Diagnostic des Dysfonctionnements des Plans de Secours pour la Gestion des Risques Majeurs

Clément Girard

NNT : 2014 EMSE 0763

THÈSE

présentée par

Clément GIRARD

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

DIAGNOSTIC DES DYSFONCTIONNEMENTS DES PLANS DE SECOURS POUR LA GESTION DES RISQUES MAJEURS

soutenue à Saint-Étienne, le 07 Novembre 2014

Membres du jury

Président :	Valérie LAFOREST	Maître de Recherche, ENSM-SE
Rapporteurs :	Laurent PERRIN	Professeur, ENSIC Nancy
	Emmanuel GARBOLINO	Maître-Assistant, Mines ParisTech
Examinateur(s) :	Sophie SAUVAGNARGUES	Professeur, École des Mines d'Alès
Directeurs de thèse :	Jean-Marie FLAUS	Professeur, UJF-Grenoble
Encadrants de thèse:	Éric PIATYSZEK	Chargé de Recherche, ENSM-SE
	Pierre DAVID	Maître de Conférence, Grenoble-INP
Invitée	Sarah GARCIA	Chargée de mission Risques majeurs

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES	O. Roustant, Maître-assistant
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur	INFORMATIQUE	O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCEDES	F. Gruy, Maître de recherche	IMAGE, VISION, SIGNAL	JC. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche	GENIE INDUSTRIEL	A. Dolgui, Professeur
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	D. Graillot, Directeur de recherche	MICROELECTRONIQUE	S. Dauzere Peres, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

ABSI	Nabil	CR		CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2		FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR		SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2		FAYOL
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR2	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSE	David	PR1	Sciences et génie des matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR2	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR2	Génie Industriel	CMP
FEVOTTE	Gilles	PR1	Génie des Procédés	SPIN
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles			FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre			CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	CR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno			CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)		CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)		FAYOL
ROUX	Christian	PR		CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzystof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

Mise à jour : 28/03/2014

하늘이 무너져도 솟아날 구멍이 있다.
Même si le ciel tombe sur toi, il y a toujours un trou par lequel tu peux t'échapper.
호랑이에게 물려가도 정신만 차리면 산다.
Même si tu es attrapé par un tigre, tu peux survivre si tu gardes ton calme.
티끌모아 태산.
On peut construire une montagne en rassemblant des grains de poussière.
호랑이도 제 새끼 둔 곳을 생각한다.
Même un tigre pense à l'endroit où il a laissé ses petits.

À Rebecca, mon frère, mes parents,
ma famille

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier toutes les personnes qui m'ont épaulé durant ces trois années.

Je voudrais tout d'abord remercier la Région Rhône-Alpes qui, de par son financement, a rendu possible ces travaux.

Je remercie Valérie Laforest qui, bien que je sois à Grenoble, a toujours eu un regard sur ma thèse et a su me conseiller aux moments opportuns.

Je remercie Jean-Marie Flaus d'avoir encadré ces travaux de recherche, de m'avoir laissé libre d'explorer des champs de compétences qui ne sont pas ceux de ma formation initiale, de m'avoir permis de me former aux développements d'application logicielle et d'avoir su m'aiguiller tout au long de cette thèse.

Mes remerciements vont ensuite à Éric et Pierre, qui m'ont accompagné différemment lors de ces travaux. Éric pour m'avoir apporté son expérience terrain et permis de tester la démarche développée avec deux communes (l'une en Rhône Alpes, l'autre dans le Languedoc-Roussillon) et Pierre pour ses compétences techniques et son suivi au quotidien.

Je remercie Laurent Perrin et Emmanuel Garbolino d'avoir accepté de rapporter mon travail et d'avoir souligné des points d'amélioration à celui-ci.

Je tiens à remercier Sophie Sauvagnargues pour avoir examiner mon travail de thèse.

Je remercie Sarah Garcia et Gregory Celles pour leur temps et de m'avoir permis d'illustrer mon cas d'études, et particulièrement Sarah pour avoir participé au Jury de thèse.

Je remercie également mes Parents qui ont été là du début à la fin de cette expérience, et qui étaient peut-être plus soucieux que moi de l'avancement de ma thèse. Ils étaient là même avant et j'espère qu'ils le resteront pour longtemps. Je remercie également Bérangère, qui a su m'apporté un regard avisé sur le travail de chercheur. Je remercie les membres de ma famille qui se sont inquiétés pour moi pendant ces 3 ans et dont je me suis éloigné.

Cette thèse sous contrat de l'école des mines s'est déroulée en majeur partie à Grenoble, mais je tiens à remercier tous les membres de l'équipe PIESO, qui m'ont accueilli à bras ouvert à chaque visite à l'Institut Fayol et notamment Alicja et Zahia.

J'en profite également pour remercier Marie-Jo du laboratoire G-Scop, pour avoir assuré l'intendance de mes activités, tout comme Amandine, Keira et Souad.

Avant de passer aux remerciements moins formels, je tiens à remercier une nouvelle fois la Région Rhône Alpes pour m'avoir permis de mener un projet d'échange avec le Professeur Benoît Robert du Centre Risque et Performance de l'École Polytechnique de Montréal. Je remercie tous les membres du centre pour m'avoir accueilli comme l'un des leurs (photo officiel du CRP à l'appui). Egalement Nick Virgillo, pour avoir été un professeur soucieux et à l'écoute.

Je remercie Dominique Fleury, pour m'avoir donné le goût de la recherche il y a de ça 4 ans, et d'avoir été là aussi souvent que possible, malgré nos contraintes respectives. Au même titre je remercie Stefania, d'avoir été ma halte Parisienne et je remercie aussi Vinca.

Je remercie Damien avec qui j'ai passé presque 4 ans, comme camarade de classe et colocataire, ainsi que Caroline pour ses contacts et sa visite du HCFDC.

Je remercie Matthieu, Angelica et Yu Chan d'avoir été présent à Montréal ainsi que Bertrand, et Benoît, qui m'ont permis de profiter pleinement de mon temps libre au Canada. Également Jacob et Halston pour leur accueil aux États-Unis. Merci à Lucile et Sophie pour avoir répondu à mes sollicitations concernant les démarches administratives pour me rendre au Canada.

« Sportivement » ma vie à Grenoble a été impulsée par Maud, Marine, Olivier, Bertrand, Nico et Théo avec lesquels j'ai pris un plaisir immense à grimper. Ils ont toujours été là pour m'assurer et rattraper mes chutes.

Je tiens particulièrement à remercier Anne-Laure, Michaël et Khalil pour m'avoir aidé à « programmer » (surtout corriger mes bugs) ainsi que Boris et Nico pour les débats conceptuels sur la programmation.

Je remercie Manu d'avoir assuré la traduction en anglais de certains de mes travaux (pas les articles sinon Pierre n'aurait pas eu à faire ce travail) et d'avoir également su être une oreille attentive tout comme Maud (sa sœur).

Je remercie Maud d'avoir toujours été là, surtout dans les moments difficiles, mais aussi dans les meilleurs moments. Je la remercie de m'avoir nourri. Je la remercie également d'avoir organisé des événements comme lorsque j'ai reçu ce camion de pompier, ou ai eu la surprise de trouver mon entrée remplie de ballons de baudruche. Je la remercie de nous avoir présenté Chantal et Michel et je remercie Murielle pour son invitation.

Je remercie Marine d'être celle qu'elle est, pour son naturel, sa simplicité et la fraîcheur qu'elle m'a apportée (Manu aussi *a posteriori*).

Je remercie Pauline d'avoir pris le temps de relire ce manuscrit et sans laquelle, il ne serait pas d'une aussi bonne qualité. Je la remercie également de m'avoir motivé ces derniers mois et d'avoir cru en moi.

Je remercie Boris, la hotline SNCF de mes voyages de 7h entre Grenoble et Saint-Étienne, Nico pour son humour subtile, Yacine pour sa délicatesse, Karim pour le rayon de soleil sucré qu'il apporte aux gens, Yohann pour avoir été ma référence mathématique et Hatem pour nos longues conversations sur la vie en générale autour d'un café à la Gazetta Caffe.

Je remercie Lucile pour sa touche 80', Lucie, Ingwild, Chloé, Ben, Gab pour des parties de cartes de folies et nos échanges sur le Québec et Natalia pour toutes les soirées passées au Vertigo.

Je remercie également Bertrand et Ariel pour leur théorie sur la drague, le couple et l'amour.

Je remercie aussi Golnoosh et Samira de nous avoir fait partager leur culture.

Je remercie également Jeremy, Marius, Claudie, Maggiore, Mathilde, Paul, Camille, Lisa d'être resté des amis fidèles et de pouvoir profiter de mon havre de paix lorsque je retournais à Caen. Une spéciale dédicace à Pauline et Ludo, d'être là depuis... toujours à mes côtés, merci.

Je remercie particulièrement Lisa, qui malgré son éloignement a toujours eu une petite pensée pour moi.

J'en profite pour remercier Vincent d'avoir été là pendant les deux premières années de cette thèse et de m'avoir fait découvrir, l'univers de la banque, un monde que je ne connaissais pas.

Je remercie Lulu d'être elle-même et d'avoir toujours eu cette petite attention de ne pas venir les mains vides.

J'ai une pensée aussi pour Annabelle et Cyril, qui depuis mon premier séjour au Canada n'ont jamais cessé d'être un soutien sans faille.

Je remercie l'association AFCGI et ses membres pour l'organisation des cours de Coréen et les activités culturelles qu'elle a proposées. Je remercie d'avance Yee Seul, Bongsik et Youngkyun.

Je remercie les membres plus ou moins éphémères de marinette et son orchestre et du groupe mythique "The BadBoys" (Monsieur Jasseny en particulier).

Je remercie tous ceux qui ont participé à mes pré-soutenances et à la confection du pot de thèse... même si il n'y en avait pas assez, et toutes les personnes qui m'ont adressé leurs encouragement pour cette journée.

J'en oublie certainement, merci à tous.

Résumé

Face à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de grande ampleur, l'Organisation des Nations Unies demande à ses pays membres de développer des sociétés qui puissent être à même de faire face à ces événements. En France, depuis 2004 et la loi de la modernisation civile, l'ensemble du processus de réponse à un événement majeur a été revu, pour permettre une meilleure réponse des différents niveaux d'autorités publiques (zonales, départementales et locales) face à de tels événements. L'échelon local, avec à sa tête le Maire, constitue « la sentinelle avancée de la sécurité » [1] ; il est au plus proche des événements de sécurité civile. À ce titre, la réponse à une situation d'événement de sécurité civile, même si elle peut être menée à un niveau plus large, trouve toujours sa source au niveau communal. C'est pourquoi, la loi de 2004 impose aux collectivités locales de réaliser un Plan Communal de Sauvegarde (PCS), qui décrit l'organisation mise en place par la commune pour garantir l'information, l'alerte, la protection et le soutien de la population.

Ces travaux de recherche proposent une méthode d'évaluation *a priori* de l'organisation locale d'urgence, pour permettre aux instances décisionnaires communales d'identifier des points vulnérables dans leur organisation et ainsi leur fournir une aide à la décision notamment lors de leur préparation. Cette méthode d'évaluation repose sur le formalisme de la modélisation Fonction-Interaction-Structure (FIS) [2], permettant de représenter les liens fonctions-ressources d'un système et de générer des analyses de risques. Cette modélisation permet, d'une part, d'appréhender la complexité des éléments mis en jeu dans l'organisation de gestion d'événements de sécurité civile et d'autre part sert de base pour les mécanismes d'évaluation. Ces derniers sont quant à eux supportés par le formalisme des arbres de défaillance qui combine les défaillances de fonctions, aux défaillances des ressources qu'elles emploient.

Cependant, le formalisme des arbres de défaillance est limitant, car il ne propose qu'une évaluation de la défaillance à deux états discrets (complètement nulle ou complètement avérée). C'est pourquoi, ces travaux de recherche se sont intéressés à la conception d'une méthode d'évaluation à base d'arbre de défaillance multi-états, c'est-à-dire capable de caractériser la dégradation d'une défaillance sur plus de deux états discrets. Ceci a été réalisé

1. Expression employée par MM. Xavier Prétot et Marion dans « la sécurité civile en temps de paix »
2. Flaus, J.-M. (2011). A modelling framework for model based risk analysis. In ESREL (pp. 1533–1540). Troyes - France.

en s'appuyant sur la théorie des systèmes multi-états[3] qu'il a fallu intégrer à la méthode de modélisation retenue. Cela se traduit par une nouvelle définition des événements et des portes pour les arbres de défaillance utilisés dans la modélisation FIS.

Afin d'alimenter la démarche, un questionnaire d'évaluation des ressources a été créé, prenant en compte l'aspect multi-états de leurs défaillances. Les résultats de la dégradation multi-états des fonctions sont quant à eux présentés par un outil de visualisation sous forme de tableau de bord. Ainsi, il est alors possible de caractériser plusieurs états de dégradation des fonctions clés du plan d'urgence et de guider le choix des actions d'amélioration des plans.

3. Lisnianski, A., & Levitin, G. (2003). Multi-State System Reliability (p. 358). Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Table des matières

Glossaire

AMDEC : **A**nalyse des **M**odes de **D**éfaillance, de leur **É**ffets et de leurs **C**riticités

APR : **A**nalyse **P**réliminaire de **R**isque

ARIA : **A**nalyse, **R**echerche et **I**nformation sur les **A**ccidents

BARPI : **B**ureau d'**A**nalyse des **R**isques et **P**ollutions **I**ndustriels

COS : **C**ommandant des **O**pérations de **S**ecours

CSP : **C**old **SP**are gate - *Porte caractérisant la redondance*

DDRM : **D**ossier **D**épartemental sur les **R**isques **M**ajeurs

DDSC : **D**irection de la **D**éfense et de la **S**écurité **C**ivile

DOS : **D**irecteur des **O**pérations de **S**ecours

EMA : **E**nsemble **M**obile d'**A**lerte

FEMA : **F**ederal **E**mergency **M**anagement **A**gency - *Agence Fédérale de la Gestion d'Urgence*

EPCI : **É**tablissement **P**ublic de **C**oopération **I**ntercommunale

FDEP : **F**unctional **DEP**endancy gate - *Porte de dépendance fonctionnelle*

FIS : **F**onction **I**nteraction **S**tructure

ICAM : **I**ntegrated **C**omputer **A**ided **M**anufacturing - *Conception Intégrée par Ordinateur*

ICPE : **I**nstallation **C**lassée pour la **P**rotection de l'**E**nvironnement

IDEF0 : **I**cam **DEF**inition for **F**unction **M**odeling - *Définition de l'ICAM pour la Modélisation de Fonctions*

IRSN : **I**nstitut de **R**adioprotection et de **S**ûreté **N**ucléaire

ISO : **I**nternational **O**rganization for **S**tandardization - *Organisation Internationale de Normalisation*

KISS : **K**eep **I**t **S**imple, **S**tupid - *Laisse-le simple, stupide*

MEEDDM : **M**inistère de l'**É**cologie de l'**E**nvironnement du **D**éveloppement **D**urable et de la **M**er

MEDDE : **M**inistère de l'**É**cologie du **D**éveloppement **D**urable et de l'**É**nergie

NATEC : **NA**turel et **TEC**hnologique

NASA : **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration - *Administration National de l'Aéronautique et de l'Espace*

ONG : **O**rganisation **N**on **G**ouvernementale

ONU : **O**rganisation des **N**ations **U**nies

ORSEC : **O**rganisation de la **R**éponse de **SÉ**curité **C**ivile

OSSAD : **O**ffice **S**upport **S**ystems **A**nalysis and **D**esign

PCC : **P**oste de **C**ommandement **C**ommunal

PCS : **P**lan **C**ommunal de **S**auvegarde

PPI : **P**lan **P**articulier d'**I**ntervention

PPRN : **P**lan de **P**révention des **R**isques **N**aturels

PPRT : **P**lan de **P**révention des **R**isques **T**echnologiques

PR : **P**oint de **R**assemblement

RAC : **R**esponsable d'**A**ction **C**ommunale

RNA : **R**éseau **N**ational d'**A**lerte

SADT : **S**tructural **A**nalysis and **D**esign **T**echnique - *Analyse Structurelle et Technique de Conception*

SAMU : **S**ervice d'**A**ide **M**édicale d'**U**rgence

SDACR : **S**chéma **D**épartemental d'**A**nalyse et de **C**ouverture des **R**isques

SDIS : **S**ervice **D**épartementale d'**I**ncendie et de **S**ecours

SEQ : **SEQ**uence enforcing gate - *Porte de défaillance séquentielle*

ZAC : **Z**one d'**A**ménagement **C**oncerté

ZI : **Z**one **I**ndustrielle

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction

L'Homme vit dans un environnement où les risques sont de fréquence et d'intensité croissantes. Il développe en permanence des moyens pour contrer les conséquences de tels événements. Une des façons de lutter contre ces conséquences est de s'y préparer. C'est pourquoi pour contrer les conséquences de tels événements, différents niveaux de gestion existent (zonal, départemental ou local). Dans ce cadre, l'échelon local assure un rôle primordiale. Car c'est lui qui est activé au commencement de l'événement et est au plus proche de la situation d'urgence. Il est donc le plus à même pour traiter cette situation dans des délais courts. En France, depuis la loi de modernisation de la sécurité civile de 2004, l'État impose aux collectivités locales de décrire l'organisation de gestion d'événements de sécurité civile dans un document dénommé Plan Communal de Sauvegarde.

Décrire l'organisation communale pour gérer les événements de sécurité civile est une première étape dans la lutte contre les conséquences de ces événements. Mais cela n'assure pas le Maire, responsable de l'administration de sa commune, du bon fonctionnement de l'organisation décrite dans le Plan Communal de Sauvegarde. Bien souvent, il n'est possible de faire ce constat qu'une fois l'événement survenu, après la réalisation du retour d'expérience. Il n'existe actuellement que peu de moyens structurés permettant de définir la capacité de fonctionnement de l'organisation de gestion d'événements avant la mise en œuvre du plan. Les exercices comptent parmi ces moyens. Ils permettent dans une certaine mesure de se préparer, mais sont des processus coûteux à déployer sur le terrain. Il faut donc trouver une alternative pour déterminer cette capacité de fonctionnement.

Pour répondre à ce manque, et fournir aux instances décisionnaires une aide à l'identification des points névralgiques de l'organisation de gestion d'événements, ces travaux de recherche proposent une démarche pour la conception d'une méthode d'évaluation et d'aide à l'amélioration de cette organisation. Cette méthode est présentée à la Figure 1. Elle comprend 3 grandes étapes que sont la description du PCS, son évaluation et la priorisation des actions d'amélioration.

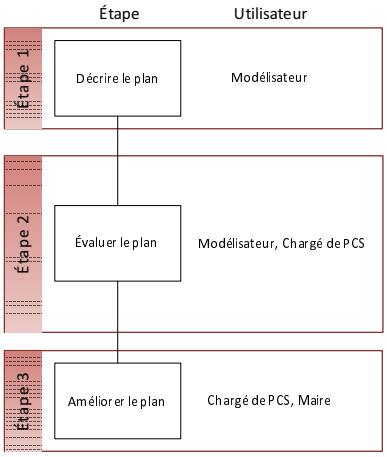


FIGURE 1 – Représentation des étapes de la démarche d'évaluation des plans d'urgence

Les territoires sur lesquels sont mis en place les Plans Communaux de Sauvegarde sont des lieux complexes de gestion d'événements, à cause du nombre d'acteurs, de ressources,

de la spécificité géographique et de la spécificité de l'événement. Le défi posé par la gestion de cette complexité est relevé dans ces travaux, en basant la démarche d'évaluation sur une modélisation des plans. Celle-ci doit pouvoir prendre en compte les spécificités de l'organisation communale de gestion de l'événement, mais aussi être en mesure de prendre en compte les dérives des éléments la constituant. La méthode de modélisation retenue devra donc répondre à ces deux pré-requis. De là, il faudra définir un bon niveau d'abstraction pour la modélisation, afin de ne pas rendre le modèle lourd et inutilisable. Pour cela, un modèle générique de Plan Communal de Sauvegarde a été réalisé.

Usuellement, les dérives des éléments sont évaluées selon deux états : fonctionnement complet ou dysfonctionnement complet. Ceci est un facteur limitant dans l'évaluation des Plans Communaux de Sauvegarde, car cette évaluation manque de précision. En effet en situation réelle, les composants de l'organisation sont rarement totalement dans l'un ou l'autre de ces deux états. Pour relever ce second défi, il est proposé d'adapter la théorie des systèmes multi-états aux analyses de risques usuelles, pour être en mesure de décrire les dérives des éléments du modèle de plan sur plus de deux états et ainsi être en mesure de mieux caractériser la dérive globale du plan.

Le troisième défi est de définir un moyen de récolter l'information sur ces dérives. Cette récolte d'informations se fait auprès des acteurs sur le terrain, ayant conçu ou utilisant le Plan Communal de Sauvegarde, car ils sont les plus à même de caractériser leur outil de gestion d'événements.

Enfin le dernier défi est de proposer une priorisation des dérives des éléments du plan modélisé, afin d'aider les instances décisionnaires à construire et mener des programmes d'amélioration.

L'objet du chapitre 1 est de présenter les principales définitions et les défis à relever par ces travaux de recherche. Le chapitre 2 propose une analyse des outils disponibles dans la littérature pour mener une évaluation des Plans Communaux de Sauvegarde. A l'issue de ce chapitre, certains de ces outils seront choisis comme base de travail. Cependant, ces derniers n'étant pas nécessairement totalement adaptés pour l'évaluation de Plans Communaux de Sauvegarde, des améliorations seront proposées dans la première partie du chapitre 3. La seconde partie de ce chapitre présentera alors l'outil d'évaluation qui pourra être construit. Finalement, la démarche d'évaluation sera testée sur un cas réel. Le chapitre 4 est consacré aux résultats de cette étude.

Chapitre 1

Ville et risques majeurs, les défis de la planification et de son évaluation

Sommaire

Introduction

De nombreuses activités humaines se développent dans des sociétés exposées à des risques majeurs. Ces sociétés au développement rapide, poussent leurs dirigeants à s'intéresser aux problématiques de ces phénomènes menaçant la population. De plus, à cause des changements climatiques mondiaux, les instances gouvernementales internationales s'accordent sur le fait que l'intensité de ces risques est croissante [United Nations, 2011]. Il est donc primordial d'avoir une meilleure compréhension de ces risques menaçant les sociétés modernes, mais aussi des mécanismes de gestion de ces événements.

Ce chapitre présente dans une première partie les fondements du développement des villes et leur exposition croissante aux risques. Cette problématique sera illustrée par la description de différents événements survenus tant au niveau international que national. La deuxième partie de ce chapitre s'intéresse aux mécanismes de gestion de risque. Les mécanismes et concepts généraux des plans d'urgence et de la gestion d'événements de sécurité civile seront d'abord présentés. L'adaptation de ces mécanismes au niveau national sera ensuite détaillé. La troisième partie se focalisera sur un plan d'urgence spécifique de la gestion d'événements de sécurité civile : le Plan Communal de Sauvegarde, qui décrit l'action des autorités publiques au niveau local. La quatrième partie présente les problématiques et enjeux d'une évaluation de ce type de plan d'urgence.

1.1 Ville et risques majeurs

1.1.1 Rapprochement ville/risque

1.1.1.1 Définitions et contexte

1.1.1.1.1 Définition de la ville

Selon l'INSEE, une ville est caractérisée par la continuité du bâti. Elle peut regrouper une ou plusieurs communes (une ville-centre et sa banlieue) et abrite un nombre d'habitants supérieur à 2000. Elle représente une concentration élevée de la population dans une zone géographique. La ville est donc un espace densifié, composée d'une population hétéroclite. En 2009, la moitié de la population mondiale vit dans des villes et cette proportion ne cesse de croître [Stébé et Marchal, 2012].

Une ville est par définition un lieu complexe, mêlant territoire et population, ou autrement dit, oppose les ressources matérielles qui la constitue, à la société qui la caractérise [Grafmeyer et Authier, 2011]. Pour gérer cette complexité tout en y contribuant, la ville est régie par une institution politique (le conseil municipal ou d'agglomération) [Stébé et Marchal, 2012].

Du fait de l'augmentation de la population vivant dans les villes, une extension de la zone urbaine est observée sur le territoire communal. Cette extension de la zone urbaine l'amène à se rapprocher des zones à risque (naturels ou technologiques) [Lewis et Mioch, 2005, Degg, 1992].

Ces phénomènes de rapprochement des centres urbains et des zones dangereuses sont à surveiller de près dans les pays en voie de développement. Avec l'avènement de la société moderne dans ces derniers, il y a une nouvelle émergence de risques, dans des sociétés qui leurs sont plus vulnérables [de Souza, 2000].

1.1.1.1.2 Définition du risque

Un risque est défini par la combinaison d'un aléa (événement potentiel dangereux) et une zone d'enjeux. Le risque majeur est caractérisé par des enjeux humains, économiques ou environnementaux. Il est dit majeur de par la gravité importante qui le décrit et sa faible occurrence, facilitant l'ignorance ou l'oubli de tels événements. Font partis des risques majeurs, les risques naturels, technologiques (décrient au Tableau 1.1) et de transports (personnes ou matières dangereuses) [Prim.net, 2009].

TABLE 1.1 – Classification des risques majeurs environnementaux et industriels [Prim.net, 2009]

Risques naturels	Risques technologiques
avalanche	industriel
feu de forêt	nucléaire
inondation	biologique
mouvement de terrain	rupture de barrage
cyclone	
tempête	
séisme	
éruption volcanique	

1.1.1.1.3 Augmentation des aléas

L'accroissement de l'intensité et de la fréquence des aléas de ces risques majeurs a pu être mis en avant lors de l'assemblée générale des Nations Unies en Janvier 2011 [United Nations, 2011]. Ces 30 dernières années plus de 500 millions de victimes de catastrophes naturelles ont été constatées [Moraes de Araújo, 2004] cité dans [Calixto et Larouvere, 2010].

La plupart des villes actuelles sont dans des régions à forts aléas naturels (tremblement de terre, inondation, glissement de terrain...). 78 des 100 villes les plus peuplées au monde, sont exposées à au moins un des quatre plus importants risques naturels majeurs (tremblement de terre, tsunamis, éruption volcanique, cyclone), et 45 sont exposées à plus d'un risque. 86% des villes des pays développés sont exposées à plus d'un risque majeur [Degg, 1992].

1.1.1.1.4 Augmentation des vulnérabilités

La vulnérabilité peut être caractérisée par le potentiel de dommages, fonction de l'exposition et de la sensibilité, du système [Adger, 2006, Cutter, 1996]. Transcrit au système communal, la vulnérabilité peut être considérée comme la fragilité des composants de la commune face aux risques auxquels elle est exposée. Il peut être noté par exemple la vulnérabilité des populations (exemple âge), des bâtiments, de l'organisation... Il s'agit des éléments les plus préjudiciables à l'organisation en cas de crise [Mcmanus *et al.*, 2007].

Deux types de vulnérabilité peuvent être définis [United Nations Development Programme, 2014] :

- La vulnérabilité humaine désigne le manque relatif de capacités pour une personne ou pour un groupe social à anticiper l'impact d'un aléa, à y faire face, à y résister et à s'en remettre.
- La vulnérabilité structurelle représente la mesure de la susceptibilité d'une structure ou d'un service à être endommagé ou perturbé par un phénomène aléatoire.

La majorité de la population mondiale vit en ville [Stébé et Marchal, 2012], confrontée à un grand nombre d'événements perturbateurs, sociaux, économiques, naturels ou humains. Les villes sont de plus en plus confrontées à ces événements, non seulement de par l'aug-

mentation de la population, mais également de par l'accroissement des vulnérabilités de la société moderne. Les relations d'interdépendance des réseaux de support à la vie (eau, électricité, télécommunications) peuvent être responsables de l'accroissement des vulnérabilités. Par exemple, lors d'événements de sécurité civile, le système organisationnel en place repose essentiellement sur le passage d'information du centre de décision au personnel sur le terrain. Or, la transmission de ces communications se faisant via un réseau de télécommunication, des relations de dépendance plus ou moins fortes à d'autres réseaux se font ressentir (électricité : alimentation principale, carburant : alimentation de secours). La perte d'un de ces réseaux dépendants, peut entrainer des conséquences graves sur le réseau de télécommunication, et sa capacité à réaliser sa première mission : transmettre les informations. Cette mission peut alors se retrouver altérée.

Les villes sont le témoin d'un net manque de bonnes pratiques en matière de développement urbain. Il est donc de l'intérêt commun de réaliser une bonne gouvernance urbaine, à l'échelle locale (les communes) comme nationale. Le citoyen joue un rôle important dans cette gouvernance à cause des droits et des devoirs qui lui incombent. « Les citoyens ont le droit de se sentir protéger [...] mais doivent être conscients de leur responsabilité partagée pour se protéger eux-mêmes » [Degg, 1992]. La conscience publique et politique contribue au développement de sociétés moins vulnérables : c'est la gouvernance urbaine. Composée des principes d'équité, d'efficacité, de transparence, de subsidiarité, d'engagement civique et de sécurité, elle est la clé pour le développement durable et le management des situations d'urgence [Degg, 1992].

1.1.1.1.5 Gestion d'événements de sécurité civile

En cas de survenue d'un risque majeur, des mécanismes de gestion d'urgence, qui diffèrent de la gestion courante, sont mis en place pour assurer l'intégrité humaine et/ou environnementale. Le défi des sociétés est de se préparer à cette gestion d'urgence afin d'éviter d'être dépassées et de tomber dans la crise. C'est pourquoi le terme événement de sécurité civile est préféré au terme de crise.

Les villes sont donc des lieux très complexes de gestion d'événements de sécurité civile. En dépit de la survenue d'événements menaçant la sécurité civile, c'est grâce à eux que les sociétés dans lesquels ils surviennent, gagnent en expérience (de préparation et de gestion). Il est donc important de construire des organisations qui ont la capacité de subir de tels événements tout en étant capables de se reconstruire [Madni et Jackson, 2009].

La section suivante présente un exemple de rapprochement de ville/risques pour le cas d'une Région Française : la Région Rhône-Alpes.

1.1.1.2 Un exemple de villes et risques au niveau de la Région Rhône-Alpes

La Région Rhône-Alpes est la deuxième région de France en termes de superficie, de population et d'industries [INSEE, 2009b]. Elle comporte donc une forte activité industrielle,

augmentant l'exposition de la population aux risques. Pour l'ensemble de la Région, le recensement des risques dans les préfectures a été réalisée à partir des informations du portail internet Prim.net [Prim.net, 2014]. Ces villes ont été choisies car elles concentrent la majorité de la population de la Région. Cette population est répartie majoritairement sur 3 villes, Lyon, Saint-Étienne et Grenoble (78% de la population). Ces dernières sont reconnues pour leur important tissu industriel.

Le recensement des risques par préfecture est présenté dans le Tableau 1.2. Les paragraphes suivants présentent l'analyse menée sur les risques naturels et industriels dans la Région. Après analyse de ces tableaux, les principaux risques présents dans la Région sont : l'inondation, les mouvements de terrain, le transport de matières dangereuses et le risque industriel. Les deux derniers étant en rapport avec la forte activité industrielle de la Région.

Dans la Région, les préfectures présentent une moyenne de 5.75 risques, avec un écart type de 0.82.

TABLE 1.2 – Répartition des risques naturels et industriels sur les différentes préfectures de la Région Rhône-Alpes [Prim.net, 2014]

Ville	Population	Risque
Lyon	472300 (46%)	- Inondation - Risque industriel - Rupture de barrage - Mouvement de terrain - Séisme (Zone de sismicité : 2) - Transport de marchandises dangereuses
Bourg-En-Bresse	40200 (4%)	- Mouvement de terrain - Inondation - Risque industriel - Séisme (Zone de sismicité : 3) - Transport de marchandises dangereuses
Annecy	51000 (5%)	- Inondation - Risque industriel - Mouvement de terrain - Transport de marchandises dangereuses - Séisme (Zone de sismicité : 4)
Chambéry	57500 (6%)	- Effondrements - Mouvement de terrain - Inondation - Risque industriel - Transport de marchandises dangereuses - Séisme (Zone de sismicité : 4) - Affaissement minier

Ville	Population	Risque
Grenoble	156100 (15%)	- Transport de marchandises dangereuses - Séisme (Zone de sismicité : 4) - Mouvement de terrain - Inondation - Risque industriel - Rupture de barrage
Valence	65300 (6%)	- Séisme (Zone de sismicité : 3) - Risque industriel - Inondation - Rupture de barrage - Transport de marchandises dangereuses
Privas	8600 (1%)	- Transport de marchandises dangereuses - Mouvement de terrain - Séisme (Zone de sismicité : 3) - Inondation - Feu de forêt
Saint-Étienne	177500 (17%)	- Transport de marchandises dangereuses - Séisme (Zone de sismicité : 2) - Mouvement de terrain - Inondation - Feu de forêt - Risque industriel - Rupture de barrage
Total :	1028500 (100%)	

1.1.1.2.1 Risques naturels

La répartition des événements naturels survenus dans la région Rhône Alpes, ayant mené à un arrêté de catastrophe naturelle, est donnée à la Figure 1.1, extrait de l'analyse des données du portail Prim.net [Prim.net, 2014].

