaux cas d'étude. Dans le domaine de la gestion de crise, seules les règles devront être généralisées ou adaptées à un nouveau type de crise ou une nouvelle réglementation. Dans d'autres domaines, de nouveaux concepts propres aux nouvelles situations collaboratives, et de nouvelles règles d'interprétation permettant leur instanciation devront être mis en place. De nouveaux évènements informatiques pourront aussi être simulés pour tester les différentes configuration du système d'information. Des travaux comme ceux de [Jiang et al. \(2017\)](#) en chaîne de production, [Schoen et al. \(2018\)](#) pour le transport de produits sanguins labiles ou [Houngbé et al. \(2018\)](#) dans le milieu des bioraffineries, pourraient ainsi facilement adapter la méthodologie proposée à leur travaux.

Pour la suite plusieurs perspectives d'évolutions sont envisagées. Ainsi, nous nous intéressons maintenant à :

1. limiter la charge informationnelle pesant sur les décideurs en cellule de crise en sélectionnant les informations les plus pertinentes, à un moment donnée de la crise, pour une cellule donnée, selon : (i) les phases caractéristiques d'une phase de réponse à une crise, et (ii) les concepts de notre métamodèle les plus adaptés au besoin d'information courant des cellule de crise ;
2. projeter le modèle de la situation de crise dans le futur en projetant le résultat attendu du processus de réponse à la crise et en modélisant les évolutions naturelles des éléments composants le théâtre de crise. Cette dernière étape est multi-disciplinaire et conviendrait à un projet de recherche multi-acteurs ;
3. adapter le système d'information proposé aux contraintes engendrées par la détection et l'utilisation des évènements émanant des réseaux sociaux, en complément des données issues de capteurs physiques. Cette fonctionnalité, demandée par les parties-prenantes, fera l'objet d'une thèse hébergée au laboratoire Centre de Génie Industriel (CGI) entre 2018 et 2021 ;
4. ajouter au système d'information une méthode d'apprentissage des situations de crise passées pour améliorer les méthodes d'interprétation et les méthodes de projection existantes (si ces dernières ont pu voir le jour). Cette étape, aussi souhaitée par les parties-prenantes usuelles à une crise, fera l'objet d'un nouveau projet de recherche lancé en 2018 et appelé SANCTUM.