La ville de Lyon a émis 20 arrêtés en 30 ans (plus d'un tous les deux ans), suivie par la ville de Saint-Étienne qui, quant à elle, en a émis 12 (moins d'un tous les deux ans).

La Figure 1.2 montre la répartition des risques naturels sur l'ensemble de la Région. Cette figure illustre que le nombre de risques est plus important dans les zones montagneuses ou à proximité de cours d'eau. Or c'est dans ces zones que se trouve la majorité de la population de la région.

La Région Rhône-Alpes n'échappe pas à la tendance nationale, les événements naturels les plus fréquents sont les inondations [MEDDE, 2010]. Le territoire de la Région Rhône-Alpes est donc fréquemment le lieu de survenue de risques naturels majeurs.

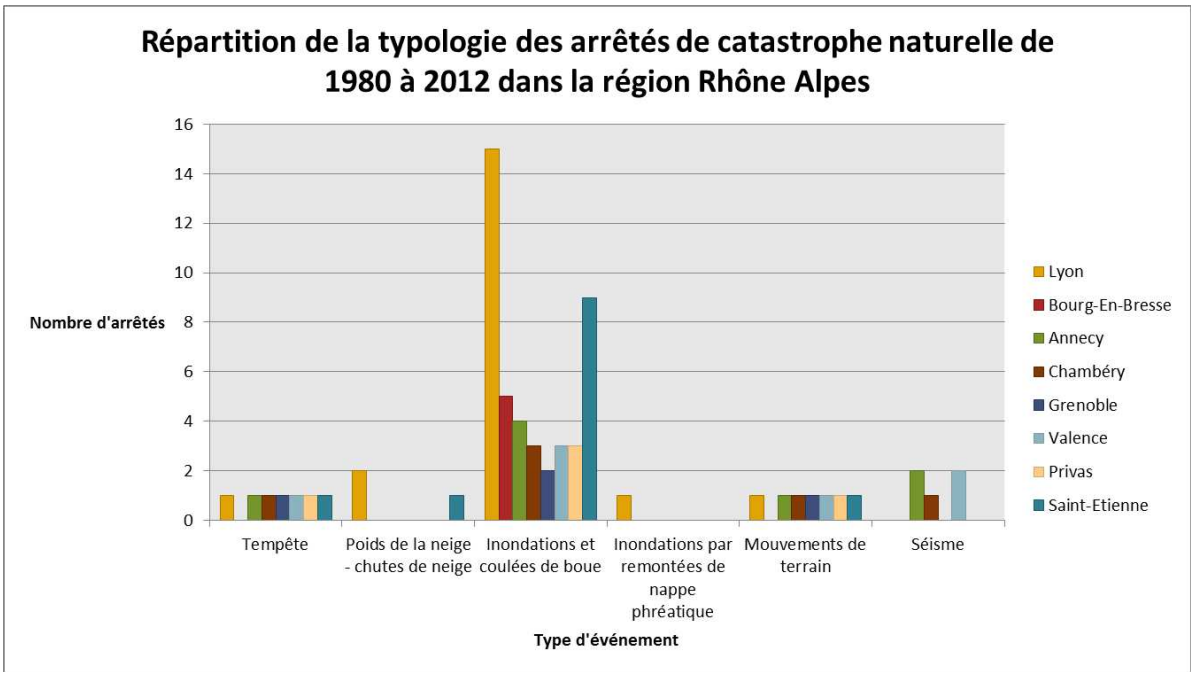


FIGURE 1.1 – Graphique du nombre d'arrêtés préfectoraux de catastrophes naturelles

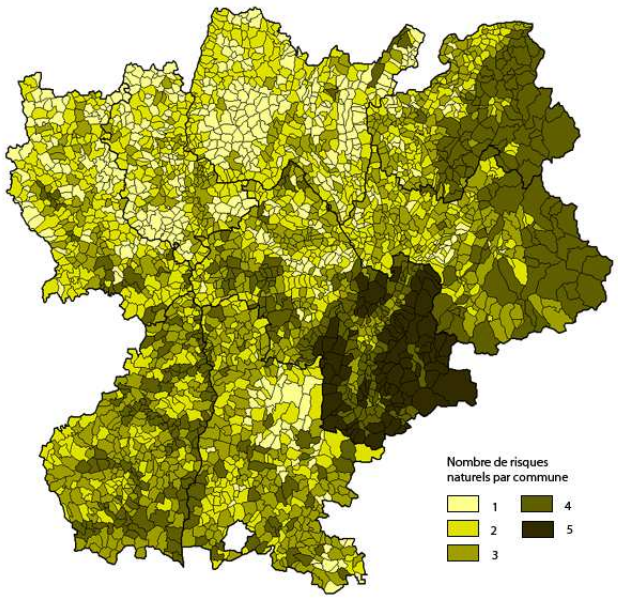


FIGURE 1.2 – Recensement du nombre de risques naturels sur le territoire de la Région Rhône-Alpes [IRMa, 2011]

1.1.1.2.2 Risques Technologiques

D'un point de vue industriel les statistiques suivantes sont relevées pour la région depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui (Tableau 1.3) :

TABLE 1.3 – Répartition du nombre d'accidents en fonction de leurs conséquences [BARPI, 2014]

Conséquences	Nb Accidents
Morts	108
Blessés	929
Évacuation	514
Confinement	75
Total	1626

Une analyse plus fine de la répartition des accidents est donnée à la Figure 1.3. Cette figure illustre le recoupement des événements répertoriés dans la base de données Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) du Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI). Par exemple, sur les 1626 événements analysés, 38 ont mené à une évacuation de la population simultanément à un confinement. Cette configuration peut être trouvée dans le cas où lors de la survenue d'un accident, le personnel est confiné sur site et par mesure de prévention, la population de la zone alentour est évacuée [BARPI, 2014].

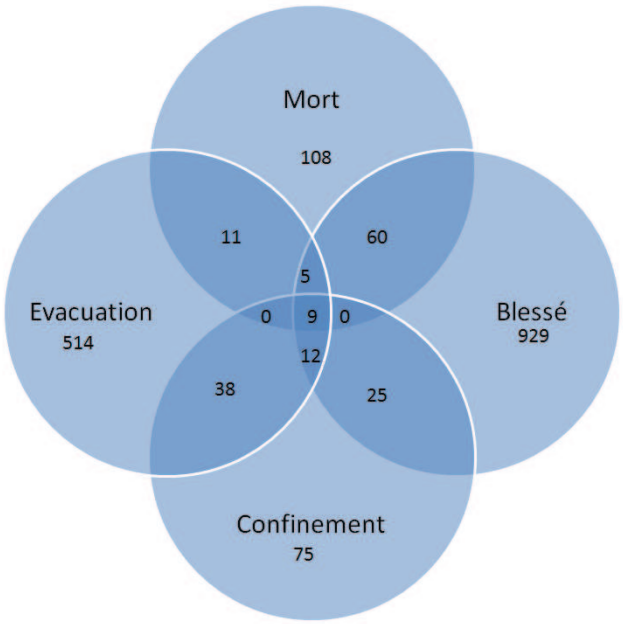


FIGURE 1.3 – Représentation des intersections des ensembles des accidents en fonction de leurs conséquences

Dans plus d'un cas sur trois, lors de ces événements, une évacuation ou un confinement d'une partie de la population a été nécessaire et dans presque 2 cas sur 3, ces événements ont provoqué des dommages corporels, voire provoqué des pertes humaines. Ceci sans doute à cause de la cinétique plus rapide des événements industriels plus difficile à anticiper. Il est à noter cependant grâce à la Figure 1.3 que dès qu'un événement est suivi de mesures d'évacuation ou de confinement, les conséquences humaines sont moindres. L'explication suivante peut être donnée : malgré la cinétique rapide qui caractérise les événements relatifs aux risques industriels, les acteurs de la gestion d'événements de sécurité civile ont eu le temps de mettre en place des mesures de sauvegarde de la population.

Ces résultats montrent que la maîtrise d'une organisation d'urgence est importante.

La Figure 1.4 montre la répartition des risques industriels sur l'ensemble de la Région. Cette figure illustre que le nombre de risques est plus important dans les zones très urbanisées (Lyon, Saint-Étienne et Grenoble) et le long du Rhône. Ces zones géographiques étant des hauts lieux d'activités industrielles.

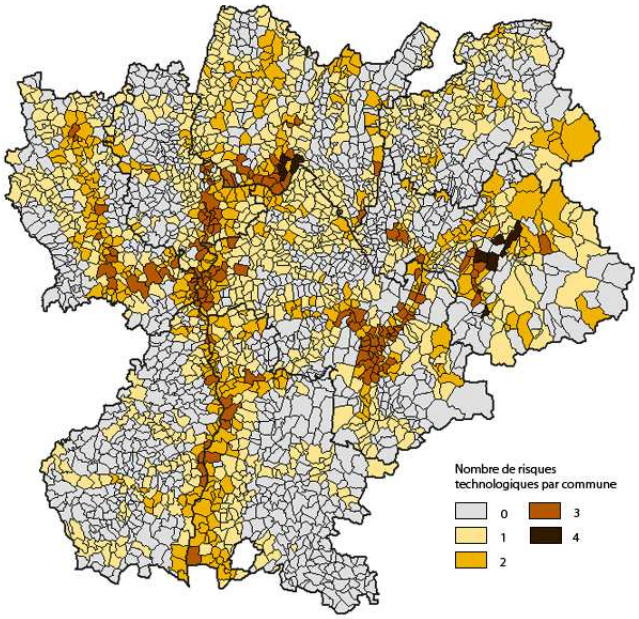


FIGURE 1.4 – Recensement du nombre de risques industriels sur le territoire de la Région Rhône-Alpes [IRMa, 2010]

1.1.2 Exemples d'événements de grande ampleur

Afin d'illustrer l'ampleur des phénomènes naturels et technologiques qui peuvent survenir sur un territoire, les prochains paragraphes décrivent des catastrophes, l'une affectant les États-Unis et l'autre la France. Ces événements de grande ampleur ont des effets à l'échelle nationale, mais ont nécessité la mise en place d'actions locales. Dans un premier temps il sera exposé une catastrophe naturelle (cyclone Katrina en 2005) survenue outre-Atlantique, pour démontrer que ces phénomènes peuvent impacter fortement tous types d'État. Puis, il sera décrit une catastrophe naturelle au niveau nationale (tempête Lothar en 1999). Ces deux événements ont été choisis car ce sont des événements bien documentés, qui ont marqué l'esprit collectif, révélant un manque de préparation et de l'effet de surprise des autorités publiques. Ils ont également pour caractéristiques le fait d'avoir entraîné d'importants dégâts sur les réseaux et infrastructures des territoires concernés, rendant les opérations de secours et de reconstruction plus délicates.

1.1.2.1 Katrina

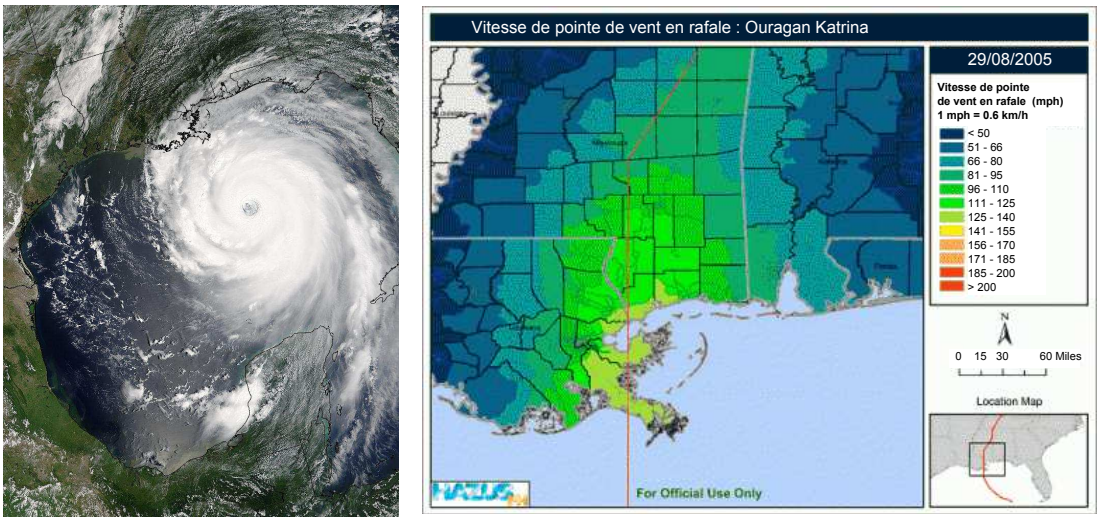
L'ouragan Katrina est survenu le 29 août 2005 aux États-Unis. Il a principalement touché l'état de la Louisiane et la ville de la Nouvelle-Orléans, ville portuaire du Golf du Mexique. Lors de l'événénement, elle est peuplée de plus de 450 000 habitants ; par la suite une perte de 110 000 habitants est observée, soit une réduction de plus de 20% [United States Census Bureau, 2005].

Les éléments qui suivent sont extraits d'un rapport sur l'ouragan dans l'objectif de mener un retour d'expérience sur les crises hors cadre et les grands réseaux vitaux [Guihou *et al.*, 2006].

Katrina est un cyclone de catégorie 5 sur l'échelle de Saffir-Simpson, c'est-à-dire que les vents soutenus dépassent les 250 km/h et l'onde de tempête (élévation de l'eau) est supérieure à 5 m (atteignant parfois 10 m dans le cas de Katrina). Les Figures 1.5 (a) et (b) illustrent l'ampleur du phénomène.

Les conséquences du cyclone ont mené à la perte de près de 1 200 vies humaines et 108 milliards de dollars de dommages. La superficie impactée est égale à la moitié du territoire Français. Katrina a été suivi un mois après par un autre cyclone (Rita) également de catégorie 5, obligeant à stopper les opérations de secours et de réparation en cours.

La particularité liée au cyclone Katrina est que la catastrophe est à l'origine d'événements de types hybrides. Le cyclone a provoqué la rupture de digues, entrainant une inondation massive de La Nouvelle-Orléans. Près de 75% des installations pétrolières offshore se trouvaient sur la trajectoire des deux cyclones, entrainant une perte économique pour la ville et son état. 80 à 90% des réseaux de support à la vie sont atteints dans une cinétique rapide voire très rapide (inférieure à 3 heures), l'inondation causant la perte irréversible de ces in-



(a) (b)

FIGURE 1.5 – Carte des vents (adaptée de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) [FEMA, 2005]) et photographie satellite [NASA, 2005] de Katrina

frastructures. Ce qui entrainera une reconstruction difficile de la Nouvelle-Orléans.

L'événement survenu est dit hors-cadre de par la complexité du phénomène et les effets dominos qui en résultent, entrainant simultanément une multitude d'événements de différents types :

- Rupture des digues
- Inondations
- Pollutions
- Accidents technologiques
- Rupture totale des moyens de communication traditionnels (téléphone GSM+filaire)

La Nouvelle-Orléans est donc victime d'un accident de type naturel qui a des conséquences technologiques, encore dénommé NatTech. Les conséquences de cet événement sont globalisantes, il faut envisager une aide internationale et les conséquences se mesurent à l'échelle des États-Unis.

Les auteurs constatent une absence des autorités publiques, dépassées alors par les événements. Cette absence se fait ressentir également au niveau fédéral, dont l'aide se fait attendre. Après ces événements, des textes de loi préciseront que l'intervention de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) ne sera garantie à 100% qu'après un délai de 72h et ceci en fonction de l'ampleur de l'événement [FEMA, 2006a].

Des difficultés sont aussi relevées dans le processus d'évacuation, bien que les États-Unis soient réputés pour avoir une gestion efficace de l'évacuation et aient recours plus régulièrement à ce type de pratique (en masse) que la France. Il s'avère dans ce cas que l'évacuation ne se passe pas comme prévue (personnes bloquées à cause de l'inondation). Il est également

à noter une absence de moyens d'évacuation, diminuant la capacité d'évacuation.

Il faut retenir de cet événement que les conditions extrêmes dans lesquelles il s'est réalisé ont amené au dépassement des autorités locales. Les acteurs privés ont montré quant à eux une capacité à être bien mieux préparés à gérer ce type d'événement. Ceci grâce à une législation, qui impose aux industriels de mettre en place des plans d'urgence en cas de survenue d'un événement de type technologique. D'une certaine façon, la préparation des acteurs privés à répondre à des événements de type technologique a favorisé leur réactivité et leur contribution à la gestion de cet événement naturel. Il a donc été mis en évidence que l'organisation d'urgence est une organisation reposant sur la sollicitation d'acteurs différents et non pas seulement des autorités publiques.

Il est donc nécessaire de pouvoir prévoir et anticiper ce type d'événement tout comme les réactions à mettre en place lors de sa survenue.

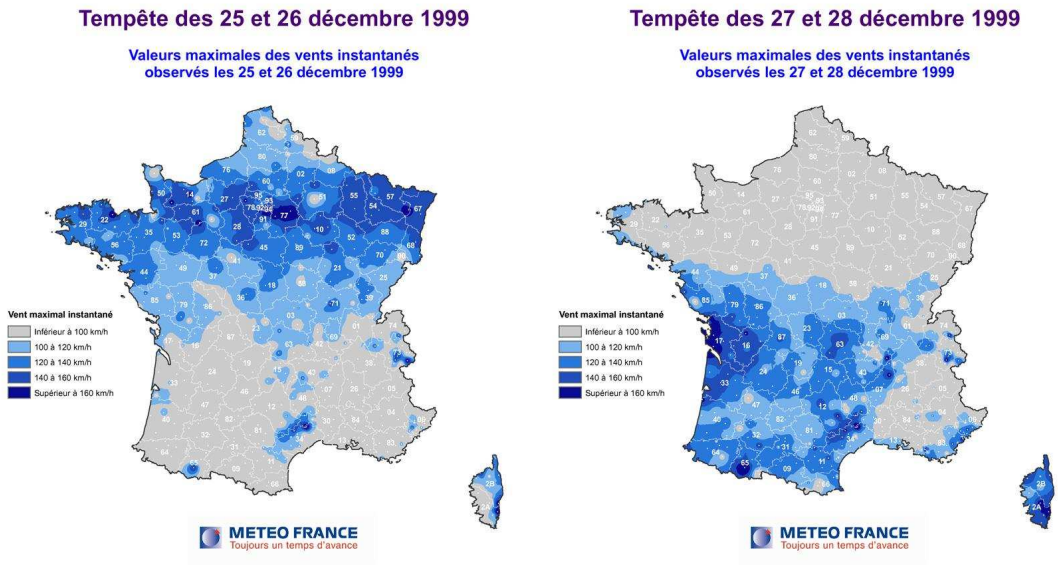
L'enchainement d'accidents technologiques issus de l'effet domino a révélé l'importance des relations d'interdépendance entre les réseaux de support à la vie et notamment celui des télécommunications, indispensable à la gestion de ce type d'événement. Cet aspect caractérise la complexité de l'événement à gérer, de par sa nature (naturel et technologique) et de l'environnement dans lequel il survient.

1.1.2.2 Lothar et Martin

Les éléments qui suivent sont extraits d'un rapport sur l'événement, principalement à destination des compagnies d'assurances, réalisé par la société Risk Management Solutions [Risk Management Solutions, 2000].

Lothar est un cyclone de catégorie 1 sur l'échelle de Saffir-Simpson, les vents moyens atteignent 150 km/h, balayant la France de la Bretagne au Nord sur une largeur de 150 km. Quelques heures plus tard, un cyclone de même intensité (Martin) se forme 200 km au sud de Lothar. Les Figures 1.6 (a) et (b) montrent la carte des vents instantanés pour les deux tempêtes. Ces cartes mettent en évidence la couverture quasi totale de la France par ces deux phénomènes météorologiques.

3 000 000 de personnes sont sinistrées, 2 000 sont évacuées, et le secteur économique fait également les frais de ces événements. Martin est responsable de dommages sur le secteur portuaire du sud-ouest de la France, tandis que Lothar est responsable de la majeure partie des dégâts terrestres. Un incident nucléaire de niveau 2 sur le site de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde) a été signalé [IRSN, 2000] provoquant l'arrêt d'un réacteur pendant 4 mois. Les conséquences sur le réseau électrique sont phénoménales : 1/4 de la France est touchée, le réseau est coupé vers l'Allemagne. Les réseaux de transport et de télécommunication n'ont pas été épargnés. D'importants dégâts sont constatés sur les axes de transport routier (perdurant pendant plusieurs jours) ainsi que sur les axes ferroviaires (la quasi-totalité du réseau est touché). Les activités des aéroports de Roissy et d'Orly sont arrêtées. Le réseau



(a) (b)

FIGURE 1.6 – Carte des valeurs maximales des vents instantanés pour les tempêtes Lothar (a) et Martin (b) [Météo-France, 1999a, Météo-France, 1999b]

télécom est quant à lui victime directe des événements mais aussi de la pénurie d'électricité engendrée par les tempêtes.

Les événements qui engendrent des catastrophes relèvent de l'effet de surprise [Dedieu, 2010]. L'auteur met en évidence que dans le cas de la tempête Lothar de 1999 en France, bien qu'averties par les services météo 12h avant, les instances décisionnaires n'ont pas anticipé les conséquences. Dans ce cas, il existait des signes qui ont été mal interprétés par les autorités. Deux raisons sont données à cela :

1. Les services de l'État n'ont pas été avertis suffisamment tôt et il y a eu une incompréhension des services (confusion des termes vigilance et alerte)
2. Les tempêtes sont fréquentes dans la région d'origine (une tempête est survenue 24h avant)

Comme dans les événements survenus lors de Katrina, il est possible ici d'identifier le dépassement des autorités locales et les conséquences importantes au niveau national. Conséquences, qui sont aussi le résultat de conséquences secondaires (exemple : perte du réseau de télécommunication à cause de la perte d'alimentation en électricité).

Ce qui est révélé ici, en comparaison des événements de Katrina, en plus de la complexité de gestion d'un tel événement et de ses conséquences, est l'importance d'un système d'alerte efficace. L'élément déterminant de ces événements est l'absence d'un tel système. Cela montre que l'alerte, comme mécanisme de déclenchement, est un élément indispensable de la gestion d'urgence. Sans alerte, les pouvoirs publics ne peuvent déclencher le processus de gestion de l'événement et se positionnent avec un retard dans l'organisation de l'urgence.

En conséquence de cet événement, un système de vigilance météorologique a été instauré en 2001.

1.1.3 Conclusion : besoin de planifier la réponse des autorités

Le développement des villes se fait dans des environnements hostiles, dont les phénomènes menaçant la population sont d'intensité et de fréquence croissantes. Les villes sont des systèmes complexes dans lesquelles surviennent des événements qui le sont tout autant.

L'enseignement de deux phénomènes de grande ampleur (Katrina aux États-Unis et les tempêtes de 1999 en France) montre qu'il est nécessaire que les autorités publiques locales soient préparées face à ce type d'événement et puissent disposer d'outils de riposte, pour pouvoir assurer la protection de la population en attendant une aide extérieure. Ces exemples montrent que les phénomènes peuvent très largement dépasser ceux planifiés ou vécus. Il faut donc que les plans d'urgence soient adaptables à la situation en cours. L'évacuation est un point important à ne pas négliger dans le cas d'événements de sécurité civile. Il faut bien veiller à s'assurer que si cette option est choisie, elle se déroule dans les meilleures conditions. Il est de même nécessaire que l'alerte soit donnée au plus tôt, pour une meilleure gestion de l'événement. Ces deux exemples montrent l'importance des interdépendances des réseaux de support à la vie et notamment celui des télécommunications, primordiale lors de la gestion d'une telle situation.

Dans le cadre de l'adaptation du plan à toute situation, il peut être intéressant de disposer d'outils qui permettent de tester ou de simuler tout type de situation, de l'événement déjà survenu (ou prévu dans les scénario des plans) à des configurations d'événements hors-cadre, c'est à dire qui sortent des spécifications pour lesquels les plans sont conçus.

Il devient nécessaire de pouvoir caractériser les mécanismes de gestion d'urgence, décrits la plupart du temps par des plans de gestion d'urgence. Ces derniers font l'objet de la section suivante.

1.2 Mécanismes organisationnels de gestion d'urgence

1.2.1 Les phases de la gestion d'urgence

Il existe différentes phases dans lesquelles sont employés divers mécanismes de gestion d'urgence. Usuellement, ces phases sont scindées en trois [Barbarosoğlu et Arda, 2004, FEMA, 2006b, Jennex, 2007]. Pour chacune de ces phases, des déclencheurs peuvent être identifiés [Jennex, 2007] (Figure 1.7).

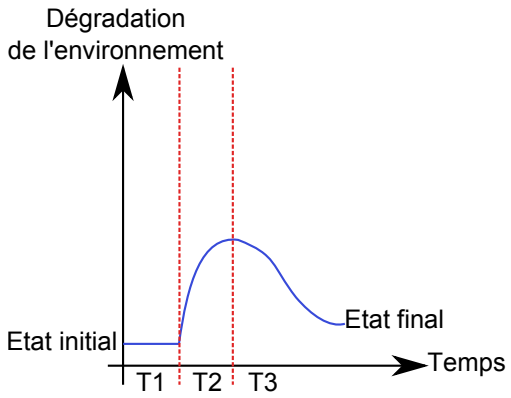


FIGURE 1.7 – Les différentes phases de l'urgence dans le temps

– La phase de situation initiale, ou situation courante (T1)

Il s'agit là de la situation quotidienne. Durant cette phase, des mécanismes d'analyse des événements de sécurité civile peuvent être opérés. Suite à ces analyses, des processus de prévention/protection et planification face à ces événements peuvent alors être mis en place, ainsi que des exercices sur table ou en situation. Communément, il s'agit d'une phase durant laquelle les parties prenantes peuvent se préparer à la survenue d'un événement, à condition que ce dernier puisse être prévisible.

– La phase de réponse (T2)

A la suite d'un événement déclencheur, cette phase est souvent caractérisée par une réponse initiale (comme par exemple la mobilisation du personnel d'urgence) et la réponse à l'urgence à proprement parlé (exécution des missions d'urgence).

– La phase de reconstruction (T3)

L'ultime phase est la phase de retour à une situation normale, d'activité quotidienne. Bien des fois le retour à la normale est long et fastidieux à cause des dégâts importants à tout niveau (humain, matériel, financier et sociétal), causés par les événements de sécurité civile. Il arrive parfois qu'un événement survienne avant même que le retour à la situation initiale ne soit atteint.

1.2.2 Principes généraux des plans d'urgence

Dans certains pays, il a été identifié que les zones industrielles et résidentielles ne sont pas clairement séparées par des zones tampons [Tseng *et al.*, 2008]. Ceci couplé au fait que les villes sont de plus en plus exposées aux risques naturels et technologiques, il est donc nécessaire de prévoir des plans d'urgence pour faire face à la survenue d'un événement menaçant l'intégrité de la population.

Un plan d'urgence doit être un plan formel et écrit, identifiant les potentiels accidents et leurs conséquences. Leur principal but étant de limiter les effets négatifs de l'événement en étant préparé (grâce au plan) et de faciliter une réponse rapide et sans délai [Ramabrahmam *et al.*, 1996].

La formalisation des plans d'urgence passe par la description de procédures de réponse efficaces lors de la survenue d'événements catastrophiques. Les plans d'urgence sont donc définis comme un ensemble de procédures qui doit être mis à jour en cas d'événement catastrophique, impliquant la communication, la planification, les actions, l'analyse de risque, les supports opérationnels et logistiques ainsi que tout ce qui est nécessaire pour réduire les conséquences de cet évènement [Calixto et Larouvere, 2010].

Le développement de tels plans nécessite une revue systématique des dangers et la prise en considération du pire cas possible [Fitzgerald, 1996]. Lors de la survenue d'un événement, les équipes terrain ne peuvent pas agir efficacement, si un plan détaillé des actions à prendre n'est pas établi. Il est donc important de mettre en place des exercices et simulations (notamment pour la collecte d'information) pour appréhender la mise en place de ce plan, bien que les réponses à l'urgence soient uniques à cause de l'incertitude sur les évènements à venir et les besoins pour y répondre [Ford et Schmidt, 2000].

En fonction de la criticité de l'évènement, il est possible de déterminer trois niveaux de plan d'urgence : individuel, régional et national. Le point remarquable des plans de secours est qu'ils impliquent différentes parties prenantes, responsables à leur niveau.

plan individuel : Ce plan est mis en place par les industries qui présentent un sérieux risque pour leurs employés et l'environnement (Exemple : industries soumises à la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'environnement (ICPE)). Ces industries sont notamment les industries chimiques, pétrolières et gazières ainsi que nucléaires. Un plan de secours doit être préparé, évalué et testé fréquemment. Il ne peut couvrir toutes les combinaisons de situation d'accident. Il doit être mis à jour régulièrement. Il implique fortement des procédures opérationnelles et de communication. Ce niveau de plan peut également être appliqué à l'échelle des autorités publiques

plan régional : un plan de secours régional est mis en place lorsqu'un plan individuel ne suffit plus à répondre à l'évènement. Il requiert un bon niveau de coordination entre les acteurs et est la plupart du temps contrôlé par les autorités publiques.

plan national : le plan national est le plus complexe, car il requiert une coordination multi-organisationnelle et implique un nombre important de ressources différentes (humaines, logistiques, matérielles et technologiques) provenant de différentes sources (organisations nationales, non gouvernementales ou privées).

Les plans de gestion d'urgence ont donc pour objectif de préparer sur un territoire donné, les actions à mener pour préserver la population et l'environnement. En 2005, face à la recrudescence de catastrophes de grandes envergures, les états membres des Nations Unies se réunissent à Kobe (Japon) et reconnaissent des liens intrinsèques entre réduction des catastrophes et développement durable. Ils conviennent également que la culture de prévention et de résilience doit être développée, ainsi que de la nécessité de mettre en œuvre des indicateurs de suivi de la réduction des risques [ISDR, 2005]. Dans ce cadre, il apparaît alors nécessaire de statuer quant à l'opérabilité de ces plans. Une des façons d'estimer cette opérabilité, est de réaliser une analyse *a priori* des plans de gestion d'urgence et de relever les éléments la limitant. L'analyse de ces plans de gestion d'urgence permettra de donner un aperçu aux administrations de l'efficacité de leur outil avant la survenue d'un évènement redouté.

1.2.3 Dispositifs de gestion d'urgence au niveau Français

Des plans de gestion d'urgence ont donc été mis en place pour gérer les événements de sécurité civile provoqués par des aléas de type naturel ou technologique. Ces plans sont conçus pour permettre aux autorités de se préparer préalablement à la survenue de ces évènements (recensement des moyens techniques et humains, formations, exercices...) et ainsi d'éviter de basculer dans la gestion de crise [DDSC, 2009]. Il existe 3 niveaux de plan de gestion d'événements de sécurité civile :

Plan national : Dispositif ORSEC de zone

Plan régional : Dispositif ORSEC départemental et ses déclinaisons (exemple : PPI)

Plan individuel : **Acteurs publics** Plan Communal de Sauvegarde

Acteurs privés Plan d'Opération Interne

Note : il n'existe plus de dispositif ORSEC national.

D'une manière générale les plans reposent sur un chef (le Directeur des Opérations de Secours) qui a à sa disposition un réseau d'acteurs : Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS), Service d'Aide Médicale d'Urgence (SAMU), acteurs privés, services de l'état..., qu'il met en œuvre et déploie sur son territoire. Ces plans reposent sur l'établissement du recensement des risques prévisibles établis sur la base de documents existants, Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN), Plan de Prévention des Risques Technologiques

(PPRT), Plan Particulier d'Intervention (PPI)... Ils ont pour vocation d'être testés et mis à jour chaque fois que cela est nécessaire.

1.2.3.1 Dispositif ORSEC de zone

Le Préfet de zone dispose de la fonction de Directeur des Opérations de Secours, afin d'assurer la protection sur le territoire qui lui incombe : la zone de défense.

Le territoire national est découpé en 7 zones de défense.

Une zone de défense regroupe plusieurs régions. Par exemple, la zone de défense SUD-EST à laquelle appartient la Région Rhône-Alpes, sur laquelle une analyse des événements naturels et technologiques a été menée, regroupe deux régions : Rhône-Alpes et Auvergne (Figure 1.8). Elle regroupe à elle seule près d'un quart de la population Française.

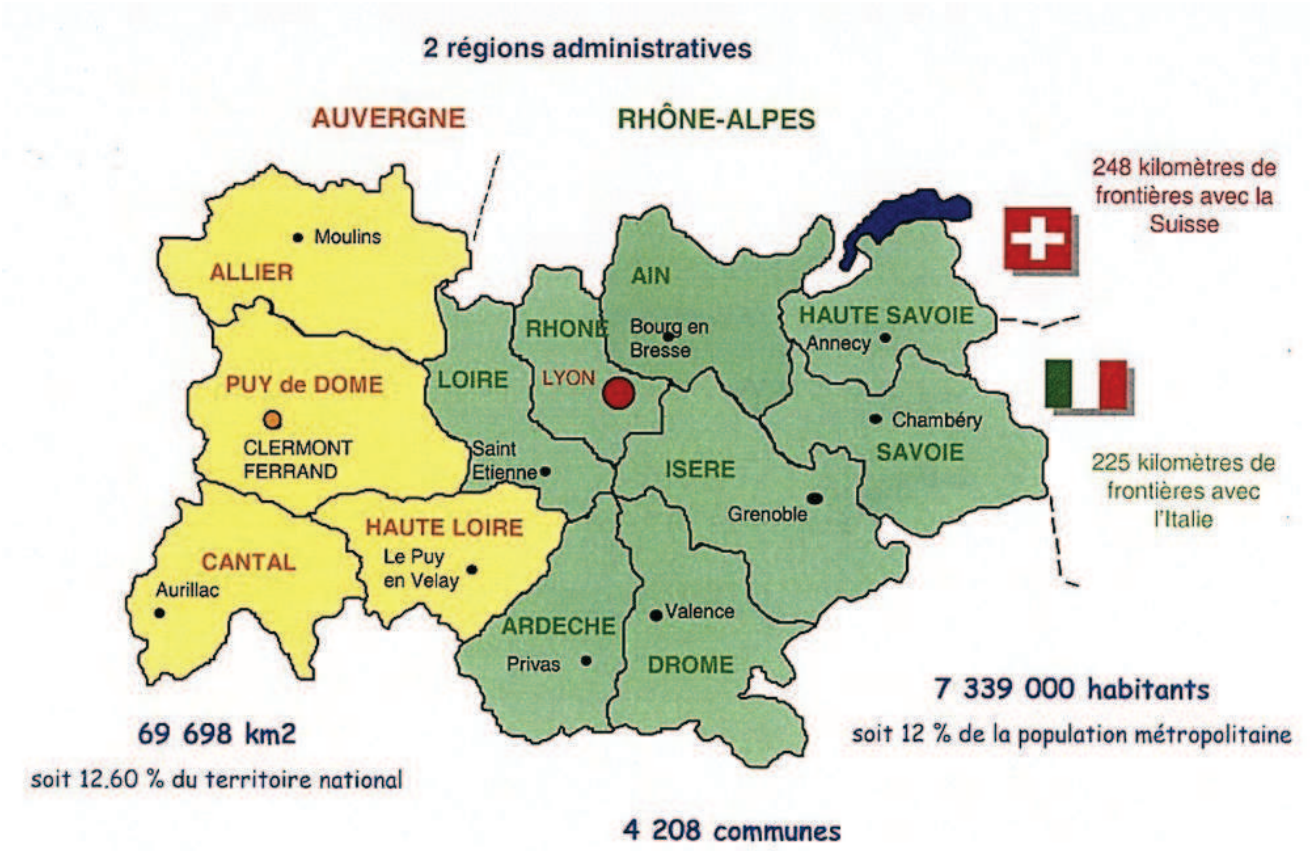


FIGURE 1.8 – Zone de défense Sud-Est [Région Rône-Alpes, 2013]

Le dispositif Orsec de zone vient en renfort du dipositif ORSEC départemental dans le cas ou ce dernier n'est pas suffisant, compte tenu de l'ampleur, l'intensité, la cinétique ou l'étendue de l'événement. La réponse est dite proportionnelle et graduée, c'est à dire qu'elle doit permettre la montée en puissance de l'organisation et de la réponse, dans le cas ou le dispositif départemental est insuffisant. Il recense les moyens d'action zonaux. C'est une boîte à outils au niveau de la zone de défense.

Le dispositif décrit pour la zone, l'organisation et la mobilisation de la coordination des opérations, ou encore l'organisation des renforts. Il comprend la synthèse des dispositifs

d'alerte (vigilance et surveillance) et les modalités de coordination de *l'information*. Il prend en compte également les accords de coopération internationale.

1.2.3.2 Dispositif ORSEC départemental

Le dispositif ORSEC départemental est mis en place lorsqu'un événement de sécurité civile implique plusieurs communes et transfère donc la direction des opérations de secours au Préfet de Département.

Le dispositif ORSEC fait parti de la réforme de modernisation de la sécurité civile lancée par la loi n° 2004-811 du 13 août 2004 et son décret d'application n° 2005-1157 plan ORSEC. L'acronyme est modifier pour Organisation de la Réponse de SÉcurité Civile. Le plan est conçu pour mobiliser et coordonner, sous l'autorité unique du Préfet, les acteurs de la sécurité civile au delà du niveau de réponse courant ou quotidien des services. Le but est de développer la préparation de tous les acteurs, publics ou privés, pouvant intervenir dans le champ de la protection des populations.

Les acteurs du plan, publics ou privés, doivent s'approprier les missions relevant de leur compétence dans le but de développer une culture de sécurité civile. L'objectif va au delà de la simple planification, figée et statique. C'est pourquoi le terme de dispositif ORSEC est préféré au terme de plan ORSEC. Le dispositif doit permettre de mettre en place une réponse opérationnelle de gestion des événements quel que soit leur type (naturel, technologique, terrorisme, sanitaire). Il doit prendre en compte les aspects *organisationnels*, *techniques* et *humains* mis en œuvre lors d'un événement de sécurité civile. La loi préconise que les acteurs soient formés et entraînés à la mise en œuvre de ce dispositif.

Pour cela, le plan s'appuie sur :

- Un recensement et une analyse préalable des risques et des conséquences des menaces communs (identifier les aléas et les vulnérabilités)
- Un dispositif opérationnel décrivant les opérations de manière *générique* de façon à ce qu'elles s'appliquent quel que soit le type d'événement
- Des phases de préparation et d'exercices

1.2.3.3 Au niveau local : plan Communal de Sauvegarde

1.2.3.3.1 Genèse et condition d'application

Depuis le XIX^{ème} siècle, le Maire, doit avertir ses concitoyens de tout fléau [République Française, 1996]. Aujourd'hui, cela passe par la prise en considération des risques contemporains, tant industriels qu'environnementaux.

En 2004, la France légifère [République Française, 2004] sur la modernisation de ses capacités à répondre à ces événements de sécurité civile. Elle instaure le Plan Communal de

Sauvegarde, document organisationnel visant à donner une réponse ordonnée et cohérente lors de la survenue de ces évènements. Ce document est obligatoire pour les communes disposant d'un Plan de Prévention des Risques (PPR) et/ou comprise dans le périmètre d'un Plan Particulier d'Intervention (PPI).

Le PPR relève de la loi du 22 juillet 1987, modifiée par la loi du 2 février 1995 et codifié aux articles L.562-1 à L.562-9 du code de l'environnement [Prim.net, 2010]. Il recense sur le territoire du département les zones menacées par les risques naturels. Son élaboration est sous la responsabilité du Préfet et vaut pour servitudes d'utilités publiques. C'est-à-dire qu'il doit informer et réglementer les aménagements dans ces secteurs.

Le PPI introduit par la loi de modernisation de la sécurité civile [République Française, 2004] est l'homologue du PPR pour les risques technologiques. Il précise également les moyens de gestion des événements de ce type.

1.2.3.3.2 Responsabilitée partagée

Le Maire a donc l'obligation de prévenir et mettre en sécurité sa population. Pour cela, le législateur lui impose de structurer son organisation dans un document communal dénommé PCS pour Plan Communal de Sauvegarde [République Française, 2004, République Française, 2005], plan de gestion d'urgence à l'échelle communale. Son décret d'application entre en vigueur en 2005 et précise ce qu'est ce nouvel outil de gestion. Ici, il faut bien faire la distinction entre sauvegarde et secours.

Le Maire dispose de la fonction de Directeur des Opérations de secours (DOS). Cette fonction lui incombe et ne peut être déléguée. Il est le garant de la sauvegarde de la population (informer, alerter, mettre à l'abri, ravitailler, exercer son pouvoir de police). Il dispose d'un appui technique au travers du Commandant des Opérations de Secours (COS), fonction assurée par le pompier en charge de l'opération sur le terrain. Ce dernier est le garant de la mission de secours de la population (soigner, médicaliser, évacuer d'urgence). Une illustration de la distinction entre ces deux termes est donnée dans la Figure 1.9.

Le Maire ayant des obligations responsables, en cas d'absence ponctuelle au sein du Poste de Commandement Communal (PCC), il peut transférer ses fonctions de coordinations à un Responsable d'Actions Communales (RAC). Si un PCS suggère la présence d'un RAC, celui-ci doit être clairement identifié et ses missions définies pour ne pas se chevaucher avec celle du DOS et du COS.

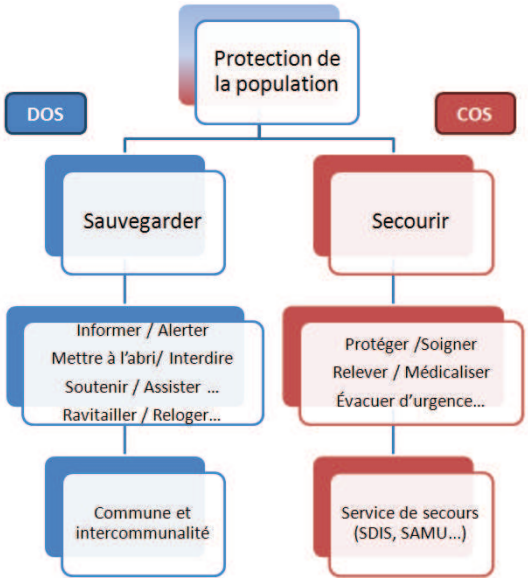


FIGURE 1.9 – Répartition des missions entre le Directeurs des Opérations de Secours et le Commandant des Opérations de Secours

1.2.3.3.3 Objectifs du PCS

Avant la loi de 2004 imposant le PCS, les communes disposaient de divers plans et cartes (Dossier Communal de Sauvegarde, Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche, atlas des Zones Innondales...) ayant plus ou moins les mêmes objectifs que le PCS. L'intérêt d'une telle loi est d'imposer des mesures de gestion aux communes relevant de risques sur leur territoire et de regrouper dans un document unique les informations sur les risques qui peuvent y survenir. Ce document identifie également les moyens de sauvegarde de la population.

Le PCS se base sur une identification et un diagnostic des risques (connaitre les aléas, identifier les secteurs impactés). La priorité du PCS est donnée à l'alerte et à l'information, se réalisant à deux niveaux : la réception de l'alerte et la diffusion. L'alerte et l'information doivent être fiables et exhaustives. Elles permettent de mettre en sécurité et de rassurer la population. Afin de mettre en place la sauvegarde, un recensement des moyens communaux doit être établi au préalable, selon le triptyque hommes/moyens/missions. Ainsi, le PCS organise la réponse de la commune, qui lors de la survenue d'un événement de sécurité civile subit 3 phases : 1) urgence, 2) post-urgence et 3) retour à la normal.

1.3 Description du Plan Communal de Sauvegarde (PCS)

1.3.1 La gestion d'événements de sécurité civile : une problématique locale

Toutes les échelles d'autorités publiques sont impliquées lors d'une situation d'urgence (Nationale, Régionale et Locale), cependant les premières fonctions sont attribuées aux autorités locales [Waugh et Hy, 1990]. pour deux raisons principales :

- Bien souvent dans les premiers instants de l'urgence, ce sont les secours locaux au plus proche de la situation qui interviennent [Cigler, 1988]
- C'est au niveau local que sont connus les dangers et les vulnérabilités locales [Newkirk, 2001]

Il est alors primordiale que les autorités locales soient bien armées pour faire face à une situation d'urgence. Il est donc nécessaire d'avoir recours à la constitution d'un plan comme le PCS pour organiser et formaliser ce processus de gestion.

1.3.2 Constitution du PCS

La construction du PCS s'effectue autour de plusieurs acteurs et partenaires locaux (sapeurs-pompiers, préfecture, Établissement public de coopération intercommunale (EPCI), services de l'état, communauté scolaire, cabinets d'études, associations, experts, et les partenaires financiers et techniques.

La Direction de la Défense et de la Sécurité Civile a établi un guide d'élaboration des PCS [DDSC, 2009] dont une analyse est menée dans les paragraphes ci-après.

Ce guide est à destination des Maires de communes soumises à l'élaboration d'un PCS. Il vise à aider ces instances locales dans la mise en place de bonnes pratiques en matière de sécurité civile au niveau communal, en préconisant une implication des acteurs de tous niveaux.

Ce guide décrit une organisation à mettre en place, constituée de missions regroupant des moyens humains et techniques pour assurer la protection de la population. Quatre grands thèmes ressortent de l'analyse du guide d'élaboration des PCS : le diagnostic des aléas et des enjeux, l'alerte (réception et diffusion), le recensement des moyens d'action et la coordination. Le diagnostic des aléas permet d'identifier à quels types d'événements la commune peut faire face. Le diagnostic des enjeux identifie les populations touchées par cet aléa. L'alerte d'un événement doit permettre la mobilisation du personnel communal. Sa diffusion doit quant à elle informer sur les comportements à adopter par la population. Le recensement des moyens d'action (humain et technique) permet d'assurer un certain nombre de missions sur le terrain pour mettre en œuvre la protection de la population. Enfin la coordination doit permettre une action cohérente suivant une hiérarchisation des missions. Ces différents

éléments sont décrits plus en détail dans les paragraphes suivants.

La première étape dans un PCS est d'établir un état des lieux initial. C'est à partir de là qu'est connue la situation initiale de la commune et les apports que doivent amener le PCS en termes de gestion des événements de sécurité civile. Cet état des lieux tient compte de la connaissance des risques sur le territoire communal, de l'évaluation des moyens organisationnels et techniques, de l'évaluation des moyens d'alerte et de la capacité de la commune à tirer des enseignements de la gestion d'un événement. Ainsi les objectifs essentiels du PCS sont de :

- Diagnostiquer les aléas et les enjeux
- Recenser les moyens matériels et humains
- Mettre en place une procédure de réception de l'alerte
- Mettre en place un dispositif efficace de la diffusion de l'alerte
- Prévoir une fonction de commandement du dispositif

Note : Un objectif complémentaire peut être la mise en place d'exercice

1.3.2.1 Diagnostiquer les aléas et les enjeux

Un des objectifs du PCS et de diagnostiquer les aléas et les enjeux. Pour se faire, il faut tout d'abord passer par une phase de recueil d'informations. Ce recueil peut se réaliser en consultant des documents comme le Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM), le *porté à connaissance*, les PPI et plan ORSEC, les PPRN, les PPRT, le schéma départemental d'analyse et de couverture du risque (SDACR), les études techniques sur les risques, les cartes géologiques, les atlas de risques ou tous types d'études spécifiques. Il est nécessaire à l'issu de ce recueil, de construire des scénarios, qui seront la base de la construction d'une réponse pour la commune. Il faut bien avoir à l'idée cependant, de la limite des scénarios, comme la survenue d'un événement d'ampleur supérieure à celle prévue par ce dernier.

Concernant le diagnostic des enjeux, il doit prendre en compte les enjeux humains comme les habitants de la communes, leurs caractéristiques (ex : personnes à mobilité réduite ou dépendantes), les établissements sensibles (établissements scolaires, hospitaliers, maisons de retraite, hôtels, campings), la population non sédentaire (résidences secondaires, touristes, grands rassemblements) et les établissements industriels et commerciaux. Le recensement des enjeux doit également considérer les enjeux stratégiques, comme les lieux stratégiques pour la commune en temps de gestion d'événements de sécurité civile (poste de commandement, lieux de rassemblement) et les infrastructures liées au fonctionnement de la commune (transformateur, réseau téléphone). Les enjeux économiques doivent également être recensés comme les Zones d'Aménagement Concerté (ZAC), Zones Industrielles (ZI)... Les infrastructures de la commune sont aussi à prendre en charge dans le diagnostic des enjeux, la commune étant responsable des personnes s'y trouvant. Ainsi, le PCS est constitué d'une cartographie des aléas, mise face à une cartographie des enjeux.

Il est souvent difficile de récolter ces informations, car elles sont réparties entre différents acteurs internes ou privés. Comme dans toutes études, le recueil d'informations est long et fastidieux, mais les acteurs communaux peuvent néanmoins s'appuyer sur des documents et informations émanant de l'autorité départementale. Il arrive cependant que cette dernière présente des lacunes dans ce domaine (publication de documents et d'informations). La commune reste donc fortement tributaire d'instances extérieures et d'acteurs privés, notamment pour caractériser les enjeux. Il est à noter le caractère évolutif des aléas (surtout en matière de risque industriel) et des enjeux. En effet, les industries potentiellement responsables d'aléas peuvent disparaître et naître au fur et à mesure des années, de même pour les zones d'enjeux (maisons de retraite, centres commerciaux...). Il est alors important que les éléments dans le PCS soient à jour.

1.3.2.2 Une organisation efficace à base de moyens recensés dans le plan

Une fois l'alerte donnée, il faut mettre en place une organisation pour faire face à l'événement de sécurité civile. Ceci étant assuré par des missions mettant en œuvre des moyens humains, techniques, organisationnels et informationnels. Pour une mise en œuvre efficace, ces moyens doivent être rencensés au niveau de la commune et une information quant à leur mobilisation doit être renseignée. Les moyens techniques peuvent être communaux ou privés (moyens de transmission, moyens de diffusion de l'alerte, moyens de logistique lourde, moyens de logistique légère, logistique diverse, moyens de relogement, moyens de ravitaillement). Dans le cas où il s'agit de moyens privés, une identification précise de leurs détenteurs doit être faite. A titre indicatif, le temps de mise à disposition peut être considéré. Il existe différents types de moyens humains pouvant intervenir dans le dispositif PCS une fois enclenché : les élus, les agents territoriaux, les acteurs locaux, les réserves communales de sécurité civile, les professionnels de santé, les professionnels des entreprises privées.

Ces moyens sont sollicités pour être mis en œuvre lors des différentes missions requises lors du déclenchement du plan.

1.3.2.3 Missions de l'organisation communale

L'organisation communale de gestion d'un événement est découpée en 3 phases : la phase d'urgence, la phase post-urgence et la phase de retour à la normale. Dans la première, la commune doit alerter et informer, donner les premiers secours, protéger et porter assistance à la population. Dans la deuxième, l'organisation doit être à même de soutenir et d'accompagner la population et de prendre des mesures de remise en état (Tableau 1.4). Enfin dans la dernière, la commune doit reconstruire et accompagner. La direction des opérations est assurée par le directeur des opérations de secours (le Maire), qui valide les décisions prises par le poste de commandemant communal. Celui-ci est dimensionné selon la taille de la commune.

TABLE 1.4 – Répartition des missions du PCS entre les phases de l'urgence et post-urgence

Dans la phase d'urgence	Dans la phase post urgence
Évaluer la situation	Organiser le soutien et l'accompagnement
Alerter la population	Assurer le relogement transitoire
Mettre à l'abri les personnes exposées	Maintenir le ravitaillement des personnes relogées
Sécuriser les zones dangereuses	Remettre en service les infrastructures
Informer la population	Encadrer les intervenants
Assister les services de secours	Organiser la gestion des dons
Assurer les actions urgentes	
Héberger/Ravitailler	

Au niveau des plans d'urgence Français, la priorité est donnée à la mission d'alerte. Le détail de cette mission est donnée dans la prochaine section.

1.3.2.4 Prioriser l'alerte

Il existe deux alertes : l'alerte sur l'événement en cours reçue par la commune, et l'alerte diffusée par la commune pour avertir la population.

Il peut exister deux objectifs à l'alerte :

1. Mettre la population à l'abri dans un lieu sûr dans l'attente d'informations
2. Alerter la population pour évacuer la population

Pour se faire, l'alerte repose sur un ensemble de moyens (recensés) et son emploi répond à une cartographie pré-établie. Deux contraintes régissent l'alerte : la caractérisque de la zone exposée (surface à couvrir, nombre de personnes) et le délai de mise en œuvre (envoi de l'alerte et réalisation). La réception de l'alerte au niveau communal doit être assurée en tout temps. Sa diffusion doit se faire en interne, pour mobiliser le personnel nécessaire, et au besoin en externe (population). Dans ce cas, les cibles, moyens (Réseau National d'Alerte (RNA), sirènes communales, sirènes industrielles, Ensemble Mobile d'Alerte (EMA), automate d'appel, radios, mégaphones, panneaux à message variable...) et modalités doivent être bien spécifiés dans le PCS.

1.3.3 Conclusion sur les caractéristiques du PCS

Le PCS est le premier maillon de la chaîne de sauvegarde en terme d'organisation de la réponse des autorités publiques pour garantir l'intégrité de la population. Bien souvent il s'agit d'un document papier qui recueille une partie sur le diagnostic des aléas combinés aux enjeux communaux et une partie sur le recensement des moyens d'action communaux ainsi que les procédures les mettant en œuvre. Son principal objectif est de donner la priorité aux mécanismes d'alerte.

Connaissant les caractéristiques qui constituent le PCS, la prochaine section s'intéresse à relever les points importants pour en permettre l'évaluation. La nécessité d'évaluer ce type de plan est aussi discutée.

1.4 Les problématiques d'une évaluation des plans d'urgence

En France, l'état impose au Maire d'établir un Plan Communal de Sauvegarde afin de recenser dans un unique document les mécanismes de gestion d'événements de sécurité civile pouvant survenir sur le territoire de la commune. Cependant la loi ne stipule pas comment parvenir à garantir la sauvegarde la population. Il est donc du ressort du Maire de se poser cette question.

Malgré cela, le Maire ne pourra juger de l'opérationnalité de son plan qu'une fois qu'il sera mis en place, c'est-à-dire déclenché. Il n'existe actuellement pas de méthode ou démarche permettant d'évaluer *a priori* si le plan permettra d'assurer la mission de sauvegarde de la population.

Il convient donc de pouvoir fournir aux instances décisionnaires une méthode d'évaluation de leur plan avant leur mise en œuvre, afin de pouvoir leur permettre d'identifier des leviers d'action. Cependant, fournir une telle méthode n'est pas un exercice trivial du fait des nombreuses problématiques soulevées par les plans d'urgence. Ces problématiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

1.4.1 Le paradoxe du plan d'urgence

Un système de réponse d'urgence tel que les plans d'urgence est rarement utilisé, mais paradoxalement lorsqu'il doit l'être, celui-ci ne peut pas se permettre de faillir. La conception de tels systèmes requiert de la part de leurs concepteurs d'anticiper les besoins, de prévoir quelles ressources seront disponibles et quelles vont être les différences de gestion entre situation normale et situation de gestion d'événements de sécurité civile [Ramabrahmam *et al.*, 1996, Jennex, 2007].

1.4.2 Le PCS figé dans l'instant

Bien souvent ce plan est un recueil de documents tels que des cartes, listing téléphoniques et listes de procédures. Il est donc figé dans un état statique, et il est nécessaire que les informations à disposition (qui peuvent être rapidement périmées) soient à jour. La loi impose une révision quinquennale du plan, ou lorsque cela s'impose. La plupart du temps elle est effectuée après la survenue d'un événement de sécurité civile. Il est cependant difficile d'effectuer cette tâche car la mise à jour nécessite souvent du temps et des ressources importantes [Perry et Lindell, 2003].

Ce plan est statique alors qu'il décrit une situation dynamique et changeante [Wybo et Kowalski, 1998]. Par exemple, au début de l'événement, les acteurs impliqués sont restreints :

la cellule de veille, qui va alerter la cellule de gestion d'événements de sécurité civile (commandement des opérations) qui elle-même alertera le personnel d'action. Certains acteurs peuvent à un instant s'occuper de la mise en place de barrières pour protéger un itinéraire d'évacuation, et par la suite s'occuper de l'ouverture des centres d'hébergement et/ou le ravitaillement. Plus explicite encore, le poste de commandement peut requérir un avis technique à un instant donné lors de l'événement. L'expert est alors consulté ponctuellement, il entre à un instant dans le plan et en ressort aussitôt, mais reste à disposition. Les différents acteurs sont donc sollicités à différents instants pour des durées variables. Le nombre d'acteur au cours du temps suit l'évolution de la courbe de la Figure 1.7 page 21 [Wybo et Kowalski, 1998]. Par analogie, cette réflexion peut être transposée aux ressources matérielles mises en œuvre lors d'un événement de sécurité civile.

Du fait de cette organisation dynamique, le centre de commandement doit être robuste ou très flexible [Wybo et Kowalski, 1998], c'est-à-dire capable de s'adapter face à tout changement.

Le PCS est basé sur l'établissement de scénarios. Il ne peut manifestement pas tout prévoir mais sa structure doit permettre de s'adapter à toutes les situations, mêmes celles non prévues initialement [Frosdick, 1997]. Cela doit pouvoir répondre au caractère énoncé précédemment : le plan décrit une situation changeante.

1.4.3 Une organisation reposant sur la capacité des acteurs à agir dans des conditions difficiles

Une situation d'urgence se gère donc dans des conditions dynamiques et contraignantes. Bien souvent, le temps et les ressources des acteurs dans ces conditions viennent à manquer [Yu *et al.*, 2012].

Une part du succès de l'organisation décrite dans le plan est donc mise sur les capacités des acteurs du plan à pouvoir gérer un événement dans des conditions stressantes qui nécessitent une organisation différente de l'organisation quotidienne (celle-ci décrite dans le plan d'urgence) [Turoff, 2002]. En plus de ces conditions stressantes inhabituelles à gérer, les acteurs doivent intégrer la dimension complexe, imprévisible, dynamique, temporelle et médiatique de la situation [Patton et Flin, 1999]. Même si les responsables sont de bons managers en temps normal, ils sont sous pression lorsqu'ils ont à faire face à un accident. Il y a donc un réel besoin de formaliser les processus organisationnels et informationnels que sont les plans d'urgence [Ramabrahmam *et al.*, 1996].

Il est donc important de formaliser le plan, de former et d'entrainer (périodiquement) les acteurs à son utilisation. Cette tâche réduit le temps, les efforts de construction et d'implémentation de système de réponse à l'urgence [Jennex, 2007].

1.4.4 L'évaluation des plans une priorité bien souvent secondaire pour les décisionnaires

L'évaluation de la qualité des plans d'urgence est difficile, car il s'agit d'évaluer une organisation qui décrit une situation complexe. L'évaluation est aussi difficile car la plupart du temps, l'absence d'expérience en mesure d'urgence fait qu'il est difficile pour les autorités d'évaluer et de mesurer la performance de leur plan d'urgence [Henstra, 2010]. Les principales difficultés dans l'évaluation de la performance des plans d'urgence sont que les gestionnaires n'ont pour la plupart du temps, pas de soutien politique, de faibles ressources et le public leur manifeste un désintéressement. Paradoxalement, bien que la population ne demande pas nécessairement à ce que les autorités publiques consacrent du temps au développement de programmes de gestion d'urgence, elle s'attend à ce qu'elles y répondent. Les programmes de gestion d'urgence ont du mal à acquérir des lignes budgétaires et sont les premiers à être tronqués [Henstra, 2010]. Ceci étant accentué dans les pays en voie de développement, qui préfèrent donner de l'importance aux problèmes quotidiens qu'à des événements de faible probabilité d'occurrence [de Souza, 2000]. Une évaluation de la performance des plans est néanmoins nécessaire pour les raisons suivantes :

- Comparer les programmes [Wholey et Hatry, 1992]
- Mettre en avant les carences [Kreps, 1991]
- Promouvoir la gestion d'urgence [Behn, 2003]
- Renforcer la crédibilité [Cigler, 1988]
- Surveiller la performance

Utiliser des outils de modélisation permet d'appréhender la complexité de cette organisation et offre un cadre standard permettant de comparer, identifier les carences et surveiller la performance des plans d'urgence. En proposant une démarche standardisée d'évaluation des plans, offrant des indicateurs pertinents pour l'amélioration de l'organisation d'urgence, cela permet aux autorités locales de gagner du temps dans l'évaluation.

1.4.5 Des premiers outils d'analyse

L'IRMa propose un outil d'audit [IRMa, 2008] qui permet de comparer la structuration du document par rapport au guide d'élaboration des PCS de la DDSC [DDSC, 2009]. De ce point de vue, il est possible de garantir la conformité de la structure du document et de l'organisation en place pour l'élaboration de ce dernier. Mais en aucun cas de savoir si, lors de sa mise en œuvre, les missions décrites et l'organisation proposée sera capable de satisfaire les missions et objectifs du plan de secours. Cependant, avoir la connaissance de la conformité du document par rapport au référentiel permet d'établir un pré-diagnostic.

De plus, l'IRMa révèle un certain nombre de difficultés sur le terrain concernant l'alerte, l'évacuation, la communication et les moyens de communication. Les principales difficultés rencontrées sont liées à la véracité des alertes, la limite de couverture de l'alerte, l'audibi-

lité, la compréhension, les schémas d'alerte longs... L'évacuation des personnes est souvent difficile à cause de leur réticence, de leur santé, ou de la rapidité de l'événement. Le bon déroulement d'un PCS repose essentiellement sur une bonne organisation communale, mais aussi et surtout sur une bonne information des comportements à adopter par la population. Un autre risque est lié à la rupture des transmissions, dues à la saturation des réseaux, une panne, ou la rupture suite à l'événement (effet domino).

1.4.6 Conclusion sur les problématiques de l'évaluation

Pour évaluer un plan de secours, il faut donc avoir un minimum d'information sur les zones d'enjeux, les missions à réaliser et les moyens d'action à mettre en œuvre. Le temps de mise en œuvre de ces moyens d'action peut aussi être considéré. Le non succès du PCS peut provenir de la non disponibilité des ressources sur le territoire communal (non disponibles physiquement ou non recensées) et/ou d'une mauvaise appropriation de sa mise en œuvre par les acteurs. D'où l'importance de réaliser des formations/exercices autour du PCS. Il est important aussi de pouvoir tirer des enseignements des exercices et des situations réelles d'événements de sécurité civile, pour pouvoir améliorer la réponse communale dans le cas d'un nouvel événement de sécurité civile.

La question légitime qui se dégage de cette analyse est : est-ce que l'organisation prévue par le plan est suffisante (dimensionnement des missions, des ressources à mettre en œuvre, du temps de réalisation...) ?

1.4.7 Objectifs et défis du travail de recherche

L'objectif de ce travail de recherche est de fournir au Maire un outil d'évaluation *a priori* de son plan d'urgence, afin de donner des indications sur les leviers d'action pour assurer la sauvegarde de la population. Cet outil devra prendre en considération l'état des ressources utilisées pour garantir a minima l'alerte, l'information et l'évacuation de la population, tout en intégrant la disponibilité et la gestion des ressources humaines et matérielles. Il devra pouvoir s'adapter à un contexte dynamique (allocation de ressources, temps) et tenir compte de la mise à jour des informations.

Développer un outil d'évaluation des plans d'urgence amène à relever plusieurs défis. Il en existe deux principaux. Le premier concerne la manière d'appréhender la complexité d'un système comme les plans d'urgence. Le deuxième concerne quant à lui la manière d'évaluer le plan d'urgence et de renvoyer une information pertinente aux parties prenantes quant à sa capacité à remplir pleinement ses fonctions de protection de la population.

1.4.7.1 De la Modélisation des plans de secours ...

Afin de proposer une évaluation du plan de sauvegarde, il faut d'abord appréhender ses mécanismes : cette étape n'est pas simple à cause de la complexité du plan de secours et de

la situation qu'il décrit [Flaus, 2010]. Ces derniers sont dans le détail spécifiques à chaque collectivité locale, mais suivent les mêmes objectifs (alerte, évacuation de la population...).

Pour pouvoir représenter les mécanismes du plan de sauvegarde et traiter de la diversité des ressources qu'il emploie, il semble donc nécessaire de passer par une modélisation de ce dernier, afin de visualiser les interactions entre les ressources et les missions auxquelles elles participent. Il pourra alors être distingué la répartition des ressources en fonction des actions à mener [Wybo et Kowalski, 1998].

Il existe différents modèles qui permettent de représenter la situation d'urgence [Karagiannis *et al.*, 2010, Kolen *et al.*, 2012, Robert *et al.*, 2013, Piatyszek et Karagiannis, 2012] et l'utilisation de la modélisation est croissante [Jain et McLean, 2003]. En formalisant le processus complexe de gestion d'événements de sécurité civile, elle permet d'améliorer différents points :

- la formation des premiers secours
- la connaissance des conséquences potentielles
- le maintien des opérations dans les lieux non atteints par l'événement
- la gestion du trafic
- la répartition efficace des victimes dans les hôpitaux appropriés

En résolvant la problématique de l'appropriation des mécanismes complexes du plan de sauvegarde par l'utilisation de modèles, la problématique relative au niveau de détail, ou encore le niveau de profondeur qu'on donne au modèle fait surface. De la même façon, choisir cette voie impose d'admettre que le modèle est une vue simplifiée de la réalité et de garder cela à l'esprit. La modélisation devra répondre au principe KISS (Keep It Small and Simple) [Ishida, 2002], c'est-à-dire qu'avec un minimum d'information (une information suffisante), il est possible de représenter au mieux la réalité.

1.4.7.2 ... Vers une démarche d'évaluation des plans de secours

Une fois la modélisation des interactions entre les ressources et les missions réalisées, la question qui vient est de savoir quelles sont les caractéristiques qui devront être étudiées pour pouvoir donner une information suffisante au Maire sur la capacité du plan à fonctionner dans une situation donnée. En fonction des caractéristiques retenues, il faudra proposer une démarche d'évaluation pour déterminer l'efficacité du plan (ou comment combiner les caractéristiques étudiées pour en ressortir l'information intéressante) et alors l'intégrer à la démarche de modélisation. Finalement, pour construire une démarche complète, la modélisation devra également intégrer le moyen de recueillir l'information sur ces caractéristiques.

Dans les chapitres suivants, il sera discuté et justifié l'utilisation des défaillances des ressources comme élément d'observation pour produire des indicateurs de fonctionnement du PCS. Cette démarche devra alors présenter, à la suite d'un audit sur les défaillances

des ressources, des résultats permettant d'identifier quels sont les éléments du modèle qui contribuent à le mettre en péril. Grâce à la modélisation, il sera alors possible de tester plusieurs scénarios (type d'événement, type de ressources...).

Conclusion

Ce chapitre présente l'intérêt de ces travaux de recherche en exposant d'abord les problématiques de notre société moderne à s'étendre dans des zones à risques, dont la fréquence et l'intensité ne cesse d'augmenter. Par la suite, ont été présentés les mécanismes organisationnels de gestion d'événements de sécurité civile. D'abord les principes généraux extraits de la littérature, puis l'application qu'il en est fait sur le territoire national. La troisième partie de ce chapitre a présenté en détail l'objet d'étude de ces travaux : le PCS, et pourquoi s'intéresser à un plan de gestion d'urgence au niveau local. Le PCS décrit les aléas combinés aux enjeux locaux tout en décrivant l'organisation et les moyens à mettre en œuvre lors d'un événement de sécurité civile. S'agissant du premier maillon de la réponse de sécurité civile en matière de sauvegarde de la population, il est important que l'organisation qu'il décrit ne faillisse pas lors de la survenue d'un événement. Cependant, les instances décisionnaires ne disposent pas d'outils suffisamment appropriés pour leur renvoyer cette indication. La quatrième partie illustre les problématiques et enjeux afin de fournir aux instances décisionnaires une méthode d'évaluation de leur système organisationnel que sont les PCS. Parmi celles-ci sont identifiées : le caractère statique d'un plan, l'importance des acteurs, le caractère secondaire accordé à la prévention des risques dans les collectivités locales et le manque de systématisme dans les outils d'analyse existant. Cette dernière partie, qui ouvre la voie à une démarche d'évaluation des plans, est présentée dans le chapitre suivant.

Des points de vigilance ont été identifiés pour la modélisation et la mise en place d'une démarche d'évaluation :

1. La modélisation doit fournir un modèle capable d'identifier les fonctions et les ressources du PCS
2. La modélisation doit intégrer la prise en compte des défaillances comme éléments d'observation
3. Le modèle issu de la modélisation doit avoir un important degré de liberté sur son adaptabilité afin de pouvoir traiter tout type d'événement
4. Le modèle doit être au bon niveau d'abstraction, pour appréhender la complexité du PCS (diversité des ressources, répartitions des ressources, détenteurs...)
5. La démarche doit intégrer en entrée le recueil sur les caractéristiques des ressources (défaillances)
6. La démarche doit fournir en sortie un diagnostic sur les éléments du plans qui le mettent en péril.

Chapitre 2

Outils et méthodes pour la modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle des plans de secours

Sommaire

Introduction

Connaissant désormais les enjeux de la planification d'urgence, décrite dans le chapitre précédent, il convient, pour mener une évaluation des plans de secours, de les modéliser. Les plans d'urgence sont des processus complexes et décrivent une situation dynamique et changeante. Ils doivent pouvoir s'adapter en fonction des événements et mobilisent un nombre et des types de ressources importants au cours de leur mise en œuvre. Il est donc nécessaire d'en avoir une représentation simplifiée pour pouvoir mener des analyses et quantifier leur degré de fonctionnement.

Le premier défi à relever est alors de pouvoir modéliser un plan de secours, pour comprendre les interactions entre ces ressources au cours d'un événement de sécurité civile. Appréhender ces notions de relations ressources/missions permet de mettre en évidence des relations complexes. Par exemple, il est possible d'identifier qu'une ressource participe à plusieurs missions tout au long du processus de gestion d'urgence. Il est donc nécessaire de savoir à quelle mission elle participe et à quel moment de la mise en œuvre du plan, pour éviter de générer des périodes où la ressource est requise par deux missions simultanément, ce qui créerait un manque de cette ressource pour l'une des missions.

Le second défi de la modélisation est de pouvoir identifier des événements perturbateurs qui peuvent survenir lors de la réalisation de ces missions. Le modèle doit pouvoir prendre en compte ces perturbations et permettre la visualisation de la propagation de celles-ci.

Enfin le troisième défi de la modélisation est de pouvoir considérer différents niveaux de dégradation pour une même perturbation. En effet bien souvent la modélisation des perturbations n'est prise en compte que sur deux états discrets (absence ou présence de la perturbation).

Ce chapitre présente les outils permettant de répondre à ces défis de modélisation (représenter les interactions ressources/missions, représenter la propagation des perturbations et prendre en compte des perturbations à plusieurs états discrets). La première section présente une revue de la littérature sur la modélisation des plans de secours et des phases d'urgence. La seconde décrit quant à elle un modèle de propagation des événements perturbateurs au sein du modèle : les arbres de défaillance. Dans la dernière section, les principes de la théorie des systèmes multi-niveaux, pour une prise en compte des événements perturbateurs à plusieurs états discrets, sont présentés.

2.1 La modélisation en gestion d'urgence

Formaliser les plans de secours pour en faire une évaluation structurée est un pré-requis pour aisément proposer des solutions d'amélioration [Kanno et Furuta, 2006]. Ces plans, qui tentent de représenter une organisation dynamique peuvent s'avérer difficiles à analyser, par manque de structuration, s'ils ne sont pas modélisés [Flaus, 2008].

Modéliser les plans de secours doit permettre de mener une analyse systématique de ces derniers, quel que soit le plan ou la situation d'urgence. La modélisation permet autant d'accéder aux causes [Karagiannis *et al.*, 2010] d'un événement qu'à ses conséquences [Robert *et al.*, 2013]. Elle est en plein essor dans le domaine du management de l'urgence [Jain et McLean, 2003] ; cependant il n'existe pas de méthode uniformisante. Il existe autant de méthodes de modélisation que d'objets d'étude et le lien entre ces méthodes est bien souvent absent, ce qui ne permet pas d'avoir une vue d'ensemble.

Cette section décrit les différentes utilisations de la modélisation employées en gestion d'urgence (modélisation pour l'évaluation des plans de secours, modélisation des phases spécifiques de l'urgence et modélisation de la cellule de crise). Le choix d'une méthode de modélisation est discuté et une description de la méthode retenue est faite.

2.1.1 Différentes utilisations de la modélisation

Avant de présenter les différents cas d'utilisation de la modélisation en gestion d'urgence, il est nécessaire de revenir sur la définition de la modélisation et d'un de ces moyens d'utilisation : la simulation.

La modélisation peut être définit comme la construction de la représentation des systèmes d'intérêts [Maria, 1997]. L'auteur insiste sur le fait que le modèle est une représentation simplifié de l'objet modélisé, mais tend à s'en approcher. Un des objectifs du modèle est de proposer à l'analyste un moyen de prédire des changements du système modélisé. Le modèle doit s'approcher du système réel mais rester dans une complexité abordable pour permettre son utilisation. Un modèle est souvent utilisé dans et développé pour réaliser des simulations. La simulation est décrite comme une utilisation de la modélisation. Elle permet de tester des configurations du système modélisé, qui seraient difficiles à réaliser ou trop coûteuses dans la réalité. Ceci permettant de mesurer la performance du système modélisé (existant ou proposé) sous différentes configurations de ce système.

2.1.1.1 Modélisation pour l'évaluation des plans de secours

[Karagiannis, 2010] constate que le seul outil pour analyser les plans de secours est le retour d'expérience. Cependant, même si c'est un outil utile et puissant, il ne permet d'identifier que les défaillances déjà survenues dans l'organisation mise en œuvre par les plans. Il ne permet pas d'anticiper les potentielles défaillances. Ainsi il ne permet pas une analyse exhaustive des plans de secours [Jackson, 2008, Lagadec, 2007]. L'auteur précise qu'il

existe un réel besoin en analyse systématique des plans de secours [Lagadec, 2007, Kanno et Furuta, 2006, Jackson, 2008, Alexander, 2005, Alexander, 2002, Mayer, 2005], ce qui permettrait de les évaluer de façon homogène. Il fait donc le constat que peu de travaux s'intéressent au développement d'une méthodologie d'analyse des plans de secours [Larken *et al.*, 2001, Ramsay, 1999, Karagiannis *et al.*, 2010]. Il note cependant deux méthodes : celle de Larken [Larken *et al.*, 2001] et celle de l'armée de terre américaine [U.S. Department of the Army, 1997]. Il constate que dans la méthode de Larken, qui s'intéresse à donner un score de performance du plan par questionnaire, il y a un manque de structure. Celle de l'armée de terre américaine, quant à elle, permet l'identification, l'évaluation et le contrôle des risques au travers d'analyse similaire à l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et Criticité) et de matrices de risques. Elle est cependant jugée insuffisante, car elle ne prend pas suffisamment en compte l'aspect structurel de l'objet d'étude.

[Henstra, 2010] propose une grille d'évaluation des programmes de management d'urgence et la découpe selon les quatre phases de gestion d'urgence : Préparation, Mitigation, Réponse et Restauration. Cette grille d'évaluation comporte des questions en entrée par lesquelles l'utilisateur répond en sélectionnant un niveau de performance selon des réponses fermées. Chacune des réponses est associée à une valeur qui est pondérée de 1 à 2. Cette évaluation permet de donner un aperçu sur le degré de planification. En effet pour la majeure partie des items testés, il s'agit d'observer si, dans l'organisation décrite par le plan d'urgence, il existe des procédures ou plans pour mener à bien les missions de l'urgence. Cette évaluation des plans ne repose pas sur une base de modèle, mais permet tout de même une analyse systématique. Toutefois, même s'il est possible d'avoir une idée précise de l'état des ressources organisationnelles grâce à ces travaux, il est plus difficile d'avoir une idée de l'état des ressources humaines, et impossible d'obtenir de l'information sur l'état des ressources informationnelles ou techniques.

2.1.1.2 Modélisation des phases de l'urgence

En gestion d'urgence, il existe une multitude de modèles sur différentes parties de l'urgence. Les deux plus représentés sont : l'évacuation [Kolen *et al.*, 2012, Li *et al.*, 2012b, Siebeneck et Cova, 2012, Guanquan et Jinhui, 2012, Georgiadoua *et al.*, 2007, Chang *et al.*, 2014] et l'hébergement [Dombroski *et al.*, 2006, Li *et al.*, 2012a].

2.1.1.2.1 Modélisation de l'évacuation

Dans la littérature, une part importante est concentrée sur la problématique liée à l'évacuation. Il est intéressant d'étudier cette mission car il s'agit d'une fonction majeure dans la mise en œuvre des plans de secours. En effet, l'action d'évacuation doit être envisagée comme ultime recours, car elle est souvent longue à mettre en œuvre, et coûteuse en termes de temps, d'argent et de crédibilité des autorités [Kolen *et al.*, 2012]. Le mouvement de population est un phénomène commun lors des menaces environnementales, avant, pendant et après la catastrophe [Siebeneck et Cova, 2012]. Le succès d'une évacuation réussie, repose

sur la capacité de la population à respecter les consignes d'évacuation [Dombroski *et al.*, 2006]. Il est important de bien choisir la voie d'alerte et de préparer la population à évacuer. Il a été démontré qu'une information diffusée par les média baisse de 10% la capacité de la population à suivre les consignes d'évacuation. Au contraire, une préparation de la population à faire face à une évacuation augmente en moyenne de 25% cette capacité. Une part importante est donnée à la diffusion de l'information [Jennex, 2007].

[Kolen *et al.*, 2012] proposent un modèle probabiliste pour déterminer les pertes humaines lors d'évacuations de masse, appliqué au risque d'inondation. L'évacuation peut sauver des vies mais est coûteuse. Son succès dépend principalement du temps disponible, de la réponse des citoyens et des autorités, ainsi que de la capacité des infrastructures. Ils notent que dans la plupart du temps, les problématiques d'évacuation se basent sur des scénarios au meilleur cas. Les auteurs proposent donc un modèle probabiliste, capable de prendre en considération différentes options d'évacuation et de donner un résultat en termes de vies perdues.

[Li *et al.*, 2012b] décrivent un modèle spatio-temporel pour l'évacuation sous forme de programme linéaire stochastique afin de minimiser les pertes humaines. Il permet de tester différentes stratégies d'évacuation prises par les instances publiques. Ainsi ils permettent, grâce à la modélisation de différents choix d'évacuation, à pied ou motorisé, par des moyens publics ou non, selon les conditions de trafic routier et météorologiques, d'optimiser les choix en terme d'évacuation.

[Georgiadoua *et al.*, 2007] développent un modèle spatio-temporel de la distribution de la population à évacuer autour d'un site industriel. Basé sur une représentation en chaine de Markov et de simulation Monte-Carlo, il permet de déterminer des solutions d'évacuation alternatives, garantissant au mieux l'intégrité de la population.

[Chang *et al.*, 2014] proposent également de s'intéresser aux chemins optimaux dans le cas d'une évacuation. Leurs travaux orientés sur la logistique mettent au point un algorithme pour déterminer ces chemins optimaux, considérant plusieurs contraintes de population à évacuer, avec un nombre de véhicules variables. Ils sont également en mesure de planifier l'ordre de passage aux points de rassemblement, vers les centres d'hébergement d'urgence.

[Siebeneck et Cova, 2012] s'intéressent à la représentation de la perception du risque de la population lors de l'évacuation jusqu'à leur retour. Le mouvement de population est un phénomène commun lors des menaces environnementales, avant, pendant et après la catastrophe. Les auteurs exposent une augmentation de la perception du risque jusqu'au lieu de l'évacuation et une légère diminution au retour de la population dans son habitat. Ils modélisent donc le comportement de la population face à un risque.

Sur la base d'arbres d'événements, [Guanquan et Jinhui, 2012] modélisent des scénarios d'incendies pour aider l'évaluation des évacuations d'urgence. Quand la plupart des évaluations pour l'évacuation ne s'intéressent qu'à une comparaison du temps disponible par rapport au temps requis, les auteurs proposent d'étudier la probabilité d'occurrence de ces différents scénarios. Leur approche décrit donc une analyse stochastique dépendant du temps des scénarios probables. Pour se faire, ils combinent Chaine de Markov et arbres de consé-

quences.

L'évacuation est un enjeu primordial dans l'organisation de gestion d'événement de sécurité civile. De nombreux travaux s'intéressent à décrire ce phénomène afin de l'optimiser. Cependant, les modèles et exploitations présentés ci-dessus ne prennent pas suffisamment en considération l'ensemble du processus de gestion d'événement, notamment l'allocation de ressources humaines qui gèrent cet événement, leur niveau de formation et degré d'expérience.

2.1.1.2.2 Modélisation de l'hébergement

[Dombroski *et al.*, 2006] travaillent à déterminer une approche structurée sur la prédiction des comportements de la population lors d'évacuation et d'hébergement d'urgence, basée sur une étude de risque formelle. Celle-ci inclue des paramètres qui affectent potentiellement le comportement de la population, comme le lieu (domicile ou travail) et l'information (médiatique ou officielle). Cette étude est menée par des experts, leurs résultats servant à alimenter le modèle et les scénarios issus de ce dernier. L'étude permet de prédire les comportements de la population (sa capacité à respecter les ordres) et de donner ainsi une vision aux autorités sur l'efficacité/performance de leur décision. Finalement les auteurs précisent que les informations diffusées par les média baissent la capacité de la population à suivre les ordres, à l'inverse, la préparation de la population l'augmenterait.

[Li *et al.*, 2012a] dans leurs travaux, se consacrent à la modélisation de scénarios par programmation pour optimiser les choix d'hébergements d'urgence. Ils intègrent différents scénarios d'ouragans et mettent l'accent sur l'importance de la demande en capacité d'hébergement. Ils utilisent la programmation linéaire pour résoudre ce problème d'optimisation, en introduisant des heuristiques.

Le constat sur les modèles ayant trait à la modélisation de l'évacuation s'applique aux modèles utilisés pour traiter de l'hébergement d'urgence. Centrés sur la population et les ressources matérielles, ces modèles ne traitent que peut les aspects de formation et le degré d'expérience des acteurs de l'événement.

2.1.1.3 Modélisation de la cellule de crise

Certains travaux s'intéressent à la modélisation de la cellule de crise [Lachtar et Garbolino, 2011]. Ceux-ci présentent une méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité et de la performance des cellules de crise des PCS. A base d'une approche systémique et de la modélisation UML, cette méthodologie repose sur 4 étapes :

1. Observations : description de la cellule de crise en termes d'acteurs et d'interactions. Chacun étant caractérisé par ses missions/objectifs, moyens, contraintes et relations
2. Modélisation : grâce à la modélisation UML, les auteurs représentent les interactions entre les acteurs. A ce stade deux modélisations sont réalisées. Le premier modèle

représente la cellule de crise telle qu'elle est décrite dans le plan. Le second modèle décrit l'organisation réelle en place. Une comparaison entre ces deux modèles est possible, permettant de déterminer si les différences impactent l'organisation de réponse à l'événement. A ce stade, la qualité de l'organisation de la cellule est obtenue par l'Analyse Préliminaire de Risque (APR) ou des arbres de défaillance et un diagramme de séquence UML

3. Caractérisation de la performance : évaluation des scénarios construits sur la base de l'évaluation de la qualité de l'organisation à l'étape 2. Pour cette étape il faut définir au préalable des indicateurs de performance
4. Modélisation dynamique : prise en compte de l'aspect temporel de la situation, grâce à l'utilisation des concepts de Système Multi-agent [Lachtar et Garbolino, 2012]

Cette modélisation se base sur la représentation de la cellule de crise. Sa construction repose en partie sur l'observation de cette dernière, afin d'alimenter le modèle. Elle nécessite alors un important volume d'informations à traiter. Elle s'attache à donner une indication sur la performance de l'organisation en place, mais pas nécessairement à diagnostiquer les causes de dysfonctionnements de l'organisation.

2.1.1.4 Vers une interopérabilité des modèles

[Jain et McLean, 2003] Constatent une augmentation du développement des outils de modélisation et de simulation à mettre en œuvre dans des contextes de réponse d'urgence. Cependant, ils mettent en avant un certain isolement des applications et un manque de communications entre elles, alors que lors d'une situation d'urgence, différents modèles et simulations peuvent être requis (ex : simulation d'explosion, réponse des véhicules de secours, trafic routier, capacité d'accueil des hôpitaux). Ils retirent que les bénéfices d'une modélisation et simulation sont les suivants :

- les premiers secours sont mieux formés
- les conséquences potentielles sont connues
- cela permet le maintien des opérations dans les lieux non atteints par l'événement
- le trafic est mieux géré
- la répartition des victimes dans les hôpitaux appropriés est plus efficace

Les applications d'un système intégré de modélisation et de simulation de la réponse d'urgence pourra servir à :

- planifier la réponse
- étudier les vulnérabilités
- déterminer l'occurrence des événements
- s'entrainer
- soutenir en temps réel les opérations

L'utilisation de modèles et simulations aide déjà à la gestion d'urgence, mais une interopérabilité de l'ensemble des outils permettrait de l'améliorer d'avantage. Les auteurs

proposent donc un cadre qui, suivant le type de scénario, permettrait de sélectionner et d'utiliser les modèles et simulations à disposition. Ce cadre sert à regrouper les modèles pour une meilleure utilisation et une meilleure visualisation de leur interopérabilité. Ainsi, les auteurs distinguent les modèles selon le type d'événement, les personnes impliquées et l'utilisation que l'on veut faire de ce modèle.

2.1.1.5 Conclusion sur la modélisation

Les modélisations, sont des outils techniques puissants pour répondre à l'urgence et aider les décisionnaires. Elles tentent d'appréhender les mécanismes complexes de ces événements (évacuation et hébergement entre autres, afin de tenter d'optimiser ces deux phases), mais peu permettent d'évaluer le processus de gestion d'urgence dans son intégralité. Elles proposent des solutions techniques d'aide à la décision. En revanche elles ne proposent pas de diagnostic des dysfonctionnements des plans, puisqu'elles ne le considèrent souvent pas dans son ensemble. Il existe peu de méthodes d'analyse des plans dans leur intégralité, et celles qui existent ne prennent pas suffisamment en compte les ressources et leurs interactions avec les missions de l'urgence pour pouvoir mener une analyse structurée des plans. La partie suivante est consacrée à la justification du choix de la modélisation qui va dans le sens d'une analyse des systèmes organisationnels complexes que peuvent être les plans d'urgence.

Les outils de modélisation analysés dans la littérature étant spécialisés sur un point particulier du processus de la gestion d'urgence, l'utilisation de ces méthodes pourra être complémentaire à celle décrite dans ce manuscrit, pour venir détailler une phase particulière de gestion d'urgence.

2.1.2 Choix d'une méthode de modélisation

Le PCS a été décrit dans les parties précédentes comme un système [1] complexe [2] de part le nombre et la nature des ressources qu'il emploie, leur répartition sur le territoire de la commune et leurs différents détenteurs (services publics, acteurs privés ou ONG). Il a la particularité d'être un recueil de documents statiques décrivant une situation dynamique. Son évaluation doit tenir compte de tous ces aspects et notamment des relations entre les ressources et les missions auxquelles elles sont assignées. Pour appréhender cette complexité, l'utilisation de la modélisation est requise. Disposer d'un modèle de plan permet alors de pouvoir mener une analyse systématique de celui-ci. Ce modèle doit pouvoir mettre en avant les interactions entre les ressources et les missions du plan. Il doit permettre aussi de répondre au second défi annoncé au début de ce chapitre : intégrer la propagation des perturbations.

1. Selon [Lissandre, 1990], un système est défini comme "un ensemble organisé, structuré, d'éléments concourant à une même fonction et qui constituent un tout cohérent".

2. La complexité d'un système est caractérisée selon [Tyagi *et al.*, 2010] par le nombre important de composants qui constituent un système. [Simon, 1976] ajoute à cette dimension le nombre d'interactions et la complexité de l'information à traiter.

Souvent les systèmes organisationnels sont représentés par des diagrammes de flux entre leurs fonctions. Cette représentation ne prend cependant pas en compte l'aspect structurel du système, ni les interactions entre les ressources et les fonctions de ce dernier. Un modèle structurel permet quant à lui de combler ce manque, en représentant les interactions entre les ressources et les fonctions, car il décrit les ressources utilisées dans le système. Utiliser un modèle structuro-fonctionnel permet donc une analyse plus fine du système : connaitre les interactions entre les systèmes, ses fonctions et ses ressources. Disposer d'un modèle peut autoriser la décomposition en sous-éléments du système et ainsi autorise la focalisation sur une partie du système.

Dans cette section le choix de se baser sur une méthode de modélisation structuro-fonctionnelle des systèmes organisationnels décrits par les plans d'urgence est discuté.

Il existe un grand nombre de méthodes de modélisation. Pour les besoins de ce travail de recherche, seulement quelques unes ont été retenues.

2.1.2.1 OSSAD

OSSAD pour Office Support Systems Analysis and Design OSSAD [Glassey et Chappelet, 2002] est issue d'un projet européen à la fin des années 80. Cette méthode ouverte et non propriétaire a pour but de gérer les problèmes organisationnels amenés par l'arrivée massive de la technologie dans les bureaux (bureautique). Elle fonctionne à deux niveaux :

Modèle abstrait : permet d'exprimer les objectifs d'une organisation et la représente en termes de fonctions (par exemple marketing, finance, production) et de paquets d'information qui circulent entre ces fonctions (par exemple statistiques, contrats). Les fonctions peuvent se décomposer en autant de sous-fonctions que nécessaire pour représenter une organisation, et les fonctions non décomposées sont appelées activités.

Modèle descriptif : décrit les moyens humains et les ressources technologiques d'une organisation. Il la représente en terme de procédures (manière de réaliser une activité) et des différentes opérations nécessaires à leur accomplissement, ainsi qu'en termes de rôles (qui participe à quelle activité), d'outils et de ressources. Il se compose de trois types de formalismes graphiques : les matrices activités-rôles, les graphes de circulation des informations qui décrivent la communication entre rôles (graphe de rôles) et entre procédures (graphe de procédures), ainsi que les graphes des opérations d'une procédure.

La mise en oeuvre d'OSSAD est simple mais peu détaillée [Karagiannis, 2010]. Elle définit un nombre important de type d'éléments qui peut vite être un facteur débordant pour le modélisateur. La modélisation à retenir doit être simple pour le modélisateur. Dans le cas de la modélisation d'un nombre d'éléments important, une taxonomie de ces derniers est souhaitable, pour aider le modélisateur dans son travail de construction du modèle.

2.1.2.2 UML

UML pour Unified Modeling Language [ISO, 2012b, ISO, 2012a] est un langage de notation orienté objet qui a été développé et standardisé par Rational Software et l'Object Management Group. Il a été conçu à la fin des années 1990 est tend aujourd'hui à être massivement utilisé dans l'industrie du logiciel [Glassey et Chappelet, 2002]. UML couvre les différentes phases du développement d'un système (analyse, conception et implémentation) en offrant neuf types de diagrammes :

Diagramme de cas d'utilisation : représente les comportements d'un système du point de vue de l'utilisateur.

Diagramme de classes : représente la structure statique d'un système sous la forme de classes et de relations et ne contient pas d'informations temporelles. Une classe est une représentation abstraite d'un ensemble d'éléments similaires.

Diagramme d'objets : représente les objets et leurs relations, un objet étant un élément particulier d'une classe.

Diagramme de séquence : représente les objets et leurs interactions selon une ligne temporelle.

Diagramme de collaboration : représente les objets, leurs liens et leurs interactions de manière structurelle.

Diagramme de transition d'états : exprime le comportement dynamique d'un objet en termes d'états, d'activités, de transitions et d'événements.

Diagramme d'activités : décrit les flux entre activités au sein d'un système. Cela permet de représenter le déroulement d'une procédure ou d'une fonction.

Diagramme de composants : montre l'implémentation physique d'un système, en termes de composants logiciels.

Diagramme de déploiement : décrit la configuration des éléments de traitement à l'exécution et les composants qui leur sont rattachés.

La méthode de modélisation UML peut permettre de modéliser tout type de processus ou système. Mais du fait de sa volonté de vouloir tout représenter, il n'en demeure pas moins que cette méthode est complexe à appréhender dans sa globalité du fait de sa technicité et reste trop générale [Karagiannis, 2010] pour la représentation des systèmes tels qu'il est souhaité dans ces travaux de recherche.

2.1.2.3 SADT/IDEF0

SADT pour Structural Analysis Design Technique [Lissandre, 1990] est une méthode de modélisation des décisions, des actions et des activités d'un système. Elle a été développée à la fin des années 1970. Elle est adaptée par l'armée de l'air américaine sous le nom de IDEF0 au début des années 1980. Cette méthode de représentation permet de décrire des systèmes

sous forme de boîte décrivant une activité avec des entrants (consommables nécessaires à l'activité), sortants (produits de l'activité), contrôles (objet de régulation de l'activité) et mécanismes (moyens utilisés pour réaliser l'activité).

SADT est donc une méthode de modélisation fonctionnelle décrivant les fonctions et ses relations. Elle permet également de décomposer un système en sous-systèmes pour ne se focaliser que sur une seule partie de celui-ci [Suh, 2001]. Cependant, cette méthode ne s'intéresse pas à caractériser les attributs communs des fonctions (ressources, modes de défaillance, variables), ni même l'attribution d'une ressource à plusieurs fonctions [Karagiannis, 2010]. Ce dernier aspect est important dans la modélisation des plans de secours, car une ressource est souvent sollicitée pour effectuer plusieurs fonctions au cours de l'événement [Wybo et Kowalski, 1998]. La méthode de modélisation retenue devra prendre en compte cette considération.

2.1.2.4 FIS

FIS pour Fonction Interaction Structure [Flaus, 2011] est une méthode de modélisation structuro-fonctionnelle. Elle permet de prendre en compte les interactions entre les systèmes, tout en décrivant les liens entre les ressources et les fonctions. Basée sur le formalisme SADT/IDEF0 elle prend en compte le caractère dynamique de l'organisation d'urgence décrite dans les plans et permet de générer des analyses de risques.

Des travaux utilisant cette méthode de modélisation ont été réalisés pour l'évaluation de la robustesse des plans de secours industriels, à base d'analyses de risque usuelles (arbre de défaillance et AMDEC)[Karagiannis *et al.*, 2010]. Pour ces raisons, cette méthode de modélisation a été retenue pour les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit. Elle est décrite en détails dans la section suivante.

2.1.3 Description de la méthode de modélisation FIS, retenue pour la modélisation des plans d'urgence

La modélisation FIS est composée de 3 couches, ou 3 vues [Flaus, 2011]. La première dénommée SysFIS est la vue dans laquelle on va retrouver la description du système en tant que tel. La seconde nommée SimFIS est une vue optionnelle servant à faire de la simulation. La dernière DysFIS permet quant à elle de générer des analyses de risques à base de modèle.

2.1.3.1 SysFIS

Cette vue est composée de 3 éléments de base : 1) Système en lui-même, 2) Fonction et 3) Ressource. Le système ayant pour but de réaliser une ou plusieurs fonctions en mobilisant des ressources, il contient les éléments fonctions et ressources.

Définitions :

- s est un système ; S un ensemble de systèmes : $s \in S$
- f est une fonction ; F un ensemble de fonctions : $f \in F$

- r est une ressource ; R un ensemble de ressources : $r \in R$
- e est un élément ; E un ensemble d'éléments : $e \in E$
- f, r sont des éléments du système s : $e \in R \cup F$

Le système (ou processus) est l'élément de base de cette modélisation. Il est scindé en fonctions et ressources. Il possède des entrants et des sortants, le reliant aux autres systèmes susceptibles d'interagir avec lui (Figure 2.1).

La finalité du système est de transformer ses ressources intrinsèques et entrantes en ressources de sortie au travers de sa(ses) fonction(s). Pour que la fonction d'un système se réalise, le système peut, si nécessaire, faire appel à des fonctions ou ressources de supports provenant d'autres systèmes. Ceci à l'instar de la modélisation d'un système organisationnel proposée par la représentation de l'Organisation Internationale de Normalisation [International Organization for Standardization, 2008].

La modélisation FIS autorise une structure hiérarchique de ces items (systèmes, fonctions, ressources). Cela permet le découpage de système en sous-systèmes, mais également des fonctions en sous-fonctions et de même pour les ressources. Il est alors possible d'assurer une décomposition du système, jusqu'à son plus petit élément. Des relations parents/enfants sont alors établies.

Les différentes ressources qui constituent un système peuvent être catégorisées en 4 types [Karagiannis *et al.*, 2010] : 1) Humaines (RH), 2) Techniques (RT), 3) Organisationnelles (RO) et 4) Informationnelles (RI). Ces ressources sont alors utilisées dans le but de produire une réponse du système au travers de sa fonction principale. Cette fonction va utiliser les ressources disponibles à l'intérieur même du système, mais également celles provenant de systèmes extérieurs (entrants). Elle produira alors une réponse (sortants) qui sera transmise aux autres systèmes.

Dans la méthode de modélisation FIS, les interactions entre les systèmes sont matérialisées par des liaisons Fonctions-Fonctions. La notion utilisée est donc celle de "service rendu" par un système. Un système va donc fournir à un autre système une ressource, au travers d'échange entre leurs fonctions respectives. Il apparaît alors qu'une même ressource pourra être sollicitée par une ou plusieurs fonctions dans différents systèmes. Les systèmes possèdent alors des relations d'interdépendances liées au partage de leurs ressources. Ces interdépendances, rendent alors le système plus vulnérable [Mcmanus *et al.*, 2007]. Cet aspect est important dans la modélisation de l'organisation d'urgence. En effet, une ressource peut servir par exemple, à la fois pour l'acheminement de matériel et pour l'évacuation de la population, augmentant la vulnérabilité du système.

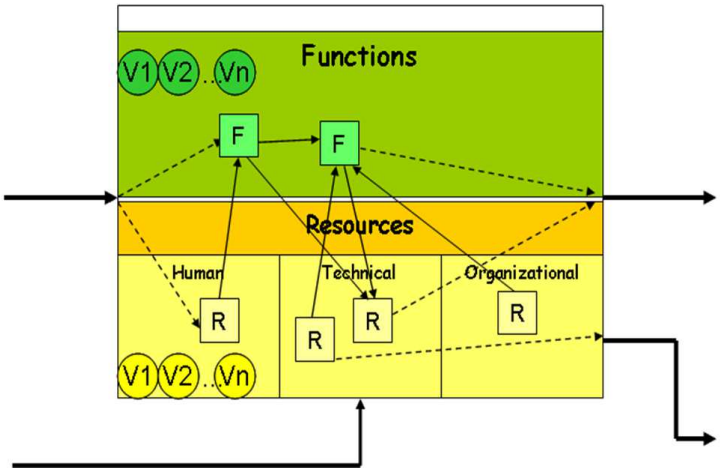


FIGURE 2.1 – Schématisation élémentaire d'un système avec interactions Fonctions-Ressources selon la modélisation FIS

Les ressources et les fonctions sont caractérisées par des variables d'états qui permettent de préciser par la suite leurs différents modes de défaillances.

Définitions :

- fm_r un mode de défaillance de la ressource r ; FM_r un ensemble de mode de défaillance de la ressource r : $fm_r \in FM_r$ et $r \to FM_r$
- fm_f un mode de défaillance de la fonction f ; FM_f un ensemble de mode de défaillance de la fonction f : $fm_f \in FM_f$ et $f \to FM_f$

La vue SysFis peut être complétée par deux vues optionnelles : SimFIS pour rendre le modèle dynamique autorisant l'exécution de simulation et DysFIS permettant de suivre les phénomènes perturbateurs au sein d'un système, générant ainsi plusieurs types d'analyses de risque.

2.1.3.2 SimFIS

Cette vue complète la vue SysFIS en ajoutant au modèle des variables et des contraintes. Elle apporte une vue dynamique du modèle. Dans cette vue, il existe trois modèles de description : 1) description de l'état, 2) description de l'évolution (par diagramme d'activité) et 3) description de l'évolution par modèle hybride dynamique. Cette vue étant optionnelle, elle n'a donc pas besoin d'être décrite dans son intégralité, mais à certains moments de l'étude, il peut se faire ressentir la nécessité de faire intervenir des parties plus complexes du modèle en incluant des variables, autorisant ainsi l'étude dynamique de ce dernier.

Grâce à cette vue, il est alors possible de caractériser le système étudié sous forme de réseaux de pétri et/ou de diagramme d'activité, décrivant ainsi le séquencement et les conditions nécessaires pour le déclenchement de fonctions.

Cette vue peut décrire un processus de début (initiateur), des actions (fonction au sens de la modélisation FIS), des conditions (ou décisions) et un processus de fin. Il est alors possible

de représenter par la modélisation FIS les aspects temporels des phases de l'urgence comme le décrivent les modèles spécifiques de phases particulières de l'urgence (section 2.1.1.2). Cette vue peut être représentée par le biais d'un diagramme d'activité au sens de la modélisation UML.

2.1.3.3 DysFIS

Cette vue permet, entre autres, de lier les modes de défaillance des fonctions et des ressources décrits dans la vue SysFIS pour générer des analyses de risques. Il est possible dans cette vue de générer des analyses de risque du type Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et Criticités ou encore Arbre de Défaillance. Ces analyses de risques lient des modes de défaillance de cause à des modes de défaillance d'effet.

Ainsi la modélisation FIS permet à l'intérieur d'un système de visualiser la propagation de perturbations, comme les défaillances. Il devient alors plus facile d'identifier les fonctions et les ressources qui seront impactées par cette perturbation. Un exemple est donné dans la Figure 2.2.

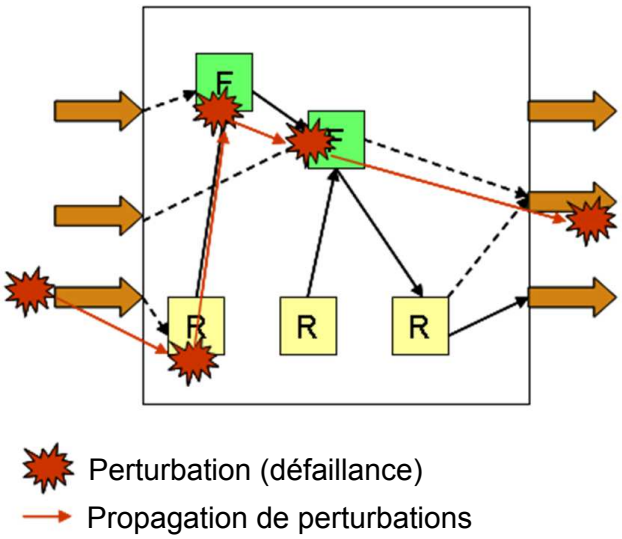


FIGURE 2.2 – Propagation des défaillances dans un système selon la modélisation FIS (Flaus, 2010)

Généralement, les perturbations d'un système peuvent être de deux types [Madni et Jackson, 2009] : Externe, provenant d'un évènement extérieur au système, comme le sont les évènements naturels et technologiques sur un système comme une commune, dans le cadre de l'étude des PCS ; Interne, comme pourrait l'être une défaillance dans le système organisationnel qui régit le plan de gestion d'urgence (absence de transmission des informations, nombre de ressources insuffisantes, panne d'un véhicule...).

2.1.3.4 Outil pour la modélisation FIS

Le logiciel x-risk (http://www.xrisk.net/fr/) est un outil de représentation graphique de la modélisation FIS. Il intègre les 3 vues présentées ci-dessus : SysFIS pour la représentation des interactions fonctions-ressources, SimFIS pour générer un modèle dynamique et DysFIS pour la caractérisation d'analyse de risque. Cet outil embarque une application de d'interface de programmation qui autorise le développement d'application tierce. Ce point est important, car la modélisation FIS embarque une analyse de risque du type Arbre de Défaillance décrite dans la section 2.2, qui nécessiste d'être implémentée par les considérations de la théorie des systèmes multi-états (section 2.3) pour répondre à l'ensemble des défis posés en introduction de ce chapitre.

2.1.4 Conclusion

OSSAD a été conçue pour traiter des problématiques organisationnelles, mais reste peu documentée. L'ampleur du détail des éléments qu'elle met en œuvre est un facteur limitant dans le choix d'une méthode de modélisation.

UML, quant à elle, est une méthode de modélisation qui tente d'être la plus large possible. Cet aspect est contraignant car il en fait une méthode complexe à appréhender. De plus elle n'intègre pas nativement de module permettant de gérer des analyses de risque.

SADT/IDEF0 a pour limites de n'être qu'une méthode fonctionnelle. Elle n'intègre pas non plus les aspects d'analyse de risque de ses éléments.

La méthode de modélisation FIS a été retenue dans le cadre de ces travaux car elle comble ces lacunes. Il existe deux principales raisons pour lesquelles cette méthode a été choisie.

La première est que le modèle obtenu est conforme aux exigences de modélisation : un objet modélisé par FIS caractérise les systèmes et représente les liens fonctions-ressources (car basé sur le formalisme SADT/IDEF0). Il est possible de descendre à un niveau de détail très précis grâce à la structure hiérarchique des éléments de modélisation. Il faut cependant faire attention à garder un niveau de modélisation et donc d'abstraction, cohérent pour ne pas alourdir le modèle (en référence au principe de parcimonie ou KISS [Ishida, 2002]). Le modèle peut inclure une représentation dynamique du système et permet de réaliser des analyses de risque à partir des éléments modélisés (Arbre de défaillance et AMDEC).

La seconde raison est que cette méthode de modélisation a déjà été utilisée pour l'évaluation de la robustesse des plans de secours industriels [Karagiannis, 2010]. Elle est aussi évolutive, permettant d'apporter des améliorations en fonction des spécificités des problèmes à résoudre.

2.2 Modélisation de la propagation des perturbations dans le modèle

Le second défi présenté en début de chapitre exigeait de pouvoir représenter la propagation des perturbations dans le modèle. C'est une des raisons pour lesquelles la méthode de modélisation FIS a été retenue. Elle permet de réaliser des analyses de risques sur les éléments du modèle. Ces derniers étant connectés par des liens fonctions-ressources, il est possible de suivre l'évolution d'une perturbation à travers tout le système.

De même en s'appuyant sur la modélisation FIS, les arbres de défaillance peuvent permettre de représenter la propagation des défaillances. C'est pourquoi la description des arbres de défaillance fait l'objet de ce paragraphe.

2.2.1 Généralités sur les arbres de défaillance

Les arbres de défaillance sont très utilisés dans les analyses de sûreté de fonctionnement et de fiabilité [Fardis et Cornell, 1982, Fujino et Hadipriono, 1986, Furuta et Shiraishi, 1984a, Kim *et al.*, 1996]. Ils nécessitent, lorsqu'il s'agit de traiter de systèmes complexes, d'être basés sur une modélisation du système étudié. Ceci dans le but d'être exhaustif quant à l'identification des modes et chemins de défaillance. Cette méthode a déjà été employée pour le traitement de la robustesse des plans de secours industriel [Karagiannis *et al.*, 2010].

L'analyse de risque par arbre de défaillance est une approche où un événement indésirable, aussi appelé événement sommet, est analysé en décrivant tous les chemins possibles entre les événements de cause, menant à cet événement indésirable. Il s'agit d'une méthode graphique d'analyse de risque. Elle est composée d'éléments (les défaillances ou événements) combinés par des portes logiques qui conduisent à l'événement sommet de l'arbre (événement critique/redouté). L'analyse de risque par arbre de défaillance répond à une symbolique bien établie (type de portes, connexions ...) [Vesely *et al.*, 1981]. Les éléments de base de la représentation par arbre de défaillance sont présentés à la Figure 2.3.

2.2.2 Portes logiques usuelles et adaptées

Les opérateurs logiques utilisés dans la construction des arbres de défaillance sont communément l'opérateur ET (. en logique Booléenne) et OU (+ en logique Booléenne).

Dans la littérature, de multiples améliorations pour les analyses de risques par arbres de défaillance ont été proposées.

[Dugan et Doyle, 1997] mettent en évidence le caractère statique des arbres de défaillance usuels. Les auteurs proposent donc de considérer de nouvelles portes afin de palier à ce problème et l'appliquent à un cas de microprocesseurs et de mémoire sur un système informatique. Ils proposent une porte "FDEP" qui provoque la défaillance d'autres composants sur le déclenchement d'un événement donné, une porte "CSP" qui permet de caractériser la

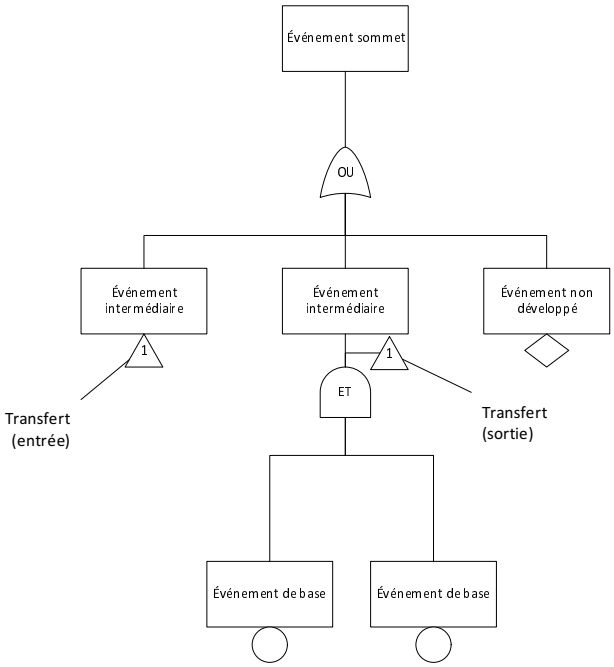


FIGURE 2.3 – Représentations usuelles pour les arbres de défaillance

redondance des composants du système et la porte "SEQ" qui n'exprime une sortie que si les défaillances arrivent dans un ordre défini par la porte.

[Pan et Yun, 1997] constatent que l'arbre de défaillance est un outil important dans l'analyse de la fiabilité des systèmes. En revanche, ils notent qu'il y a une lacune quant à la prise en compte des incertitudes sur les probabilités utilisées. De plus, ils constatent qu'il est difficile de modéliser les événements réels avec les deux principales portes ET/OU de l'arbre de défaillance. Ils modifient alors l'utilisation des portes dans les arbres de défaillance pour introduire la notion de portes floues. En effet, dans l'utilisation classique des arbres de défaillance, il est pris pour acquis que les probabilités utilisées par les évènements sont exactes or ce n'est pas le cas dans la réalité.Les auteurs se rattachent plus au concept de possibilité que de probabilité. Ils utilisent des tables de possibilités pour exprimer leurs portes floues. Ces travaux sont dans la lignée de ceux de [Tanaka *et al.*, 1983]

[Al-Humaidi et Hadipriono Tan, 2010] proposent une classification des évènements de défaillance (internes, externes, humaines) et utilisent des portes floues ET/OU. Ils introduisent également une porte moyenne (tout comme [Fujino et Hadipriono, 1986] pour traiter la problématique des délais dans les projets de construction. Cette porte moyenne traite la moyenne de l'expression des modes de défaillance.

[Fujino et Hadipriono, 1986] en plus d'introduire cette notion de porte moyenne proposent également de considérer une porte somme. Cette dernière permet de sommer les valeurs de défaillance des modes considérés.

[Ferdous *et al.*, 2011, Suresh *et al.*, 1996] traitent de l'importance des modes de défaillance entre eux en utilisant les notions de nombres flous. Ils tentent de décrire des relations entre les composants d'un système et leurs défaillances pour pouvoir justifier de leur importance.

Cette analyse de la bibliographie permet de dire que l'utilisation des arbres de défaillance est largement appropriée dans la littérature, en fonction des cas étudiés. Bien que reposant sur une sémantique bien définie, elle a été largement adaptée et notamment du point de vue de la combinaison des probabilités au niveau des portes, qui lient des défaillances de cause à des défaillances de conséquence. Cependant, malgré une large adaptation des portes logiques, une considération demeure, le mode de défaillance représenté, caractérise un état de défaillance complet.

2.2.3 Événements considérés

La plupart du temps les événements dans les arbres de défaillance sont considérés comme booléens (succès ou échec). Cette considération est réductrice, car un mode de défaillance peut avoir plus de deux états discrets [Fardis et Cornell, 1982, Fujino et Hadipriono, 1986, Furuta et Shiraishi, 1984b].

Par exemple, [Fardis et Cornell, 1982] étudient la généralisation d'un opérateur pour un système multi-états avec des composants multi-états. Ils font état de la large utilisation des arbres de défaillance et de conséquence dans l'analyse de fiabilité (des centrales nucléaires). Ils précisent que les composants sont toujours considérés comme binaires (succès ou échec). Ils soulèvent cette considération comme une limitation dans les arbres de défaillance et de conséquence, car un composant dispose de plus de deux états discrets ou peut même avoir des états caractérisés par des variables continues.

Ainsi il sera préféré l'utilisation des états de modes de défaillance sur $\{0, \ldots, 1\}$ au lieu de $\{0, 1\}$. Chaque mode de défaillance est évalué par le niveau de dégradation apporté par ses différents états. Les valeurs du mode de défaillance ne sont plus vues comme binaires ou booléennes, mais sur un intervalle. Cela s'apparente à la juxtaposition d'un ensemble de modes de défaillance booléens partiels.

Considérer un mode de défaillance à plusieurs états discrets, permet de gagner en précision dans l'analyse de risque. Au lieu de ne considérer que deux états (succès ou échec), il est alors possible d'avoir une analyse plus fine et de proposer des niveaux supplémentaires caractérisant les différents degrés de dégradation qu'apporte le mode.

Cependant, la considération d'états multiples des modes de défaillance, qui correspond au défi 3 de l'introduction de ce chapitre, nécessite d'utiliser la théorie des systèmes multi-états et de l'adapter aux arbres de défaillance [Graves *et al.*, 2007]. Cette théorie est décrite dans la section suivante.

2.3 Théorie des systèmes multi-états

Les systèmes multi-états sont des *systèmes* (section 2.3.2) dont les *composants* (section 2.3.1) peuvent avoir une performance variable. La théorie autour de ce concept est d'observer les états des composants pour en déterminer l'état du système.

Les systèmes multi-états sont classés en deux catégories :

1. Les systèmes non-homogènes, c'est-à-dire que les éléments qui le constituent n'ont pas nécessairement le même nombre d'états
2. Les systèmes homogènes, c'est-à-dire que les éléments ont le même nombre d'états

Dans la suite des travaux, les éléments du système et le système lui même auront le même nombre d'états, ceci afin de garantir l'homogénéité du système. Garantir une homogénéité des niveaux de défaillance lors de l'étude du système, permet de réaliser plus facilement des opérations sur ces niveaux. Cela permet également d'alimenter les valeurs de niveaux et de probabilités, génériquement. Dans une autre mesure, cela permet d'assurer la comparaison entre les modèles générés.

2.3.1 A l'échelle du composant

2.3.1.1 États de performance d'un composant

Les systèmes multi-états sont définis comme des systèmes ayant des niveaux de performance finis [Lisnianski et Levitin, 2003]. L'unité de ce système est le composant, caractérisé par des niveaux de performance finis. Les systèmes multi-états incluent les systèmes binaires, qui sont un cas particulier des systèmes multi-états, avec seulement deux états discrets : fonctionnement ou dysfonctionnement. Face à chaque état, on peut associer une probabilité de se trouver dans cet état. Un exemple peut être donné (Tableau 2.1).

TABLE 2.1 – Exemple d'un système de génération d'énergie et probabilité de se trouver dans chacun des états de fonctionnement

Etat	Performance (MW)	Probabilité
1	50	0.960
2	30	0.033
3	0	0.007

Pour tout élément j il existe k_j états correspondant à la performance $g_{(j,i)}$ où i est le nombre d'état : $i \in \{1, 2, ..., k_j\}$.

$$g_j = \{g_{(j,1)}, g_{(j,2)}, ..., g_{(j,k_j)}\} \tag{2.1}$$

La performance G_j du composant j à l'instant $t > 0$ est une variable aléatoire qui prend ses valeurs dans g_j. $G_j(t) \in g_j$.

TABLE 2.2 – Liste des états possibles pour le système décrit

$G_1(t)$	$G_2(t)$	$G_3(t)$	$\phi(G_1(t), G_2(t), G_3(t))$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	2

2.3.1.2 Probabilité de performance d'un composant

La probabilité de se trouver dans un état $g_{(j,k_j)}$ à un instant t est donnée par l'ensemble :

$$p_j(t) = \{p_{j,1}(t), p_{j,2}(t), \cdots, p_{j,k_j}(t)\} \tag{2.2}$$

Où :

$$p_{j,i} = Pr\{G_j(t) = g_{j,i}\}$$

2.3.2 A l'échelle du système

2.3.2.1 États de performance du système

2.3.2.1.1 Généralités

Soit un système composé de n éléments, la performance du système est déterminée par une fonction de la performance de ses composants

$$G(t) = \phi(G_1(t), G_2(t), \cdots, G_n(t)) \tag{2.3}$$

Avec

$$G_j(t), j = 1, 2, \cdots, n$$

Exemple 1 : soit un système avec 3 composants (évalué binairement), dont 2 suffisent à faire fonctionner le système. On est dans le cas d'un système 2/3.

$$G_i(t) \in \{g_{i,1}, g_{i,2}\} | i = \{1, 2, 3\} \tag{2.4}$$

Avec

$g_{i,1} = 0$ si l'élément i est dans l'état de dégradation complète

$g_{i,2} = 1$ si l'élément i est dans l'état de performance totale

La performance totale du système est donnée par ϕ résumé dans le Tableau 2.2.

2.3.2.1.2 Description de portes multi-niveaux usuelles

Les fonctions ϕ qui constituent les combinaisons de performance et de probabilité des composants sont assimilables à des portes ou opérateurs.

Les portes multi-niveaux (ou multi-états) sont le pendant des portes logiques booléennes utilisées dans les arbres de défaillance. Leur différence est qu'au lieu de traiter seulement deux états discrets, elles en traitent une infinité. Les portes combinent des couples de {Niveau, Probabilité} des modes de défaillance en entrée. Le résultat de cette combinaison produit une sortie de couples de même type.

Le comportement de ces opérateurs est décrit dans les paragraphes suivants. Dans ces derniers, les "portes" (ou fonctions) usuelles de la théorie des systèmes multi-états sont décrites. Il est possible d'observer des comportements corrélés à ceux des arbres de défaillance.

2.3.2.1.2.1 Porte ET multi-niveaux

C'est une extension de la porte ET booléenne. La fonction qui régit cette porte est une fonction $min()$. Pour un mode de défaillance j la fonction de sa porte s'écrit $min(G_j(t))$. Le Tableau 2.3 donne les valeurs de sortie de la porte ET multi-niveaux, ici illustré avec un exemple de deux modes de défaillance à 4 niveaux.

Pour chaque ligne et colonne, l'état de sortie est donc le minimum des deux états en entrée. Par exemple pour la ligne 1 colonne 2, le mode de défaillance 1 est dans son état 1, le mode de défaillance 2 dans son état 2. Le résultat de la combinaison de ces deux états amène le système dans un état de niveau 1.

TABLE 2.3 – Porte ET multi-niveaux

		Mode de défaillance 1			
		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Mode de défaillance 2	Niv. I	*Niv. I*	*Niv. I*	*Niv. I*	*Niv. I*
	Niv. II	*Niv. I*	*Niv. II*	*Niv. II*	*Niv. II*
	Niv. III	*Niv. I*	*Niv. II*	*Niv. III*	*Niv. III*
	Niv. IV	*Niv. I*	*Niv. II*	*Niv. III*	*Niv. IV*

2.3.2.1.2.2 Porte OU multi-niveaux

C'est une extension de la porte OU booléenne. La fonction qui régit cette porte est une fonction $max()$. Pour un mode de défaillance j la fonction de sa porte s'écrit $max(G_j(t))$. Le Tableau 2.4 donne les valeurs de sortie de la porte OU multi-niveaux, ici illustré avec un exemple de deux modes de défaillance à 4 niveaux.

Pour chaque ligne et colonne, l'état de sortie est donc le maximum des deux états en entrée. Par exemple pour la ligne 1 colonne 2, le mode de défaillance 1 est dans son état 1, le mode de défaillance 2 dans son état 2. Le résultat de la combinaison de ces deux états amène le système dans un état de niveau 2.

TABLE 2.4 – Porte OU multi-niveaux

Mode de défaillance 2 \ Mode de défaillance 1	Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Niv. I	*Niv. I*	*Niv. II*	*Niv. III*	*Niv. IV*
Niv. II	*Niv. II*	*Niv. II*	*Niv. III*	*Niv. IV*
Niv. III	*Niv. III*	*Niv. III*	*Niv. III*	*Niv. IV*
Niv. IV	*Niv. IV*	*Niv. IV*	*Niv. IV*	*Niv. IV*

2.3.2.2 Probabilité d'états du système

La probabilité d'être dans les états de sortie est toujours calculée de la même manière selon les entrées de la porte, et indépendamment de son type de fonction.

Pour chacune des tables de vérité construites, une probabilité d'être dans un état est assignée pour chacun des éléments en entrée. La probabilité d'être dans un état de sortie est donc le produit des (deux) états en entrée, c'est à dire le produit ligne, colonne dans la table de vérité.

Pour connaitre la probabilité finale de se trouver dans un état de sortie, il suffit de sommer les probabilités obtenues par état de sortie. La table de vérité construite contient donc un ensemble de couple {Niveau ($g_{j,i}$), Probabilité ($p_{j,i}$)}. Le Tableau 2.5 donne les valeurs des couples {Niveau, Probabilité} pour une porte ET multi-niveaux.

Pour un élément j donné,

$$\sum_{i=1}^{4} p_{j,i} = 1 \tag{2.5}$$

Finalement selon la porte décrite au Tableau 2.5, les valeurs de probabilité pour chacun des 4 niveaux sont les suivantes :

Pour le niveau I :

$$p_{1,1} \times p_{2,1} + p_{1,1} \times p_{2,2} + p_{1,1} \times p_{2,3} + p_{1,1} \times p_{2,4} + p_{1,2} \times p_{2,1} + p_{1,3} \times p_{2,1} + p_{1,4} \times p_{2,1} = 0.80 \tag{2.6}$$

TABLE 2.5 – Porte ET multi-niveaux avec probabilité

		Mode de défaillance 1			
		Niv. I $\{1, 0.8\}$	Niv. II $\{2, 0.2\}$	Niv. III $\{3, 0.0\}$	Niv. IV $\{4, 0.0\}$
Mode de défaillance 2	Niv. I $\{1, 0.0\}$	$\{1, 0.0\}$	$\{1, 0.0\}$	$\{1, 0.0\}$	$\{1, 0.0\}$
	Niv. II $\{2, 0.5\}$	$\{1, 0.4\}$	$\{2, 0.1\}$	$\{2, 0.0\}$	$\{2, 0.0\}$
	Niv. III $\{3, 0.5\}$	$\{1, 0.4\}$	$\{2, 0.1\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{3, 0.0\}$
	Niv. IV $\{4, 0.0\}$	$\{1, 0.0\}$	$\{2, 0.0\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$

Pour le niveau II :

$$p_{1,2} \times p_{2,2} + p_{1,2} \times p_{2,3} + p_{1,2} \times p_{2,4} + p_{1,3} \times p_{2,2} + p_{1,4} \times p_{2,2} = 0.20 \tag{2.7}$$

Pour le niveau III :

$$p_{1,3} \times p_{2,3} + p_{1,3} \times p_{2,4} + p_{1,4} \times p_{2,3} = 0.00 \tag{2.8}$$

Pour le niveau IV :

$$p_{1,4} \times p_{2,4} = 0.00 \tag{2.9}$$

2.3.3 Généralisation

– Pour un nombre d'éléments n en entrée de la table de vérité, les fonctions de sortie pour le calcul de l'état et de la probabilité s'appliquent alors pour :

$$NBi = \prod_{j=1}^{n} Card(g_j) \tag{2.10}$$

Avec

NBi, le nombre d'itérations de la fonction de sortie

$Card(g_j)$, le cardinal de l'ensemble des états de l'événement j

– Pour des valeurs de niveaux de sortie identiques, les valeurs de probabilités sont sommées

2.3.4 Mesure de l'importance

La mesure de l'importance d'un composant est un outil pour évaluer et classer l'impact de l'état d'un composant sur le système global. Il existe de nombreux indicateurs permettant de

mesurer l'importance d'un élément multi-états, adaptés des principes binaires de défaillance [Ramirez-Marquez et Coit, 2007] comme par exemple le critère d'importance de Birnbaum [Birnbaum, 1968], de Levitin *et al.* [Levitin *et al.*, 2003], ou encore celui de Fussell-Vesely [Fussell, 1975]. Dans leurs travaux, [Ramirez-Marquez et Coit, 2007] mettent en évidence que suivant le type d'indicateur retenu, le classement de l'importance des composants sur l'état du système peut varier.

2.3.4.1 Facteur d'importance de Birnbaum

La mesure du facteur d'importance de Birnbaum mesure la probabilité qu'un composant soit critique pour le fonctionnement du système [Birnbaum, 1968]. Elle est définie dans les systèmes binaires par B_j comme l'importance du composant j par :

$$B_j = P(G = 1|g_j = 1) - P(G = 1|g_j = 0) \tag{2.11}$$

Avec

g_j l'état du composant j

[Ramirez-Marquez et Coit, 2007] démontrent une extension de l'application de ce facteur d'importance au cas des systèmes multi-états.

$$MB_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} P(G \geq d|g_j = g_{j,i}) - P(G \geq d)}{n_j - 1} \tag{2.12}$$

Avec

MB_j la mesure de l'importance du composant j multi-états

n_j le nombre d'états du composant j

G l'état du système

d la demande caractérisant l'état attendu du système

$g_j = g_{j,i}$ l'état du composant j dans son i^{ime} état

2.3.4.2 Valeur de la réduction de fiabilité

[Levitin *et al.*, 2003] définissent cet indicateur comme mesurant le dommage potentiel causé par un composant sur le système.

Dans le cas binaire cet indicateur est donné par RRW_j, l'importance du composant j :

$$RRW_j = \frac{P(G = 1)}{P(G = 1|g_j = 0)} \tag{2.13}$$

Cette définition correspond littéralement à la probabilité que le système soit dans un état défaillant divisée par la probabilité que le système soit dans un état de défaillance sachant que le composant observé est dans son état de fonctionnement. Cet indicateur permet de

sélectionner le composant, dont le perfectionnement aura le plus grand impact sur l'amélioration globale du système [Dutuit et Rauzy, 2001].

[Ramirez-Marquez et Coit, 2007] démontrent une extension de l'application de ce facteur d'importance au cas de systèmes multi-états, devant assurer une demande d.

$$MRRW_j = 1 + \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} max\left(0, \frac{P(G \geq d)}{P(G \geq d | g_j = g_{j,i})} - 1\right) \tag{2.14}$$

Avec

$P(G \geq d | g_j = g_{j,i}) > 0$ pour tout i

$MRRW_j$ la mesure de l'importance du composant j multi-états

2.3.4.3 Facteur d'importance de Fussell-Vesely

Dans les cas usuels d'utilisation des arbres de défaillance, Fussell a proposé un facteur d'importance mesurant la dégradation maximale apportée au système par un composant.

Dans le cas binaire cet indicateur s'écrit FV_j pour un composant j :

$$FV_j = \frac{P(G = 1) - P(G = 1 | g_j = 0)}{P(G = 1)} = 1 - \frac{1}{RRW_j} \tag{2.15}$$

[Ramirez-Marquez et Coit, 2007] démontrent une extension de l'application de ce facteur d'importance au cas des systèmes multi-états.

$$MFV_j = 1 - \frac{1}{MRRW_j} \tag{2.16}$$

Avec

MFV_j la mesure de l'importance du composant j multi-états

Conclusion

Les défis posés en introduction de ce chapitre étaient de :

1. Pouvoir modéliser le plan d'urgence pour en appréhender la complexité
2. Représenter la propagation des perturbations dans le modèle
3. Prendre en compte des perturbations avec plus de deux états discrets

Les outils présentés dans ce chapitre permettent de répondre aux défis ci-dessus. Ils sont en accord avec les 3 premiers principes énoncés en conclusion du chapitre 1

1. Grâce à la modélisation FIS, il est possible d'observer les interactions entre les fonctions et les ressources de l'ensemble du plan d'urgence, de la réception de l'alerte jusqu'à la mise en sécurité de la population. Il est alors possible d'appréhender la complexité de ce système organisationnel que décrit le plan.
2. L'utilisation des arbres de défaillance permet de modéliser la propagation des perturbations dans l'ensemble du modèle. En observant les défaillances d'une ressource, il est possible de propager les perturbations à toutes les fonctions dont dépend cette ressource.
3. Les travaux précédents ne considérant que des défaillances binaires et booléenne (fonctionnement / dysfonctionnement), il est proposé dans les présents travaux de considérer ces modes de défaillance sur plusieurs états de dégradation. En utilisant la théorie des systèmes multi-états, chacun des éléments de modélisation peut être caractérisé par des défaillances multi-niveaux, acceptant plus de deux états de dégradation.

Le chapitre suivant décrit la manière de mettre en œuvre ces principes, pour la construction d'une démarche d'évaluation des plans d'urgence.

Chapitre 3

Démarche pour l'élaboration d'un outil d'évaluation des plans d'urgence

Sommaire

Introduction

Ce chapitre présente l'utilisation des outils décrits dans le chapitre 2 pour l'élaboration d'une démarche d'évaluation des plans d'urgence. Dans un premier temps, il faut adapter les méthodes et outils retenus précédemment, pour construire une démarche adaptée pour l'évaluation des plans de secours. Cette démarche vise, au travers de l'évaluation des plans, à fournir aux instances décisionnaires des indications sur le degré de réalisation *a priori* des missions prévues par le plan.

En effet, ces plans sont construits pour faire face à des événements dont la survenue n'est pas souhaitée. Cependant leurs concepteurs ne disposent pas de moyens leur permettant de garantir au préalable un bon déroulement des opérations prévues dans celui-ci. Pour cela, il est nécessaire de développer des indicateurs de fonctionnement et une méthodologie pour récolter l'information pertinente pour les évaluer. Bien que l'évaluation soit difficile, disposer *a priori* d'indicateurs sur la capacité de fonctionnement permet d'identifier les phases du plan, qui pourraient ne pas se réaliser de façon optimale le jour de son déclenchement. Ainsi cela permettrait pour des instances décisionnaires engagées dans une démarche d'amélioration, d'identifier des leviers d'action pour garantir un déroulement adéquat des missions décrites dans le plan.

Dans la première section de ce chapitre, une adaptation de la méthode de modélisation FIS est présentée, pour une évaluation des plans d'urgence à base de modélisation dysfonctionnelle par arbre de défaillance multi-niveaux. Puis dans la seconde section, la démarche générale pour l'évaluation *a priori* des plans est décrite. Les autres sections présentent en détail chacune des étapes de la démarche. Ainsi, la troisième section présente l'utilisation et l'adaptation d'un modèle générique de plan d'urgence pour appréhender la complexité des relations fonctions-ressources d'un plan d'urgence. La quatrième section décrit l'adaptation des concepts d'arbre de défaillance multi-états pour l'évaluation de la dégradation des ressources et des fonctions, à la problématique du plan d'urgence. La cinquième section présente les entrants et les sortants de la démarche d'évaluation des plans d'urgence. C'est à dire quelles sont les données d'entrée pour l'évaluation et quels indicateurs la démarche est capable de renvoyer aux instances décisionnaires. La dernière section de ce chapitre décrit une méthode pour prioriser les défaillances détectées afin de les traiter.

3.1 Intégration de la théorie des systèmes multi-états à la modélisation FIS pour traiter les défaillances multi-niveaux

Les concepts de la théorie des systèmes multi-états (section 2.3) seront adaptés dans le cadre de l'étude des PCS aux modes de défaillance des fonctions et des ressources (au sens de la modélisation FIS décrit à la section 2.1.3). Intégrer ces ensembles théoriques permet de passer d'une caractérisation de la défaillance des éléments du modèle de deux états discrets $\{0, 1\}$, à des modes de défaillance multi-niveaux.

Une défaillance (ou un mode de défaillance) multi-niveaux est un événement qui se caractérise par plus de deux états discrets.

Dans ce paragraphe les caractéristiques des modes de défaillance multi-niveaux seront décrites pour une intégration à la méthode de modélisation FIS.

Un arbre de défaillance (ou arbre d'événements) contient un enchainement logique d'événements (par exemple des modes de défaillance) combinés par des portes logiques booléennes (voir section 2.2). Dans la méthode de modélisation FIS ces événements sont décrits par :

- un identifiant
- un nom
- une probabilité
- une porte (ET/OU) qui ne s'exprime que dans le cas où l'événement est intermédiaire ou sommet

Dans le cas où la porte s'exprime (c'est à dire calcule des valeurs de probabilité), elle est dite active. Dans le cas contraire, si la porte est sur un événement de base (elle ne calcule donc pas de probabilité), la porte est dite inactive.

La Figure 3.1 illustre une combinaison de modes de défaillance par un arbre de défaillance tel qu'utilisé dans la méthode de modélisation FIS.

En adaptant les concepts de la théorie des systèmes multi-niveaux, il est proposé d'ajouter à la description des événements au sens de la modélisation FIS, une liste d'états pour chaque mode de défaillance. Chaque événement est donc décrit par :

- un identifiant
- un nom
- une liste de couples {état (ou niveau), probabilité}
  (nouvelle considération ajoutée lors de ces travaux de recherche)
- une porte

Une première étude sur l'intégration des concepts de la théorie des systèmes multi-niveaux [Girard *et al.*, 2014] a été proposée en caractérisant les éléments du modèle de manière

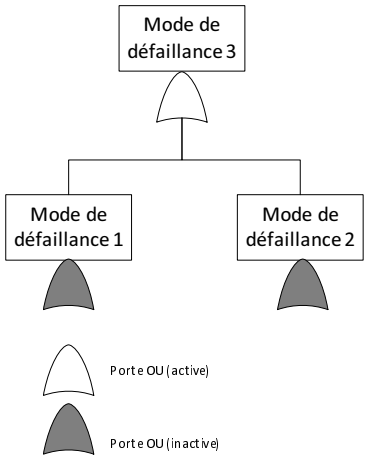


FIGURE 3.1 – Représentation d'une structure d'arbre telle que la modélisation FIS la prend en compte

non-homogène. Dans ces travaux, une ressource a un mode de défaillance sommet (nommé défaillance structurelle) qui impacte la fonction. Ce dernier est évalué de manière binaire, comme il peut être vu dans l'utilisation usuelle des arbres de défaillance. L'utilisation de modes de défaillance génériques ne sert alors qu'à alimenter en probabilité le mode de défaillance sommet de la ressource. Chaque fonction est décrite selon des objectifs à atteindre et les attributs des ressources qui permettent de remplir les objectifs fonctionnels sont caractérisés. Ainsi le nombre de niveaux de dégradation d'une fonction est dépendant des objectifs de fonctions et des attributs de ressources. Il est alors possible de décrire la fonction selon un nombre de niveaux théoriquement infini.

Ces premiers résultats ont permis de valider l'approche par propagation des défaillances multi-niveaux avec l'utilisation de la modélisation FIS. Ils n'utilisent en revanche qu'une partie de la théorie des systèmes multi-états, à savoir la représentation multi-niveaux d'une fonction à partir d'éléments binaires décrits par le mode défaillance sommet des ressources qui participent à la fonction. Une autre des limites qui peut être mise en avant est que la construction des arbres est limitée par la combinaison d'attributs de ressources du même type pour un objectif de fonction.

Utiliser l'approche précédente rend difficile la consolidation de l'utilisation des arbres de défaillance multi-niveaux, du fait d'un nombre infini d'états à caractériser. Au lieu d'utiliser les caractéristiques d'un système multi-états hétérogènes, le choix final s'est porté vers un système homogène, dont les défaillances des ressources sont caractérisées par le même nombre d'états que le système lui-même. Ceci, afin de garantir une uniformité dans le modèle générique et de pouvoir avoir des éléments de comparaison entre les briques du modèles. Pour un mode de défaillance j la liste des états qui le constitue est la suivante :

Niv. I $(g_{j,1})$ Dégradation : nulle

Niv. II $(g_{j,2})$ Dégradation : partiellement nulle

Niv. III $(g_{j,3})$ Dégradation : partiellement complète

Niv. IV $(g_{j,4})$ Dégradation : complète

Dans l'approche finale proposée par ces travaux de recherche, cette liste de niveaux est toujours constituée de 4 états, à l'instar de ce qui peut être vu dans la littérature [Graves *et al.*, 2007]. Quel que soit le type de mode de défaillance (structurel ou fonctionnel), ils seront toujours décrits par une liste de 4 niveaux de défaillance, afin de garantir l'homogénéité du système (section 2.3). Le choix de se baser sur une caractérisation des niveaux de défaillance sur une échelle paire a été fait, pour éviter une caractérisation neutre que permet une échelle impaire (position de l'échelon central). Une caractérisation sur 4 niveaux semble être suffisante. Plus de niveaux augmenterait le niveau de description, mais ne respecterait pas le principe de parcimonie qui est fixé au chapitre 2.

Des essais ont été réalisés avec des événements à niveaux de défaillance non homogènes [Girard *et al.*, 2014]. Ils donnent de bons résultats, mais sont plus long à mettre en œuvre, notamment pour la partie récolte de l'information. Il n'apporte pas non plus une augmentation significative de la pertinence des résultats pour l'utilisateur. En effet, cela génère une information qui peut être en excès. Cette dernière peut être résumée de façon satisfaisante par les 4 niveaux choisis.

Traitant désormais des modes de défaillance multi-niveaux, les portes logiques usuelles doivent être adaptées. A l'instar de la théorie des systèmes multi-états, les portes introduites pour ces travaux seront caractérisées par une fonction (ϕ), combinant pour chaque événements d'entrée leurs niveaux. La Figure 3.2 illustre les relations de modes de défaillance multi-niveaux par arbre de défaillance tel qu'il est proposé de le faire au sein de la méthode de modélisation FIS.

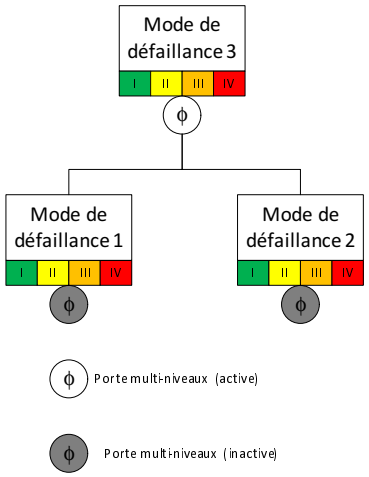


FIGURE 3.2 – Représentation d'une structure d'arbre telle que la modélisation FIS la prend en compte et selon les adaptations de la théorie des systèmes multi-états

Une extension de la méthode de modélisation FIS, intégrant la prise en compte des modes de défaillance multi-niveaux, est faite à la Figure 3.3. Cette figure montre la modification de l'attribut *Gate* (porte) pour accepter des conditions d'événements à plus de deux états discrets, avec des méthodes qui lui sont spécifiques : *getStateListFromConnectedEvent* (pour l'obtention de la liste des événements connectés à la porte), *doComputationBasedOnGate-*

Name (effectuer le calcul multi-niveaux qui est lié au nom de la porte) et *setStateListToEvent* (affecter le résultat à l'événement en cours). Ces méthodes seront décrites ci-après.

getStateListFromConnectedEvent **:** cette méthode s'occupera de récolter la liste des événements connectés à la porte. Chacun de ces événements étant caractérisé par une liste de 4 couples {niveau, probabilité}. L'objectif de cet algorithme est d'accéder aux couples de {niveau, probabilité} des événements listés dans la liste construite.

doComputationBasedOnGateName **:** cette méthode réalisera une opération de calcul sur la liste des événements identifiée précédemment. Cette opération est basée sur une fonction ϕ au sens de la théorie des systèmes multi-états.

setStateListToEvent **:** le résultat obtenu d'après la méthode précédente est une liste de 4 couples {niveau, prebabilité} qui sera alors transmise à l'attribut *StateList* (pour liste d'états) de l'événement auquel est connecté la porte dans l'arbre de défaillance.

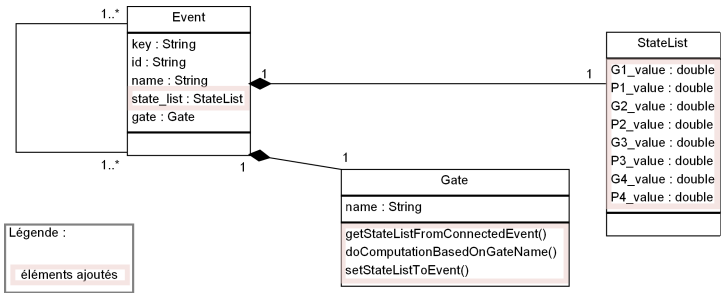


FIGURE 3.3 – Diagramme UML de classe pour l'intégration de la théorie du MSS à la modélisation FIS

Le logiciel X-Risk qui embarque la méthode de modélisation FIS dispose d'une interface de programmation. Grâce à celle-ci, une application pour la gestion des événements multi-états a été développée en langage JAVA. Cette interface permet d'une part, pour une ressource de saisir les informations sur la probabilité d'être dans des états de défaillance différents (Figure 3.4). D'autre part, elle permet de calculer pour les événements intermédiaires les probabilités de ces états en fonction des portes identifiées (Figure 3.5). Un tutoriel d'utilisation de l'application développée pour ces travaux est disponible en Annexe A.

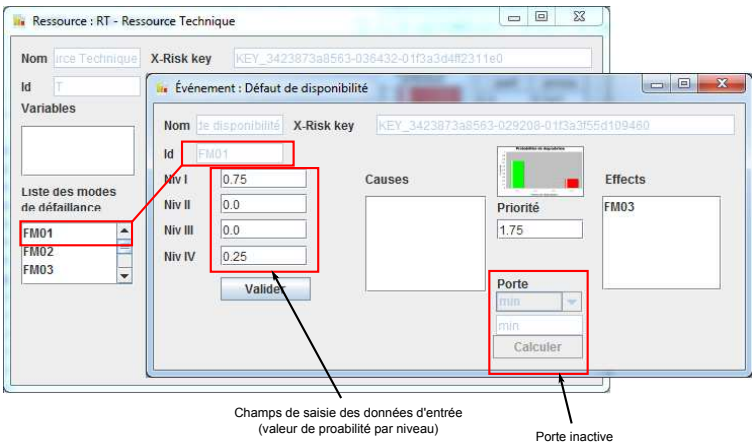


FIGURE 3.4 – Interface de saisie des probabilités des événements de base pour une ressource

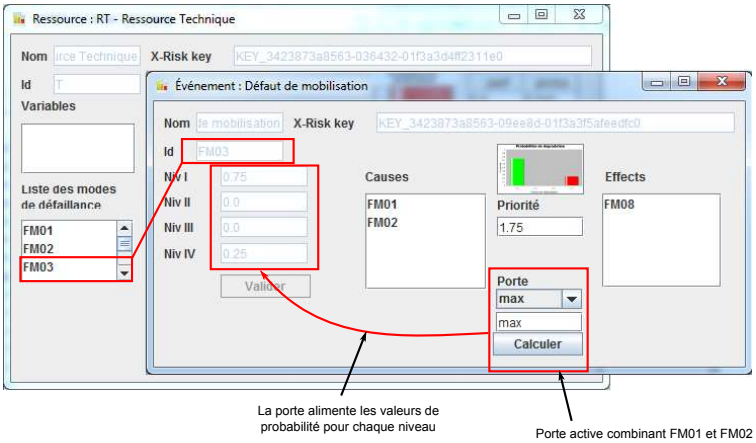


FIGURE 3.5 – Interface de configuration des portes multi-niveaux pour un événement

3.2 Démarche pour l'évaluation *a priori* des plans d'urgence

Cette démarche est composée de 3 étapes. Elle est présentée à la Figure 3.6 et décrite dans les paragraphes suivants.

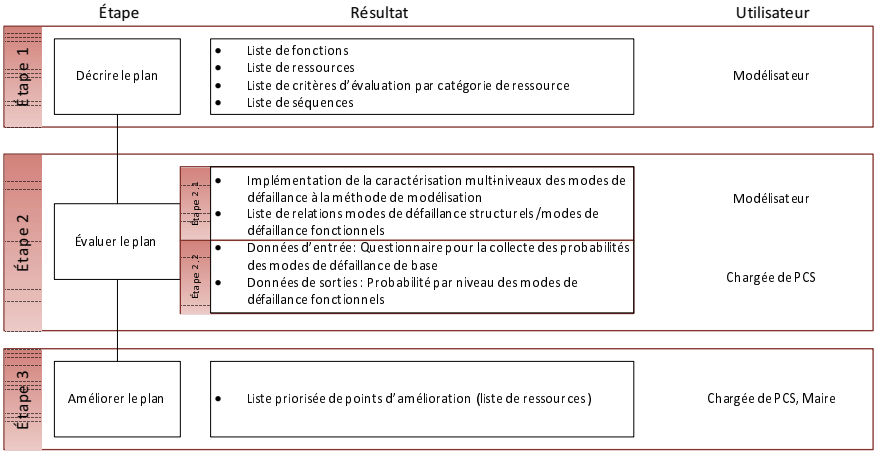


FIGURE 3.6 – Représentation des étapes de la démarche d'évaluation des plans d'urgence

La première étape décrit un modèle du plan de secours pour appréhender sa complexité et en permettre une analyse systématique. Cette modélisation, basée sur la méthode de modélisation FIS, permet ainsi d'obtenir une liste de différents éléments du modèle du plan de secours : fonctions, ressources, défaillances et séquences d'activités. Utiliser la méthode de modélisation FIS assure la représentation de la propagation des perturbations dans le modèle. Ceci, grâce aux différentes analyses de risques à base de modèle qu'elle intègre, et notamment celle présentée à la section précédente. Elle permet de caractériser les défaillances des arbres sur plus de deux états discrets, autorisant alors une analyse plus fine des causes de défaillance.

La deuxième étape est l'évaluation des plans de secours. Basée sur une caractérisation des défaillances des ressources, elle permet de donner des indicateurs de fonctionnement des fonctions utilisant ces ressources, en utilisant la propagation des défaillances par les arbres de défaillance multi-niveaux.

Enfin, la dernière étape de la démarche est une interprétation des résultats (de la deuxième étape), dans une démarche d'amélioration. Après évaluation, il est alors possible de dresser une liste priorisée des ressources névralgiques, pour permettre aux instances décisionnaires d'intégrer des considérations de corrections dans un programme d'amélioration de leur réponse de sécurité civile.

Ces étapes sont détaillées dans les sections suivantes.

3.3 Etape 1 : Modélisation FIS d'un PCS

Durant ces travaux de recherche, plusieurs PCS ont été étudiés, ainsi que le guide d'élaboration de la DDSC [DDSC, 2009]. Les PCS des villes de Metz, Nancy, Saint-Agnan et Sinsat ont été analysés [Ville de Metz, 2007, Ville de Nancy, 2009, Ville de Saint-Agnan, 2009, Ville de Sinsat, 2004].

Ces villes sont différentes tant par leur taille et leur géographie que par les risques majeurs auxquelles elles sont exposées. Ceci permet sans être exhaustif de couvrir des cas assez variés qui peuvent être représentatifs de la diversité des situations possibles. Le Tableau 3.1 présente une comparaison de ces villes en fonction de leur taille et des risques présents sur le territoire.

TABLE 3.1 – Comparaison des villes dont les PCS ont été étudiés, en fonction de leur taille et risques

Ville	Population	Risques						
		GT	I	RB	TT	TMD	FF	PA
Nancy	pop. >100,000	x	x	x	x	x		
Metz	pop. >120,000		x		x	x		
Saint-Agnan	pop. 900	x			x			
Sinsat	pop. 100	x	x	x	x	x	x	x

GT : Glissement de terrain

I : Inondation

RB : Rupture de barrage

TT : Tremblement de terre

TMD : Transport de matières dangereuses

FF : Feu de forêt

PA : Phénomènes atmosphériques

RI : Risque industriel

L'analyse de ces PCS met en évidence que les plans communaux sont construits globalement sur la même trame, ceci du fait qu'ils se réfèrent tous aux mêmes textes réglementaires [République Française, 2005, République Française, 2004]. Cela signifie qu'ils ont malgré les spécificités du territoire sur lequel ils s'appliquent, les mêmes objectifs (assurer la sauvegarde de la population). L'analyse détaillée de ces plans se trouve en Annexe B. Grâce à cette analyse, un modèle générique de plan a pu être construit, permettant de décrire les grandes étapes du PCS avec le formalisme de la méthode de modélisation FIS. Bénéficier d'un modèle générique, permet pour les instances décisionnaires d'obtenir rapidement un modèle de la situation d'urgence décrite par leur plan. Cela permet également d'obtenir des points de comparaison entre plans.

Le modèle générique est donc décomposé premièrement en élément de la modélisation FIS : systèmes, fonctions et ressources. Dans un deuxième temps, l'enchainement des fonctions est décrit par un diagramme d'activité, représentant le séquencement des fonctions

et leur déclenchement (vue SimFIS). Puis les modes de défaillance des fonctions et des ressources seront identifiés, caractérisant les événements de base et sommet, canevas de la propagation des perturbations par arbres de défaillance. Ils seront reliés entre eux via des événement intermédiaires.

3.3.1 Description des systèmes pour la modélisation FIS

Après l'étude des plans d'urgence et du guide d'élaboration, les différents systèmes retenus pour caractériser le PCS, garantissant la sauvegarde de la population, sont :

1. La réception de l'alerte : processus dans lequel l'information sur l'événement de sécurité civile est recueilli en mairie, par n'importe quel biais (alerte de la préfecture, par automate, témoin...)
2. La mobilisation du personnel : si la menace est avérée, le processus de mobilisation du personnel est déclenché. Par la suite, des cellules sont montées pour assurer la sauvegarde graduée de la population. Les différentes missions de ces cellules sont l'alerte, l'évacuation, l'information et l'hébergement de la population ainsi que la sécurisation des biens
3. L'alerte de la population : consiste à diffuser un message à l'encontre de la population, pour assurer sa protection
4. L'évacuation de la population : consiste à déplacer une population d'une zone à risque potentiel ou avéré afin de la protéger
5. L'information du public : consiste à diffuser un message à la population, mais sans but de la protéger
6. L'hébergement et ravitaillement : consiste à héberger temporairement la population évacuée dans une zone sécurisée et de subvenir aux besoins de première nécessité
7. La sécurisation des zones dangereuses : assure les biens privés des pillages éventuels

Ces missions décrivent le scindement de l'organisation du plan en systèmes dans la méthode de modélisation FIS. Une représentation des interactions entre ces systèmes intégrés à la méthode de modélisation FIS est donnée à la Figure 3.7. Premièrement, un système de réception de l'alerte est décrit. Suivant la nécessité, le personnel de gestion d'événement de sécurité civile est mobilisé (personnel de décision et d'action). Ce personnel remplira les missions de sauvegarde, lorsque celles-ci seront requises. Toutes les missions ne s'activent pas et ne sont pas simultanées pour un événement donné. La fonction d'évacuation étant une des fonctions primordiales comme indiqué section 2.1.1.2.1, une description détaillée de celle-ci est donnée. Pour cette fonction, ses sous-fonctions seront présentées à la section suivante. Les autres fonctions du plan sont mobilisées en suivant le même formalisme.

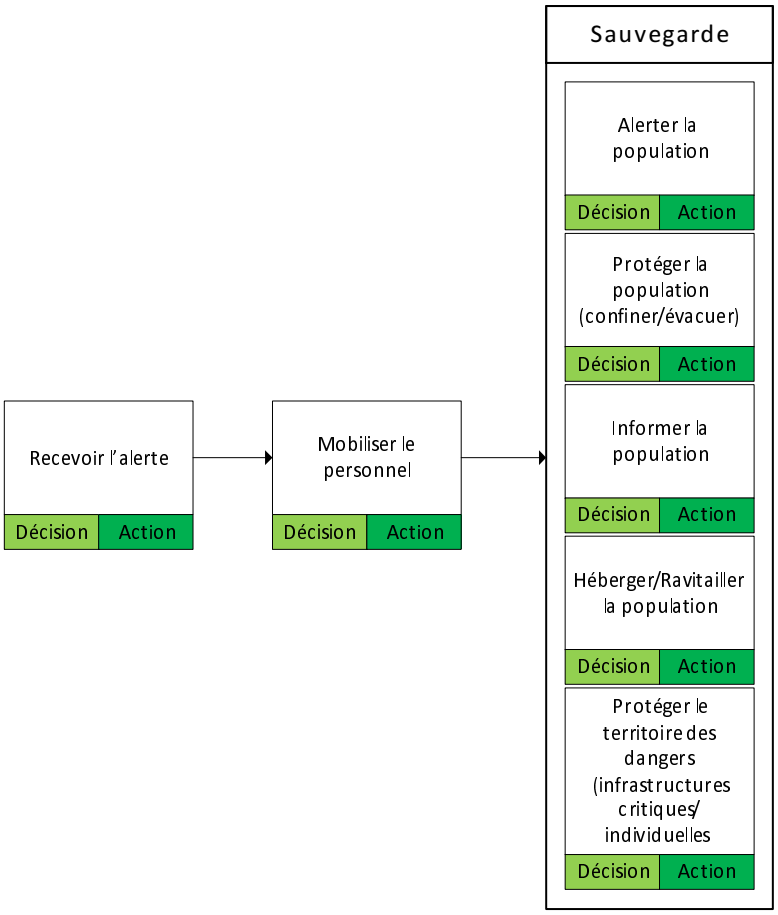


FIGURE 3.7 – Représentation de l'interaction des systèmes utilisés dans la méthode de modélisation FIS

3.3.2 Illustration de la démarche par le biais de l'analyse de la fonction d'évacuation

Au travers de la fonction "Évacuation", la démarche de modélisation est illustrée. Elle conciste à lister :

- Lister les objectifs de la fonction à analyser (section 3.3.2.1)
- Décrire les sous-fonctions utilisées (section 3.3.2.2)
- Identifier les ressources utilisées et les affecter aux sous-fonctions (section 3.3.2.3)
- Séquencer les sous-fonctions (section 3.3.2.4)
- Décrire les modes de défaillance structurels et fonctionnels (section 3.3.2.5)

Ce processus de modélisation est appliqué pour chacune des 7 fonctions principales des systèmes identifiés à la section 3.3.1.

3.3.2.1 Description littérale des objectifs de la fonction d'évacuation

La cellule en charge de l'évacuation est de loin la plus complexe à décrire, du fait d'un nombre important de missions et de dépendances entre elles. Les points clés de l'évacuation sont les suivants :

- L'évacuation est déclenchée par le DOS ou le RAC.
- La cellule en charge sectorise les zones à évacuer. C'est-à-dire qu'elle identifie la population vulnérable à l'événement (et dans sa proximité immédiate). Elle peut se baser sur des scénarios établis si l'aléa les respecte pour avoir accès très rapidement à l'identification de cette population.
- Elle définit des points de rassemblement de la population qui doivent être à proximité des secteurs d'évacuation et à l'abri de l'aléa. Ces points peuvent être identifiés rapidement dans les scénarios d'événement.
  - Une fois identifiée, la position des points de rassemblement doit être communiquée à une équipe terrain qui s'occupe de leur signalisation, si celle-ci n'est pas permanente.
- La cellule identifie ensuite un ou des itinéraires d'évacuation qui doivent être sécurisés et au départ du point de rassemblement. De même les itinéraires peuvent provenir des scénarios pré-établis.
  - Une fois ces itinéraires identifiés, elle informe une équipe terrain qui doit les baliser. La cellule ordonne alors la réquisition de véhicules pour l'évacuation en sollicitant des transporteurs.
  - Ces derniers mobilisent des conducteurs et des moyens et vérifient l'opérationnalité de ces moyens (nombre de moyens disponibles pour l'évacuation et nombre de places).
  - La cellule communique les points de rassemblement et l'itinéraire aux transporteurs.
- Remarque : Il se peut que l'évacuation se fasse par les propres moyens de la population, c'est pourquoi il est nécessaire de baliser l'itinéraire.
- La cellule ordonne ensuite la diffusion d'un pré-message d'évacuation, puis du message d'évacuation.
  - Elle informe donc une équipe terrain qui doit se charger de communiquer le lieu, l'heure et les moyens de l'évacuation à la population.
  - La population, une fois informée, se rend au lieu de rassemblement en place et procède à l'évacuation grâce aux moyens identifiés, qui doivent stationner à proximité du point de rassemblement pour rassurer la population.
- La population évacuée, la cellule doit pouvoir comparer la prévision de population à évacuer au nombre d'habitants effectivement évacués. Cette étape peut aussi se faire en amont, lorsque le transporteur communique le nombre de moyens opérationnels et sa capacité de transport. Si elle est inférieure au nombre de population à évacuer, la cellule doit recourir à des moyens extérieurs prévus ou non prévus, publics ou privés, ou adapter la procédure d'évacuation.
- Parallèlement la cellule doit ordonner la protection des zones évacuées.
  - Elle en informe donc une équipe terrain qui s'assurera de cette mission (mise en place de barrières et surveillance des lieux évacués pour éviter les vols).
- Enfin la cellule doit être garante de l'achèvement de la mission.

3.3.2.2 Description des fonctions pour la modélisation FIS

D'après la description littérale de la fonction d'évacuation faite à la section précédente, la liste des fonctions retenues pour la modélisation est la suivante :

- Sectoriser les zones à évacuer (Décision)
- Définir les points de rassemblement (Décision)
- Mettre en place les points de rassemblement (Action)
- Identifier les itinéraires d'évacuation (Décision)
- Baliser les itinéraires d'évacuation (Action)
- Identifier les moyens de transport (Décision)
- Contacter le transporteur (Action)
- Ordonner la diffusion du message d'évacuation (Décision)
- S'assurer de la diffusion du message d'évacuation (Action)
- Ordonner le recensement des personnes aux points de rassemblement (Décision)
- Recenser les personnes aux points de rassemblement (Action)
- Ordonner l'évacuation (Décision)

Ces fonctions peuvent être distinguées en *fonctions de décision* et *fonctions d'action*. Les premières sont le plus souvent réalisées au Poste de Commandement Communal et nécessitent des supports organisationnels et du personnel de décision comme ressource humaine. A l'inverse, les fonctions d'action sont caractéristiques d'une exécution opérationnelle sur le terrain et nécessitent la mise ne place de moyens techniques par du personnel d'action (ressource humaine).

3.3.2.3 Ressource du modèle générique

Suite à de précédents travaux, les ressources des plans d'urgence peuvent être classées en 4 catégories [Karagiannis *et al.*, 2010] :

- Humaine
- Technique
- Organisationnelle
- Informationnelle

Cette classification a été adaptée pour les plans d'urgence à l'échelle locale [Girard *et al.*, 2013]. Cette classification permettra par la suite de déterminer des spécificités pour chacune des catégories de ressources, notamment en ce qui concerne leur attributs, comme les modes de défaillance.

Une illustration des interactions Fonctions-Ressources est quant à elle donnée à la Figure 3.8. Cette figure illustre un exemple d'interaction fonctions-ressources des ressources pour la fonction Définition des points de rassemblement.

À la suite de l'exécution de celle-ci, les fonctions de Définition des itinéraires d'évacuation, Définition du transporteur et Mise en place des points de rassemblement sont exécutées. Les 3 premières fonctions sont des fonctions de décision et la dernière est une fonction d'action, qui mobilise des acteurs terrain.

La fonction de Définition des points de rassemblement est constituée de plusieurs ressources d'entrée : l'information sur les secteurs à évacuer, les cartes et scénarios et le personnel tactique d'évacuation, qui se charge de communiquer les informations sur les points de rassemblement et l'ordre de mise en place des points de rassemblement.

Il est possible de noter que l'information sur la mise en place des points de rassemblement est l'entrée d'autres fonctions comme la Définition des itinéraires d'évacuation et la Définition du transporteur (Flèche 1). L'ordre de mise en place des PR est quant à lui lié à la fonction de Mise en place des points de rassemblement (Flèche 2), fonction plus opérationnelle. Ainsi, une ressource de sortie pour une fonction peut être une ressource d'entrée pour une autre.

FIGURE 3.8 – Illustration de l'interaction fonctions-ressources dans la modélisation FIS

La liste complète des ressources associées aux fonctions retenues pour la modélisation FIS pour le système Évacuation est donnée dans le Tableau 3.2. Ce tableau liste toutes les fonctions et leurs interactions avec les ressources. Il est possible d'observer les mêmes relations que celles décrites dans la Figure 3.8.

TABLE 3.2 – Liste des fonctions de décision et des ressources (entrée/sortie) pour le système évacuation

Système évacuation		
Fonction	**Ressource d'entrée**	**Ressource de sortie**
S02.F01 :Définir les opérations	S02.R01 :Moyens de réception de l'information stratégique	
	S02.R10 :Ordre d'évacuation réceptionné	
S02.F02 :Définition des secteurs à évacuer	S02.R02 :Personnel tactique d'évacuation	S02.R04 :Information sur le secteur à évacuer
	S02.R03 :Cartes et scénarios	
	S02.R10 :Ordre d'évacuation réceptionné	
S02.F03 :Définition des points de rassemblement	S02.R02 :Personnel tactique d'évacuation	S02.R05 :Information sur les PR
	S02.R03 :Cartes et scénarios	S02.R11 :Ordre de mise en place des PR
	S02.R04 :Information sur le secteur à évacuer	
S02.F04 :Définition des itinéraires d'évacuation	S02.R02 :Personnel tactique d'évacuation	S02.R06 :Information sur l'itinéraire
	S02.R03 :Cartes et scénarios	S02.R12 :Ordre de mise en place de l'itinéraire d'évacuation
	S02.R04 :Information sur le secteur à évacuer	
	S02.R05 :Information sur les PR	
S02.F05 :Définition du transporteur	S02.R02 :Personnel tactique d'évacuation	S02.R08 :Information sur le transporteur
	S02.R03 :Cartes et scénarios	S02.R13 :Ordre de mobilisation du transporteur
	S02.R04 :Information sur le secteur à évacuer	
	S02.R05 :Information sur les PR	
	S02.R06 :Information sur l'itinéraire	
	S02.R07 :Fiche contact transporteur	
S02.F22 :Ammener les moyens au PR (boite grise)		

Fonction	Ressource d'entrée	Ressource de sortie
S02.F26 :Ordonner le recensement des personnes aux PR	S02.R40 :Information sur la diffusion du message d'évacuation	S02.R43 :Ordre de recensement aux PR
	S02.R41 :Personnel tactique pour ordonner le recensement	
	S02.R42 :Moyens pour la diffusion de l'ordre de recensement	
S02.F28 :Ordonner l'évacuation	S02.R15 :Information sur le nombre de personnes au PR	S02.R50 :Ordre d'évacuation
	S02.R47 :Personnel tactique de décision de l'ordre d'évacuation	
	S02.R48 :Moyens de diffusion de l'ordre d'évacuation	
	S02.R49 :Procédure de diffusion de l'ordre d'évacuation	
S02.F20 :Définir la diffusion du message d'évacuation	S02.R04 :Information sur le secteur à évacuer	S02.R37 :Ordre de diffusion du message d'évacuation
	S02.R16 :Information de la mise en place des PR	
	S02.R17 :Information sur le balisage de l'itinéraire	
	S02.R34 :Information sur la mobilisation du transporteur	
	S02.R35 :Personnel de décision du message d'évacuation	
	S02.R36 :Procédure de diffusion du message d'évacuation	

3.3.2.4 Séquencement des fonctions

Grâce à la méthode de modélisation FIS, il est possible de spécifier des déclencheurs pour chacune des fonctions. En effet, comme il a été choisi de travailler avec un modèle générique, l'activation des fonctions dépend du type d'événement. Par exemple, dans le cas d'une inondation, l'évacuation de la population peut être privilégiée alors que dans le cas d'une fuite de produit toxique pour un risque industriel, le confinement est préférable. De ce fait, toutes les fonctions décrites par le modèle ne s'activent qu'en la présence de déclencheur, comme par exemple la réception d'une information (un ordre). Ainsi l'enchainement des fonctions répond à un séquencement dans le temps, qui dépend spécifiquement de la situation. Pour pouvoir caractériser cet enchaînement et les déclencheurs des fonctions, la vue SimFIS

de la méthode de modélisation FIS est employée. Cela permet d'arriver à la représentation du séquencement des fonctions en un diagramme d'activité, comme représenté à la Figure 3.9.

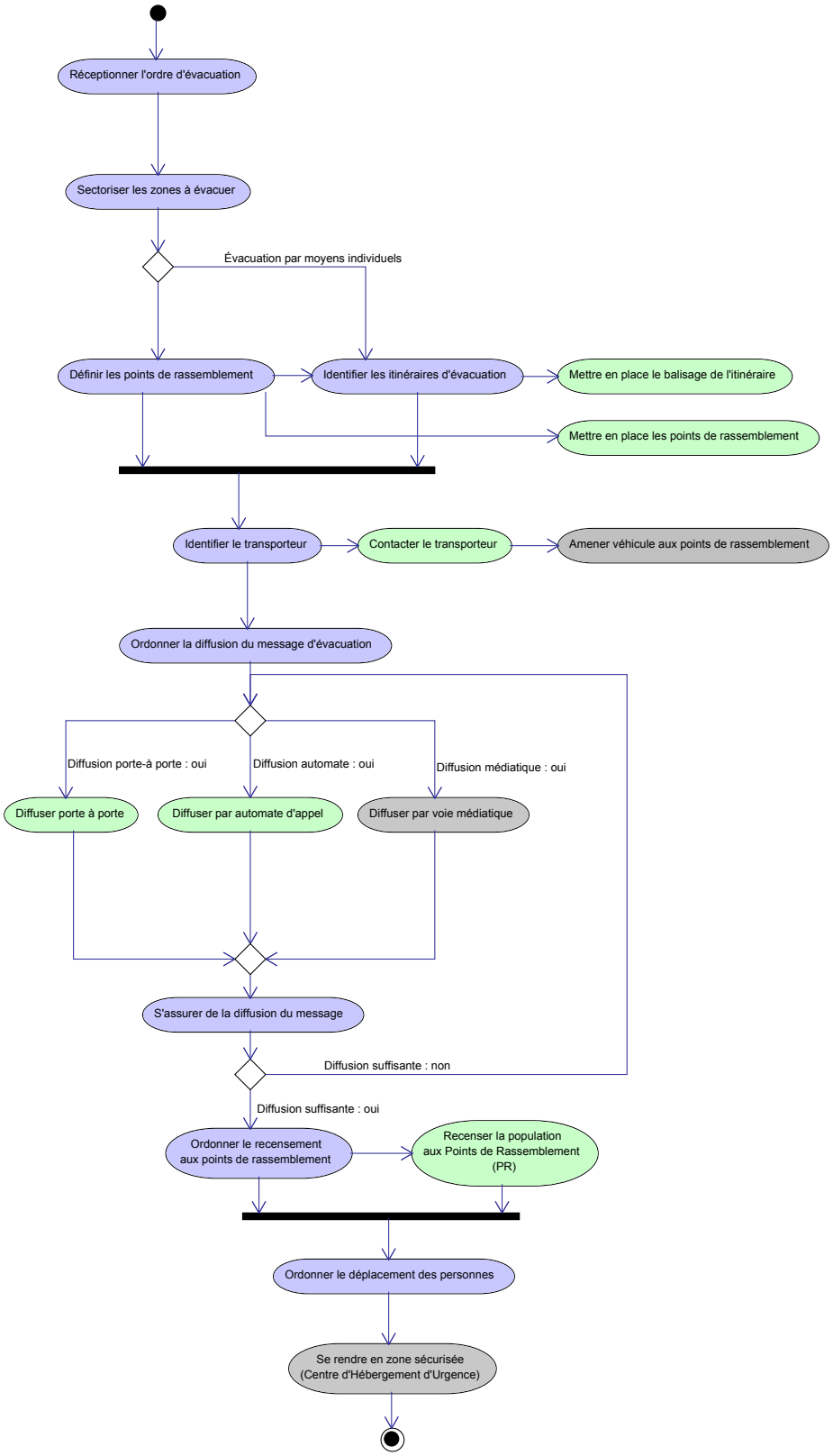


FIGURE 3.9 – Diagramme d'activité UML du système évacuation

Grâce à cette vue, il est possible d'ordonner les fonctions et de les rendre actives ou inactives suivant la caractérisation d'événements conditionnels. Connaitre le séquencement

des fonctions du plan et les conditions de déclenchement permet de préciser le modèle générique et de l'adapter en fonction de l'événement de sécurité civile en cours. De ce fait, il est possible de distinguer l'utilisation du modèle dans la phase antérieure à l'urgence et dans la phase d'urgence. Dans le premier cas, le modèle est caractérisé par des fonctions inactives (à l'exception peut-être de celle de réception de l'alerte au niveau de la mairie) puisque son cas d'utilisation est en phase non opérationnelle. En revanche dans le second cas, l'information peut être filtrée en fonction de l'activation des fonctions du modèle, autorisant alors une utilisation simplifiée des informations contenue dans le modèle, puisque seules les informations des fonctions actives sont extraites. Le séquencement des fonctions du PCS permet donc de donner la possibilité au modèle d'avoir un aspect dynamique.

3.3.2.5 Description des modes de défaillance

3.3.2.5.1 Modes de défaillance structurels des ressources

Chaque fonction et ressource, ainsi que leurs interactions sont maintenant caractérisées. Au sein de la méthode de modélisation FIS, il est alors possible de décrire pour chacune d'elle des perturbations comme des modes de défaillance. Cette description permettra par la suite la construction des arbres de défaillance.

Dans ces travaux de recherche, la taxonomie des modes défaillance déjà identifiées pour les plans d'urgence [Jacob-Cano *et al.*, 2011a, Jacob-Cano *et al.*, 2011b, Karagiannis *et al.*, 2010] a été adaptée. Les définitions et la répartition de ces modes de défaillance en fonction des catégories de ressources sont données dans les Tableaux 3.3.

TABLE 3.3 – Définition des modes de défaillance et répartition selon les catégories de ressources

Mode de défaillance	**Définition**	**RH**	**RT**	**RO**	**RI**
Défaut d'indentification	La ressource n'est pas mentionnée dans le plan (exemple liste des ressources)	x	x	x	
Défaut de localisation	La ressource n'est pas localisée sur le territoire, dans les services de la collectivité ou dans les entreprises du secteur privé (exemple cartographie des ressources)	x	x	x	
Défaut de disponibilité	La ressource n'est pas disponible pour la fonction qui la sollicite (exemple ressource requise par une autre fonction)	x	x	x	x
Défaut de joignabilité	Il est impossible de joindre la ressource, (exemple atteinte d'un point de rassemblement, communication avec le personnel)	x	x	x	
Défaut de mobilité	Défaut de mobilité, la ressource ne peut pas se déplacer (exemple atteinte physique de la ressource)	x	x		

Mode de défaillance	Définition	RH	RT	RO	RI
Défaut d'autonomie	La ressource ne dispose pas de suffisamment d'énergie (exemple panne d'électricité, panne d'essence)		x		
Défaut de dimensionnement	La ressource n'est pas suffisamment dimensionnée pour répondre aux besoins de la fonction	x	x	x	x
Défaut de formation	La ressource n'est pas formée à la réalisation de la fonction (exemple formation à l'évacuation)	x			
Défaut de vérification/maintenance	La ressource n'est pas maintenue à jour selon le planning de maintenance		x		
Défaut de redondance	La ressource ne dispose pas de ressource auxiliaire en cas de défaillance (exemple pas d'alimentation secondaire au PCC)	x	x	x	
Défaut de diffusion	La ressource n'est pas diffusée (exemple alerte non donnée, procédure non diffusée au préalable)			x	x
Défaut de mise en oeuvre	La ressource n'a jamais été mise en œuvre lors de situation d'événement de sécurité civile	x	x	x	x
Défaut de mise à jour	Défaut de mise à jour, la ressource n'est pas tenue à jour selon le planning de mise à jour			x	x

Une première version synthétique de cette liste de mode de défaillance a fait l'objet d'une communication dans une conférence internationale [Girard *et al.*, 2013]. Ces modes de défaillance génériques sont donc associés directement au type de ressource pour lesquels ils sont spécifiés dans le modèle générique. Ils ont été décrits de manière à ce qu'il soit le plus indépendant possible. Ces derniers n'obéissent pas aux mêmes cinétiques. Ce paramètre pourrait être pris en compte en caractérisant la défaillance temporelle, objet développé lors d'un séjour de recherche de 3 mois au CRP (Canada) et abordé en perspective de cette thèse [1].

3.3.2.5.2 Modes de défaillance fonctionnels

Les modes de défaillance des ressources (considérés comme modes de défaillance de base au sens de la représentation par arbre de défaillance) sont identifiés par le modélisateur au travers de la liste des modes de défaillance génériques pour les ressources. L'étape suivante est de définir les modes de défaillance fonctionnels qui constitueront les événements sommets des arbres de défaillance. Ces événements sommets serviront d'indicateurs de fonctionnement de la fonction. En menant une analyse de risque sur la fonction, il est possible de déterminer les événements redoutés pour ce dernier. Ces événements sont souvent extraits du retour d'expérience et de l'expertise des acteurs terrains.

1. Ce séjour de recherche a été financé par la Région Rhône-Alpes.

En reprenant l'exemple du système d'évacuation, il est possible de déterminer 3 modes de défaillance pour la macro fonction d'évacuation :

- Population évacuée inférieure ($<$) à la population à évacuer
- Personnes évacuées inutilement
- *Évacuation hors délais*

Un événement dont la population est en sous-effectif par rapport à la planification signifie que la population, alors non évacuée, est probablement exposée à l'aléa. Il est possible d'observer un cas particulier : aucune personne évacuée.

Le dernier mode de défaillance exploité dans ce document correspond à des personnes évacuées inutilement. Ce mode de défaillance peut entrainer une surcharge au niveau des lieux d'hébergement d'urgence, une insuffisance des moyens de ravitaillement et/ou une baisse de crédibilité des autorités [Kolen *et al.*, 2012].

Le cas de l'évacuation hors délais est à part : il tient compte des spécificités temporelles du système et de ses fonctions, ainsi que de celles de l'événement et des délais planifiés. En cas d'évacuation hors délais, il est possible d'exposer la population à l'aléa. Les modes de défaillance temporels ne sont pour l'instant pas pris en compte dans la démarche, mais l'ajout de modules (comme le séquencement des fonctions) dans la modélisation, sont des briques pour une prise en compte future de cet aspect. Une amorce sur l'aspect temporel de la défaillance a été réalisée (voir Annexe C).

3.3.2.6 Conclusion

La première étape de la démarche d'évaluation des plans de secours proposée s'intéresse à décrire le plan de secours analysé. Afin de simplifier la modélisation, de la rendre homogène et rapide à mettre en œuvre, un modèle générique a été décrit sur la base d'une étude de plusieurs Plans Communaux de Sauvegarde et du Guide d'élaboration de la DDSC. Bénéficier d'un tel modèle permet alors de se focaliser sur la partie essentielle de la démarche, à savoir l'évaluation.

Cette étape permet de décrire de manière générique les fonctions du PCS, mettant en œuvre des ressources, qui sont décrites elles aussi de manière générique. Pour chacune de ces fonctions et ressources, des modes de défaillance ont été identifiés. Les interactions fonctions-ressources et le séquencement des fonctions vont permettre la construction d'arbres de défaillance présentés dans la section suivante. Ces arbres soutiennent la propagation des observations des perturbations structurelles (au niveau des ressources) vers les perturbations fonctionnelles qui serviront d'indicateurs.

A ce jour, deux systèmes ont été décrits de manière générique dans la modélisation FIS en caractérisant les relations fonctions-ressources et leur séquencemenent. Ces deux systèmes sont le déclenchement du dispositif du PCS (réception de l'alerte) et de l'évacuation. Le premier est décrit par 8 fonctions, 36 ressources toutes catégories confondues (Humaines,

Techniques, Organisationnelles et Informationnelles) et 10 relations pour représenter le séquencement de ce système. Le système d'évacuation est quant à lui plus détaillé, il contient 18 fonctions, 52 ressources et 11 relations décrivant le séquencement de ces fonctions.

3.4 Etape 2.1 : Construction d'arbres de défaillance génériques en s'appuyant sur des portes spécifiques

Après avoir décrit de manière générique les relations fonctions-ressources des PCS, leur séquencement et leurs défaillances respectives, des arbres de défaillance pour chacune des fonctions sont bâtis. Ces derniers lient des défaillances structurelles de ressources (comme événement de base) à des défaillances fonctionnelles (comme événement sommet). Grâce à la vue DysFIS de la modélisation FIS, il est possible de décrire les relations entre les défaillances de ces éléments. Il existera donc plusieurs arbres de défaillance par fonction, un par mode de défaillance fonctionnel (section 3.3.2.5.2). L'information sur les événements de base servira à caractériser l'événement sommet, qui servira d'indicateur de fonctionnement pour la fonction.

Premièrement il sera détaillé les portes multi-niveaux ajoutées aux arbres de défaillance construits sur la base du modèle précédemment présenté. Puis, sera détaillée l'utilisation de ces portes spécifiques dans les arbres de défaillance génériques issus de ces travaux de recherche. Enfin, un focus sera fait, au même titre que dans la section précédente, sur la fonction d'évacuation. Celui-ci présentera des cas d'utilisation des portes spécifiques et des arbres génériques détaillés dans le cadre de la fonction d'évacuation.

3.4.1 Description de nouvelles portes multi-états pour le cas des arbres de défaillance multi-niveaux utilisés pour l'évaluation des PCS

3.4.1.1 Porte prioritaire (ou $k - D - prior$) multi-niveaux

Cette porte est caractérisée par le fait que dès lors que le k^{ime} niveau d'un élément est atteint, le niveau de cet élément s'impose aux autres entrées de la porte. Un exemple simple peut être donné. Prenons le cas de 2 modes de défaillance pour une ressource donnée :

- Défaut de capacité
- Défaut de disponibilité

Le mode de défaillance de capacité est dépendant de la disponibilité. En effet, en l'absence de ressource (défaut de disponibilité), même si la capacité de ce moyen est maximale (défaillance nulle), la combinaison des deux défaillances (l'une maximale et l'autre nulle) produira un niveau de sortie maximal (défaillance totale Niv. IV). Pour tous les autres états du mode de défaillance de disponibilité (Niv. I, Niv. II, et Niv. III), le niveau de sortie exprimé est celui de la défaillance de capacité. Le comportement observé pour ses autres niveaux est celui d'une porte max.

La porte décrite est donc une $4 - D$, signifiant que l'un des modes de défaillance (en l'occurrence le défaut de disponibilité) doit se trouver dans son état le plus défavorable pour l'emporter sur les autres modes de défaillance. Le Tableau 3.4 donne les valeurs de sortie pour les modes de défaillance défaut de capacité et de disponibilité. Pour ces modes de défaillance, les niveaux associés sont décrits comme suit :

- Défaut de capacité :

  Niv. I Capacité non altérée (la population prévue peut être évacuée par ce moyen)

  Niv. II Capacité altérée, mais n'entrainant pas de défaut majeur (la majeure partie de la population prévue peut être évacuée par ce moyen)

  Niv. III Capacité altérée, entraînant un défaut majeur (la majeure partie de la population ne peut être évacuée par ce moyen)

  Niv. IV Capacité totalement altérée (aucune population ne peut être évacuée par ce moyen)

- Défaut de disponibilité

  Niv. I La disponibilité du moyen est assurée en totalité

  Niv. II La disponibilité du moyen est assurée en majeure partie (le moyen peut être requis par une autre fonction, mais cette fréquence est rare)

  Niv. III La disponibilité du moyen n'est pas assurée en majeure partie (le moyen peut être requis par une autre fonction, et cette fréquence est élevée)

  Niv. IV La disponibilité du moyen n'est pas assurée en totalité (le moyen est en permanence requis par une autre fonction)

- États de sortie

  Niv. I Sortie non dégradée (valide si le défaut de disponibilité est dans un état différent du niveau IV). La population prévue peut être évacuée par ce moyen

  Niv. II Sortie plutôt non dégradée (valide si le défaut de disponibilité est dans un état différent du niveau IV). La majeure partie de la population ne peut être évacuée par ce moyen

  Niv. III Sortie plutôt dégradée (valide si le défaut de disponibilité est dans un état différent du niveau IV). La majeure partie de la population ne peut être évacuée par ce moyen

  Niv. IV Sortie dégradée. La population ne peut être évacuée par ce moyen pour cause de non disponibilité ou de capacité maximale atteinte.

TABLE 3.4 – Porte $k - D - prior$

Sortie porte $(4 - D)$		Défaut de capacité			
		Niv. I (1)	Niv. II (2)	Niv. III (3)	Niv. IV (4)
Défaut de disponibilité	Niv. I (1)	(1)	(2)	(3)	(4)
	Niv. II (2)	(1)	(2)	(3)	(4)
	Niv. III (3)	(1)	(2)	(3)	(4)
	Niv. IV (4)	(4)	(4)	(4)	(4)

3.4.1.2 Porte réductrice multi-niveaux

Cette porte est caractérisée par le fait que dès lors qu'un événement j se trouve dans un niveau i, une réduction de niveau s'effectue selon les spécifications déterminées par les experts.

Prenons le cas de deux modes de défaillance pour une ressource donnée :
- Défaut d'identification
- Défaut de localisation

Les modes de défaillance d'identification et de localisation ont un effet synergique. Dès lors que l'un est dans un niveau de dégradation plus élevé que l'autre, c'est le degré du plus faible qui s'exprime. Cette porte peut être vue comme une porte *max*, avec une réduction de niveau de 1, lorsque deux niveaux sont différents. Le Tableau 3.5 donne les valeurs de sortie pour les modes de défaillance défaut d'identification et de localisation. Pour ces modes de défaillance, les niveaux associés sont décrits comme suit :

- Défaut d'identification :

  Niv. I La ressource est complètement identifiée dans le plan

  Niv. II La ressource est en majeure partie identifiée dans le plan

  Niv. III La ressource est en majeure partie non identifiée dans le plan

  Niv. IV La ressource est non identifiée dans le plan

- Défaut de localisation

  Niv. I La ressource est totalement localisée sur le territoire de la commune

  Niv. II La ressource est globalement localisée sur le territoire de la commune

  Niv. III La ressource n'est globalement pas localisée sur le territoire de la commune

  Niv. IV La ressource n'est pas localisée sur le territoire de la commune

- États de sortie

Niv. I Sortie non dégradée. La planification est non dégradée, le gestionnaire du plan connait les ressources sollicitables et leur lieu de stockage, en vue d'une réquisition.

Niv. II Sortie plutôt non dégradée. La planification est plutôt non dégradée, le gestionnaire du plan a plutôt une bonne idée des ressources sollicitables et de leur lieu de stockage, en vue d'une réquisition.

Niv. III Sortie plutôt dégradée. La planification est plutôt dégradée, le gestionnaire du plan a une vague idée des ressources sollicitables et de leur lieu de stockage, en vue d'une réquisition.

Niv. IV Sortie dégradée. La planification est plutôt non dégradée, le gestionnaire du plan n'a aucune idée des ressources sollicitables et de leur lieu de stockage, en vue d'une réquisition.

TABLE 3.5 – Porte Réductrice

Sortie porte Reductrice (*Red*)		Défaut d'identification			
		Niv. I (1)	Niv. II (2)	Niv. III (3)	Niv. IV (4)
Défaut de localisation	Niv. I (1)	(1)	(1)	(2)	(3)
	Niv. II (2)	(1)	(2)	(2)	(3)
	Niv. III (3)	(2)	(2)	(3)	(3)
	Niv. IV (4)	(3)	(3)	(3)	(4)

3.4.1.3 Porte $k - D - Red$ multi-niveaux

Cette porte est caractérisée est une combinaison d'une porte $k - D$ et d'une porte réductrice. Cela signifie que pour deux éléments j du système étudié, un va s'exprimer jusqu'au niveau déterminé k et qu'une fois ce niveau dépassé ($i \geq k$), une réduction est opérée.

Prenons le cas de deux modes de défaillance intermédiaire pour une ressource technique donnée :

- Défaut de la ressource (regroupe les éléments de base Défaut de disponibilité, Défaut de joignabilité et Défaut de maintenance)
- Défaut de planification (regroupe les éléments de base défaut d'identification et défaut de localisation)

Cette porte caractérise le fait qu'un défaut de la ressource est plus important que le défaut de planification au moins jusqu'au niveau de dégradation II. Explicitement, tant que

la combinaison des défauts de planification n'est pas dans les niveaux de dégradation plutôt dégradé et totalement dégradé, c'est le mode de défaillance Défaut de ressource qui s'exprime. Lorsque ces niveaux sont atteints et dépassés, la sortie de la porte est dégradée. Un défaut de planification dans son état de dégradation maximale ne provoque pas un état de dégradation maximale de l'événement parent. La sortie de cette porte est illustrée dans le Tableau 3.6.

TABLE 3.6 – Porte $2 - D - RED$

Sortie porte		Défaut de ressource			
$2 - D - Red$		Niv. I (1)	Niv. II (2)	Niv. III (3)	Niv. IV (4)
Défaut planification	Niv. I (1)	(1)	(2)	(3)	(4)
	Niv. II (2)	(1)	(2)	(3)	(4)
	Niv. III (2)	(2)	(2)	(3)	(4)
	Niv. IV (4)	(2)	(3)	(3)	(4)

3.4.2 Cas d'utilisation des portes multi-états

Cette section présente les différents cas d'utilisation des portes multi-états. Les combinaisons proposées ont été validées par des personnes impliquées dans l'élaboration de PCS. Les différents cas d'utilisation seront détaillés pour une fonction spécifique du PCS dans la section suivante (fonction d'évacuation). Afin de limiter la complexité de la représentation, les modes de défaillance utilisés pour les ressources sont :

- Défaut de disponibilité
- Défaut de joignabilité
- Défaut d'identification
- Défaut de localisation
- Défaut de maintenance
- Défaut de formation

Avoir une information préliminaire sur ces modes de défaillance permet de donner un bon aperçu du processus de gestion d'événements de sécurité civile. Ces modes de défaillance ont été retenus, car ils sont communs à toutes les ressources (le Défaut de maintenance pour une ressource technique étant analogue à un défaut de formation pour une ressource humaine).

3.4.2.1 Cas général

Pour une ressource donnée, quel que soit son type (Humaine, Technique, Organisationnelle ou Informationnelle), les modes de défaillance de disponibilité et de joignabilité sont

connectés entre eux par une porte multi-niveaux *max* (chapitre 2) ; l'événement parent est dénommé Défaut de mobilisation. Il en va de même pour les défaillances d'identification et de localisation ; l'événement parent est dénommé Défaut de planification. Ces événements sont décrit à la Figure 3.10.

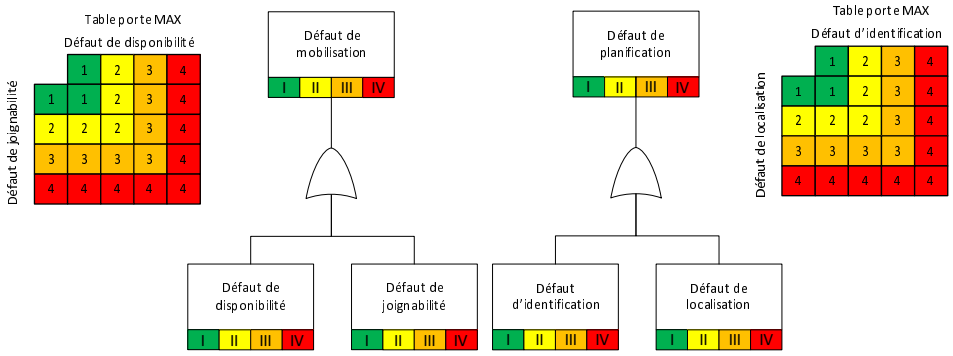


FIGURE 3.10 – Illustration des portes multi-niveaux *max* pour le défaut de mobilisation (à gauche) et le défaut de planification (à droite)

3.4.2.2 Cas d'une ressource technique (matérielle)

Dans le cas d'une ressource matérielle, le Défaut de mobilisation est connecté à un Défaut de maintenance par une porte $4-D$, qui priorise le défaut de maintenance (Figure 3.11). Une défaillance de mobilisation n'impacte donc l'événement parent (Défaut physique) que s'il existe une probabilité d'être dans le niveau de dégradation maximal.

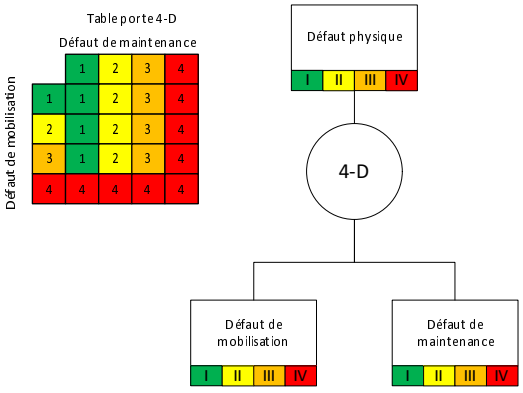


FIGURE 3.11 – Illustration d'une porte $4-D$ dans le cas de la défaillance physique pour une ressource technique

Le Défaut physique est ensuite connecté à un événement parent avec le défaut de planification, par le biais d'une porte $2-D-Red$ (Figure 3.12). Signifiant que dès lors que la planification est identifiée dans un état de dégradation de niveau III ou IV, la dégradation de l'événement parent est altérée.

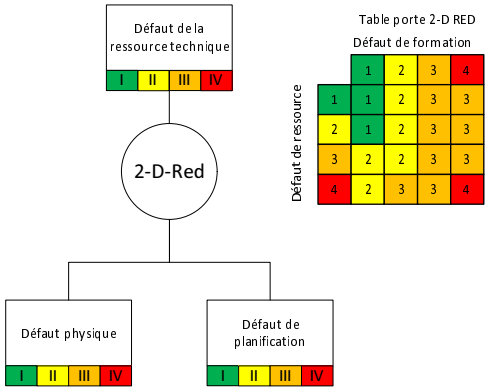


FIGURE 3.12 – Illustration d'une porte $2-D-Red$ dans le cas de la défaillance d'une ressource technique

3.4.2.3 Cas d'une ressource organisationnelle

Le défaut d'une ressource organisationnelle est géré par une porte $4-D$ (Figure 3.13) entre le défaut de mobilisation de la ressource et son défaut de planification. Ce défaut de moyens organisationnels est alors combiné au défaut de formation du personnel de décision par une porte réductrice (Figure 3.13). Ainsi, si un défaut du moyen organisationnel est avéré, il est compensé par la formation du personnel qui est sensé l'utiliser (Défaut d'utilisation).

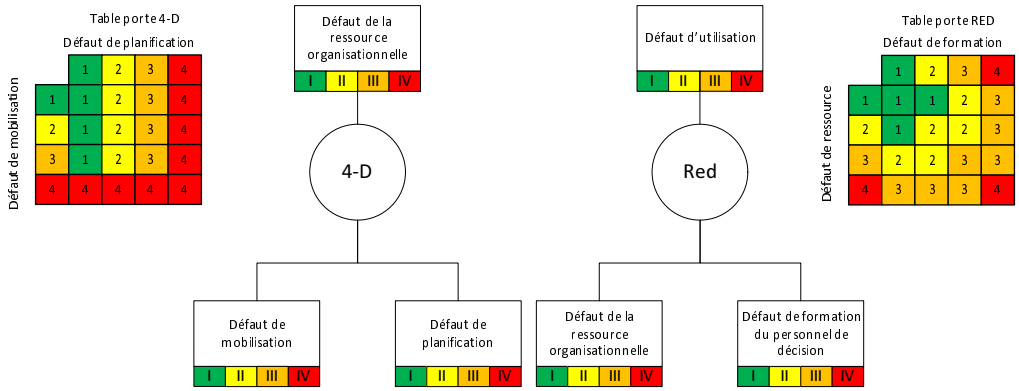


FIGURE 3.13 – Illustration d'une porte $4-D$ (à gauche) et d'une porte *Red* (à droite) pour une ressource organisationnelle

3.4.2.4 Cas d'une ressource humaine (de décision)

Pour cette ressource humaine, les défauts de mobilisation et de planification sont combinés par une porte $4-D$ (Figure 3.14) qui priorise le défaut de planification jusqu'à la survenue d'une dégradation maximale de la défaillance de mobilisation.

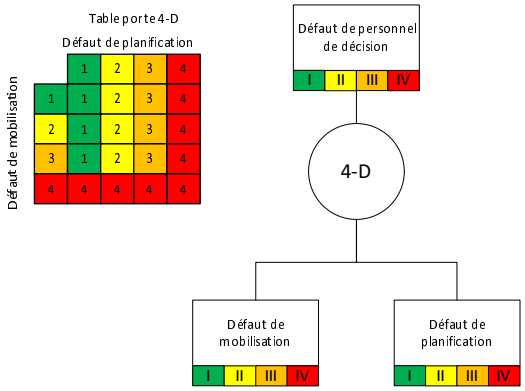


FIGURE 3.14 – Illustration d'une porte $4-D$ dans le cas de la défaillance de ressource pour une ressource humaine de décision

3.4.2.5 Cas d'une ressource humaine (d'action)

Comme pour la ressource matérielle, le défaut de mobilisation est combiné par une porte $4-D$ au défaut de formation de la ressource, puis ce défaut de ressource est connecté au défaut de planification par une porte $2-D-Red$ (Figure 3.15).

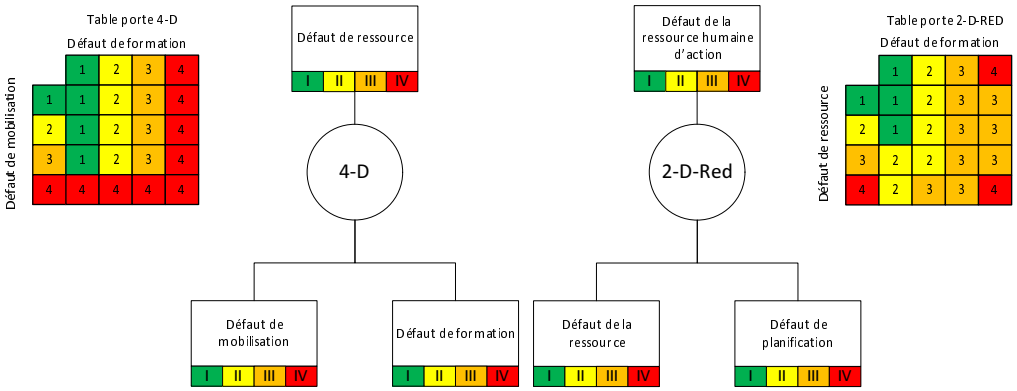


FIGURE 3.15 – Illustration d'une porte $4-D$ (à gauche) et d'une porte $2-D-Red$ (à droite) pour une ressource humaine d'action

3.4.2.6 Cas de défaillance d'une fonction en deçà des objectifs

Les arbres de défaillance précédents sont utilisés pour alimenter un arbre de défaillance générique dans le cas où une fonction se réalise en deçà des objectifs fixés. L'arbre utilisé est représenté à la Figure 3.16. Les portes utilisées sont des portes *max* multi-niveaux. L'arbre complet est donné en Annexe D.

3.4.2.7 Cas de défaillance d'une fonction au-delà des objectifs

Dans le cas d'une défaillance de fonction au-delà des objectifs, la même structure de défaillance fonctionnelle est observée. En revanche pour les ressources techniques et humaines de décision ou d'action, le défaut de mobilisation est exclu de l'arbre. En effet, pour qu'une fonction se réalise au-delà des objectifs prévus, ces ressources doivent être présentes et disponibles. En revanche, cette considération n'est pas vraie pour la ressource organisationnelle.

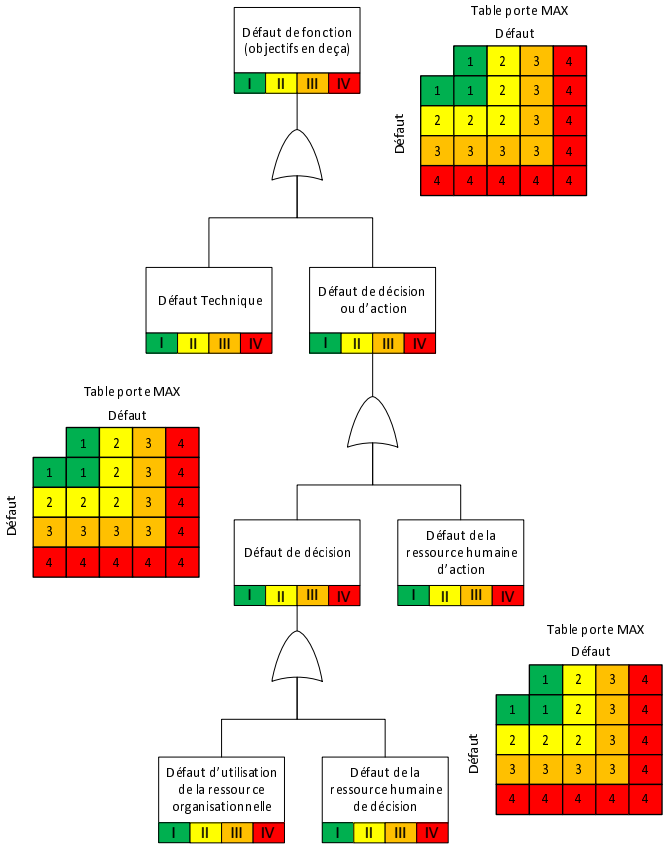


FIGURE 3.16 – Illustration d'un arbre de défaillance générique pour une fonction dont la défaillance est en deçà des objectifs planifiés

En effet, en cas d'absence de ressource organisationnelle, une défaillance au delà des objectifs prévus peut être observée. L'arbre complet est donné en Annexe D.

3.4.3 Focus sur la fonction d'évacuation

En repartant des modes de défaillance de la fonction d'évacuation (Population évacuée $<$ population à évacuer et Personnes évacuées inutilement), des relations entre événements sont décrites jusqu'aux événements de base. Le mode de défaillance d'évacuation hors délai n'étant pas détaillé dans la suite de ce chapitre, les considérations temporelles des fonctions n'ont pas été présentées.

Pour cette fonction d'évacuation, 2 arbres de défaillance sont construits. Les cas des événements Population évacuée $<$ population à évacuer et Population évacuée inutilement sont présentés dans cette section. En effet ces deux arbres présentent les caractéristiques idéales pour illustrer les propos de la section 3.4.2. A savoir, ces deux événements fonctionnels caractérisent des cas de défaillance en deçà et au-delà des objectifs à atteindre par la fonction.

3.4.3.1 Arbre de défaillance de l'événement population évacuée $<$ population à évacuer

Cet arbre de défaillance regroupe l'ensemble des défaillances des fonctions du système d'évacuation (dont le séquencement est présenté à la Figure 3.9 page 86), que ce soit des

fonctions de décision ou des fonctions d'action. L'arbre de défaillance pour cet événement est donné à la Figure 3.17.

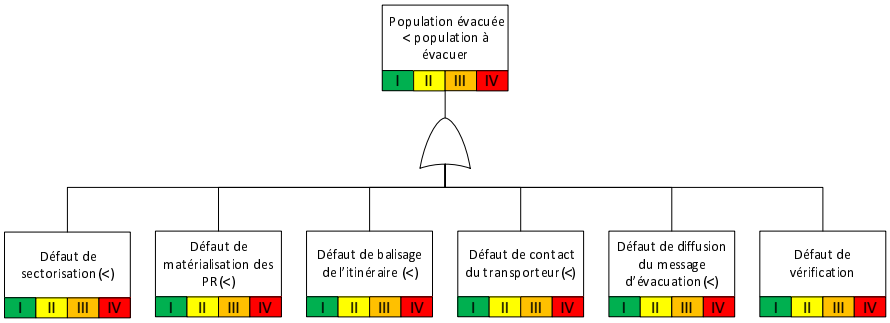


FIGURE 3.17 – Arbre de défaillance pour l'événement population évacuée < population à évacuer

La porte de l'événement est une porte *max* qui maximise les niveaux de défaillance de chacun des événements d'entrée. Sont considérés :

- Le défaut de sectorisation (sous-arbre de la fonction de décision)
- Le défaut de matérialisation des PR (sous-arbre de la fonction de décision combiné à la fonction d'action)
- Le défaut de balisage de l'itinéraire (sous-arbre de la fonction de décision combiné à la fonction d'action)
- Le défaut de contact du transporteur (sous-arbre de la fonction de décision combiné à la fonction d'action)
- Le défaut de diffusion du message d'évacuation (sous-arbre de la fonction de décision combiné à la fonction d'action)
- Le défaut de vérification (sous-arbre de la fonction de décision combiné à la fonction d'action)

A l'exception du premier défaut (Défaut de sectorisation, décrit ci-après), les arbres de défaillance des autres défauts sont basés sur un arbre de défaillance type (Figure 3.16), décrit par les éléments présentés à la section 3.4.2.

Un exemple d'arbre de défaillance pour le défaut de diffusion du message d'évacuation combinant la fonction de décision et la fonction d'action est donné à la Figure 3.18.

Dans cette figure il est possible d'observer la structure globale de l'assemblage des événements décrits à la section précédente. Les défauts de mobilisation et de planification ne sont détaillés que pour la ressource technique, mais sont construits sur le même modèle pour les autres ressources. Leur représentation a été omise dans un soucis de place sur le graphique.

Le défaut fonctionnel de sectorisation n'est quant à lui caractérisé que par une fonction de décision. La Figure 3.19 représente l'arbre de défaillance pour cet événement. Ceci s'explique par le fait que la sectorisation, qui n'est que le découpage géographique de la commune en

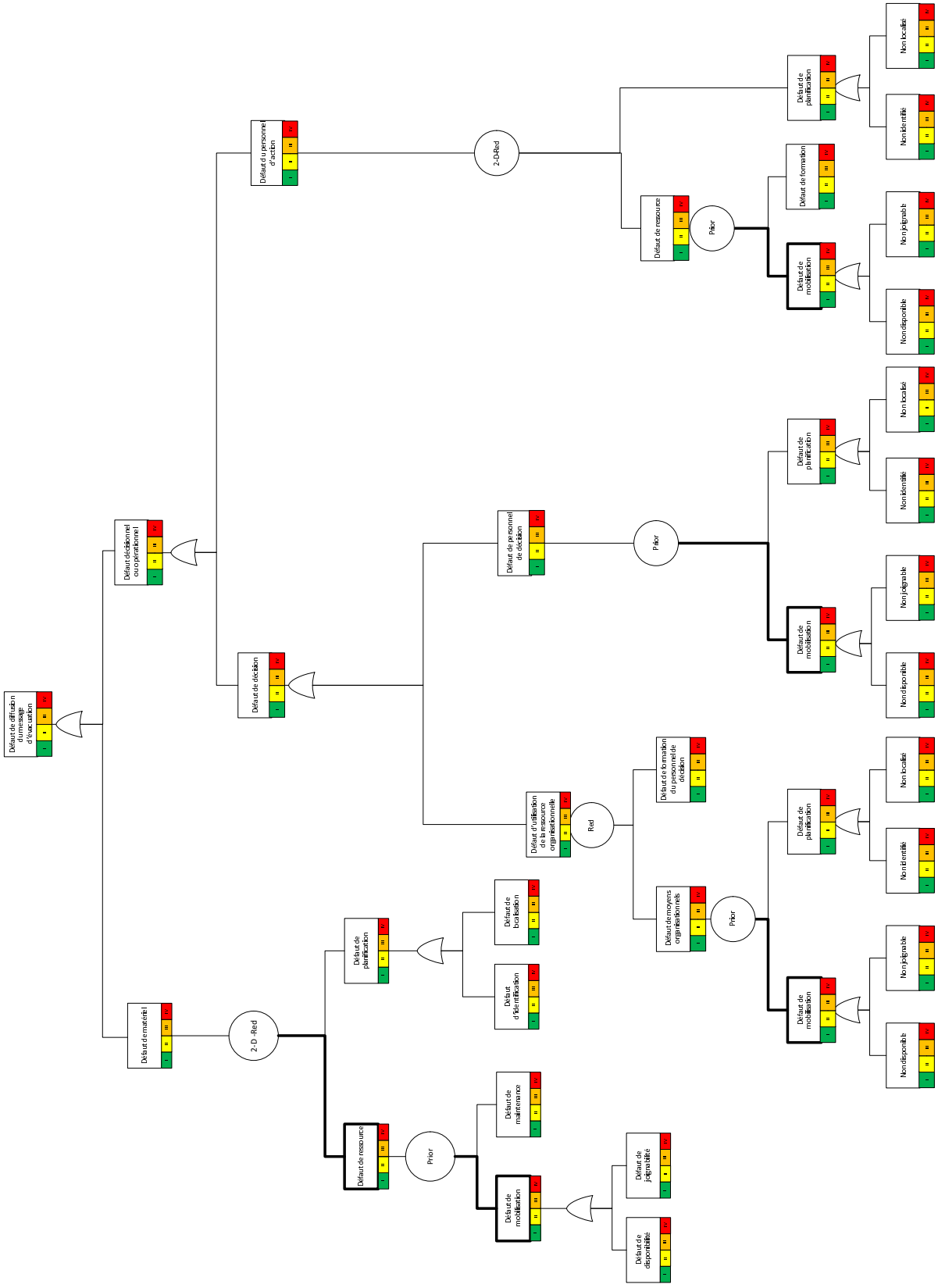


FIGURE 3.18 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de diffusion du message d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

zone d'intervention, sert de déclencheur à d'autres fonctions (comme la mise en place des points de rassemblement et l'alerte de la population), mais n'entraine pas directement de missions terrain (voir diagramme d'activité Figure 3.9)

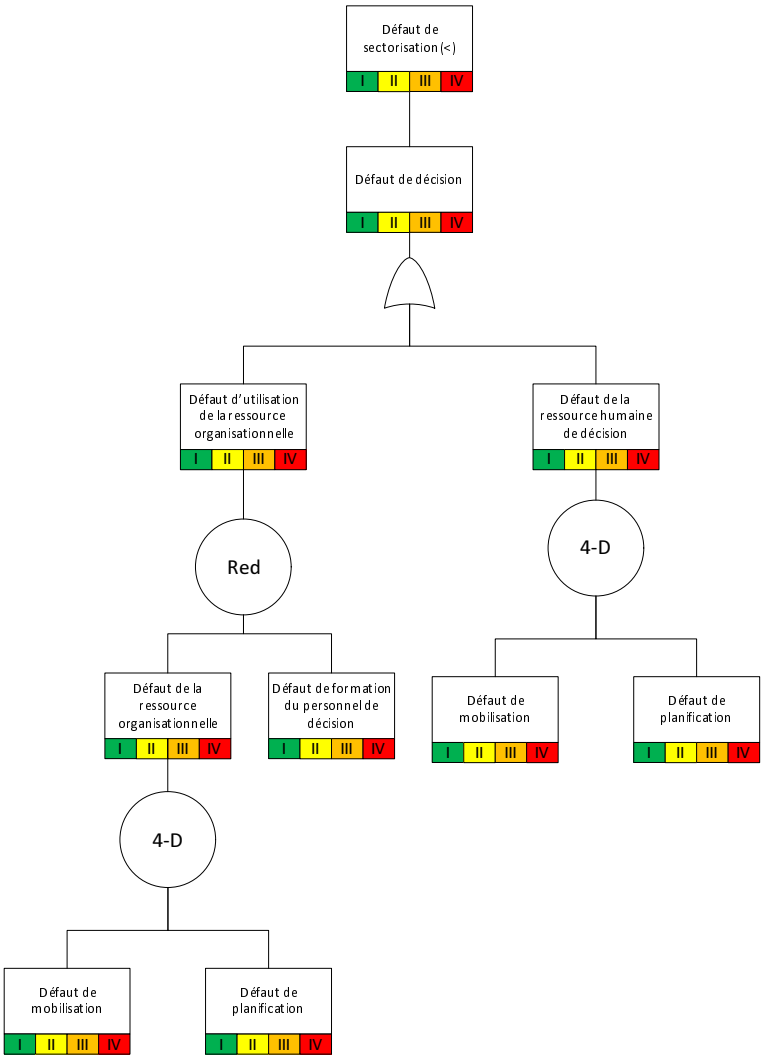


FIGURE 3.19 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de sectorisation de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

Dans cette figure, les branches de Défaut de la ressource technique et du personnel d'action ont été coupées. Seule la branche concernant le Défaut de décision persiste. Cette fonction ne faisant pas appel à une fonction d'action.

3.4.3.2 Arbre de défaillance de l'événement population évacuée inutilement

Pour ce deuxième événement fonctionnel, l'arbre de défaillance retenu et validé par des personnes impliquées dans l'élaboration de PCS est celui donné à la Figure 3.20.

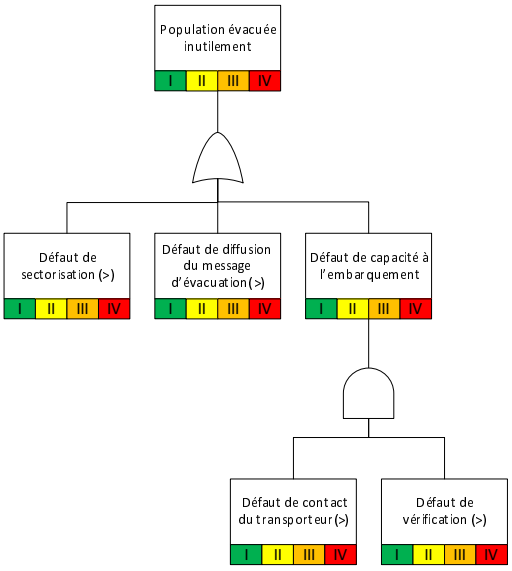


FIGURE 3.20 – Arbre de défaillance pour l'événement population évacuer inutilement

Comme il l'a été spécifié à la section 3.4.2.7, certains ajustements sont nécessaires à la structure de base Figure 3.18 (voir Annexe D) pour le détail de l'arbre de la Figure 3.20. Un exemple est donné pour le défaut de diffusion du message d'évacuation dans le cas d'un objectif au-delà des attentes (Figure 3.21).

Pour cet arbre de défaillance les branches de défaut de mobilisation ont été coupées pour les ressources techniques et humaines (de décision et d'action). La probabilité de se trouver dans un tel événement fonctionnel n'étant possible que si ces ressources sont disponibles et joignables pour la réalisation de la fonction. En revanche, la considération de ce défaut est maintenue pour la ressource organisationnelle, car une absence de ressource peut entrainer une population évacuée inutilement en l'absence de formation du personnel de décision.

Les arbres de défaillance présentés sont génériques dans le modèle proposé. Il est possible de définir une structure type d'arbre. Pour une défaillance en deçà des objectifs de la fonction, la structure présentée par les Figures 3.18 et 3.19 s'applique. En revanche pour une au-delà des objectifs de la fonction, cette structure s'adapte pour donner une structure générique telle que décrite dans la Figure 3.21.

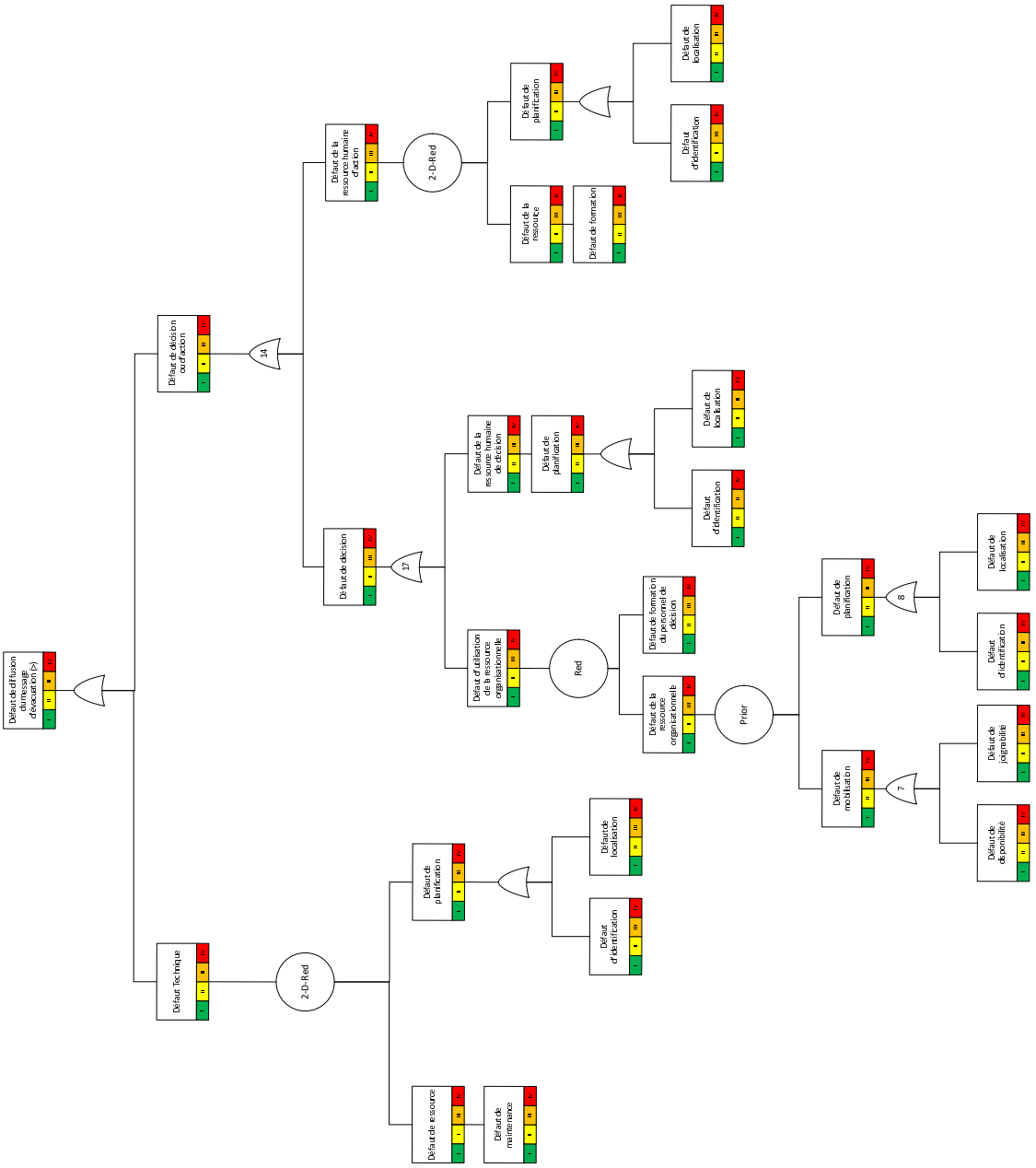


FIGURE 3.21 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de diffusion du message d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

3.5 Etape 2.2 : De la caractérisation des perturbations des ressources, aux indicateurs fonctionnels

Cette section présente les moyens d'obtenir les quantifications des modes de défaillance structurels des ressources au moyen d'un questionnaire. Elle présente également le rendu qu'il peut être fait, une fois les informations collectées, et utilisées dans les arbres de défaillance construits à la section précédente, pour produire des indicateurs de fonctionnement.

3.5.1 De la collecte de la probabilité des niveaux de défaillance structurelle...

La démarche proposée repose sur la caractérisation des défaillances des ressources pour alimenter des indicateurs fonctionnels. L'obtention des informations nécessaires à la caractérisation des défaillances des ressources est réalisée via un questionnaire sur les attributs (niveaux de défaillance) de ces dernières, conduit sous forme d'audit. Ce questionnaire permet de récolter auprès des acteurs de l'organisation de la gestion d'événement, la probabilité pour un mode de défaillance d'une ressource utilisée dans le plan d'urgence, d'être dans un état de dégradation ou un autre.

Comme les modes de défaillance sont caractérisés par 4 états :

Niv. I ($g_{j,1}$) Dégradation : nulle

Niv. II ($g_{j,2}$) Dégradation : partiellement nulle

Niv. III ($g_{j,3}$) Dégradation : partiellement complète

Niv. IV ($g_{j,4}$) Dégradation : complète

Le questionnaire caractérisant la probabilité de se trouver dans les différents niveaux des modes de défaillance est alors bâti sur la trame suivante :

Niv. I Quelle est la probabilité que le mode de défaillance j soit dans son état de défaillance nulle $g_{j,1}$? (donne $p_{j,1}$)

Niv. II Quelle est la probabilité que le mode de défaillance j soit dans son état de défaillance partiellement nulle $g_{j,2}$?(donne $p_{j,2}$)

Niv. III Quelle est la probabilité que le mode de défaillance j soit dans son état de défaillance partiellement complète $g_{j,3}$? (donne $p_{j,3}$)

Niv. IV Quelle est la probabilité que le mode de défaillance j soit dans son état de défaillance complète $g_{j,4}$? (donne $p_{j,4}$)

Avec

$$\sum_{i=1}^{4} p_{j,i} = 1$$

La liste complète des questions peut être donnée dans le Tableau 3.8. Il se base sur la liste des modes de défaillance générique décrite à la section 3.3.2.5. Certaines questions ont

été adaptées en fonction du mode de défaillance. En mettant face à face le Tableau 3.3 avec le Tableau 3.8, il est alors possible d'avoir accès par type de ressource à l'ensemble des questions pour évaluer ses modes de défaillance. Pour chacune des questions, la réponse est donnée en terme de probabilité. Par exemple :
"Le jour du déclenchement du PCS, la probabilité de se trouver dans l'état de dégradation partiellement nulle du mode de défaillance observé est de 0.75, 0.20 dans l'état de dégradation partiel et 0.05 dans l'état de dégradation complet".

Un exemple d'alimentation des résultats est donné au Tableau 3.7.

TABLE 3.7 – Tableau de remplissage des réponses au questionnaire pour l'exemple considéré

	Mode de défaillance $j = 1$			
i	1	2	3	4
Etat $g_{j,i}$	Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Probabilité $p_{j,i}$	0.00	0.75	0.20	0.05

TABLE 3.8 – Liste de questions pour la collecte des probabilités de chacun des 4 niveaux de caractérisation d'un mode de défaillance

Mode de défaillance	**Niveaux de dégradation**	**Question**
Défaut d'identification	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement identifiée ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt partiellement identifiée ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt partiellement non identifiée ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non identifiée ?
Défaut de localisation	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement localisée ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt partiellement localisée ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt partiellement non localisée ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non localisée ?
Défaut de disponibilité	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit disponible ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt disponible ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non disponible ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non disponible ?

Mode de défaillance	**Niveaux de dégradation**	**Question**
Défaut de joignabilité	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement atteignable ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt atteignable ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non atteignable ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non atteignable ?
Défaut de mobilité	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement mobile ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt mobile ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non mobile ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non mobile ?
Défaut d'autonomie	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit autonome pour un événement non planifié ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt autonome pour un événement planifié ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non autonome pour un événement planifié ? (la ressource est seulement autonome pour un événement courant)
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit non autonome ?
Défaut de dimensionnement	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit dimensionnée pour un événement hors scénario ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit dimensionnée pour un événement scénarisé ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit dimensionnée pour un événement courrant ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit non dimensionnée ?
Défaut d'entrainement	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit entrainée pour un événement hors scénario ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit entrainée pour un événement scénarisé ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit entrainée pour un événement courant ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit non entrainée ?

Mode de défaillance	**Niveaux de dégradation**	**Question**
Défaut de maintenance	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit maintenue régulièrement ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt maintenue ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non maintenue ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit complètement non maintenue ?
Défaut d'information	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit diffusée avant la connaissance de la survenue d'un événement ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit diffusée plus de 72 h avant l'événement ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit diffusée moins de 72 h avant l'événement ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource ne soit pas diffusée ?
Défaut de mise à jour	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit mise à jour en tout temps ?
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt mise à jour ?
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt non mise à jour ?
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit non mise à jour ?
Défaut d'utilisation	Niv I	Quelle est la probabilité que la ressource soit utilisable le jour de l'événement (déjà mise en œuvre lors d'événement hors cadre)
	Niv II	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt utilisable le jour de l'événement (déjà utilisée pour des événements scénarisés)
	Niv III	Quelle est la probabilité que la ressource soit plutôt inutilisable le jour de l'événement ? (mise en œuvre dans des situation de gestion courante)
	Niv IV	Quelle est la probabilité que la ressource soit inutilisable le jour de l'événement ? (jamais mis en œuvre)

Finalement, l'arbre de défaillance tel qu'adapté pour une représentation multi-niveaux des modes de défaillance pour l'évaluation des plans de secours est décrit par la Figure 3.22. Cette figure illustre les connexions entre les questions et les valeurs du mode de défaillance. Le questionnaire permet alors de récolter l'information sur la probabilité d'être dans un niveau de défaillance, alimentant ainsi le calcul dans les arbres de défaillance, qui servent à remonter les défaillances structurelles vers des défaillances fonctionnelles, qui servent d'indicateur de fonctionnement de la fonction.

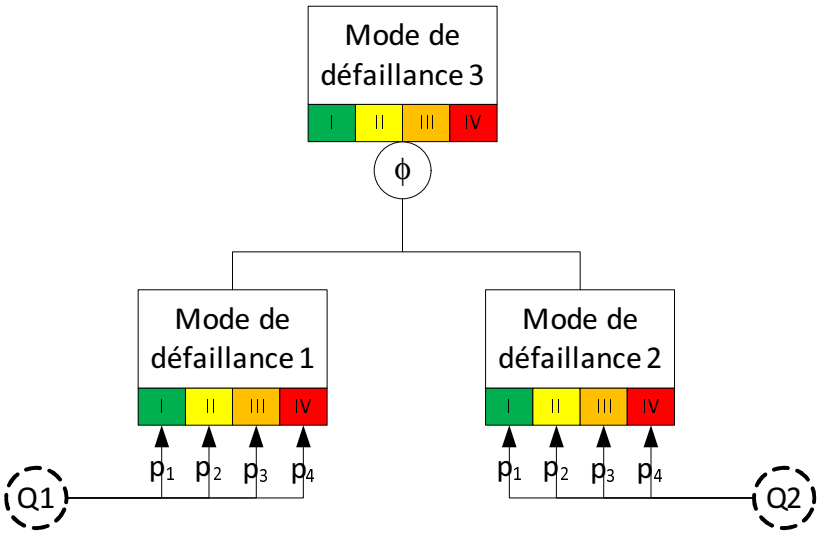


FIGURE 3.22 – Représentation d'un mode de défaillance multi-niveaux tel que la modélisation FIS la prend en compte selon les adaptations de la théorie du MSS

3.5.2 ... Vers la construction d'indicateurs de fonctionnement

Une représentation graphique peut être faite à différents niveaux. Un graphique bidimensionnel peut être donné pour visualiser la probabilité en fonction des 4 états de dégradation d'un mode de défaillance observé (Figure 3.23). Ce graphique permet de visualiser rapidement quel(s) niveau(x) du mode de défaillance observé est(sont) prépondérants(s).

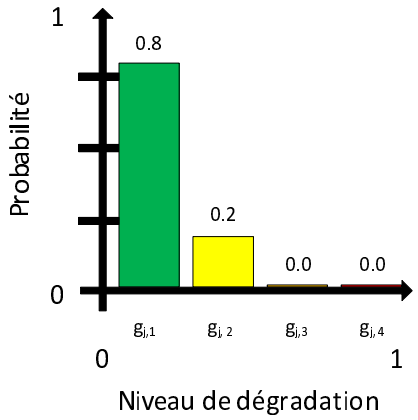


FIGURE 3.23 – Représentation bidimensionnelle de la probabilité de dégradation d'un mode de défaillance

Il est alors possible de consulter par ressource, les différents niveaux de dégradation apportés par les modes de défaillance (Figure 3.24). Une visualisation par ressource de l'ensemble des niveaux de défaillance des modes la constituant, permet de visualiser pour une ressource donnée, quel mode de défaillance est dans son état le plus dégradé. Connaitre les modes de défaillance d'une ressource qui sont les plus dégradés permet, par la suite de pouvoir mettre en place des plans d'actions afin de combler cette dégradation. Cela permet aussi de savoir par avance que la ressource peut présenter un inconvénient du point de vue de certains modes de défaillance, et de les anticiper. Par exemple, lors d'un défaut de dimensionnement d'une

ressource, comme des bus pour une évacuation, les instances décisionnaires peuvent alors décider d'employer des ressources extra-communales (hors plan) si elles sont disponibles.

Un inconvénient de cette représentation est qu'il est difficile de tirer des conclusions sur les éléments à traiter et leur ordre de traitement.

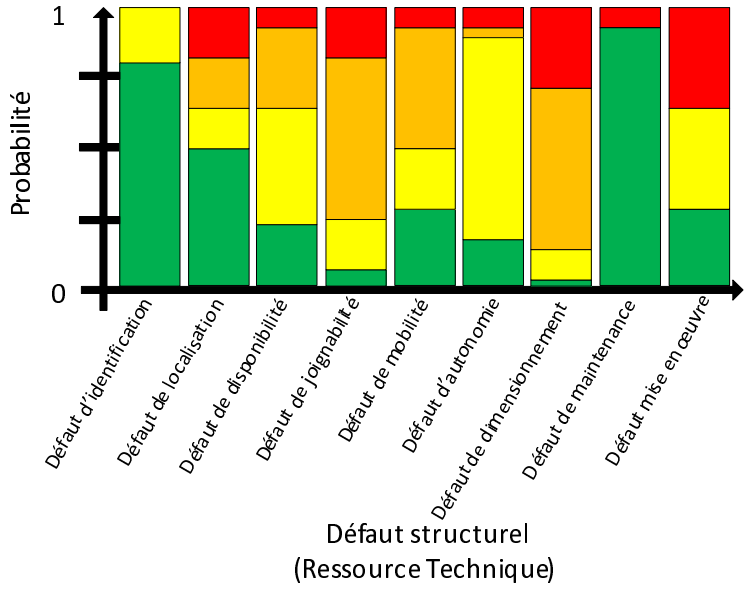


FIGURE 3.24 – Représentation des probabilités des différents niveaux de dégradation des modes de défaillance structurels pour une ressource technique

Les modes de défaillance structurels étant reliés par les nouvelles portes logiques (décrites à la section 3.4.1) aux modes de défaillance fonctionnels, il est alors possible de proposer une vue de la dégradation de la fonction suivant la Figure 3.25. Avoir un graphique qui représente pour chaque fonction étudiée la probabilité de se trouver dans chacun des états de défaillance, permet aux décisionnaires d'identifier rapidement quels indicateurs (ou modes de défaillance fonctionnel) ne permettent pas à la fonction de se réaliser correctement.

Comme le graphique précédent, l'inconvénient de cette représentation est qu'il est difficile de tirer des conclusions sur les éléments à traiter et leur ordre de traitement.

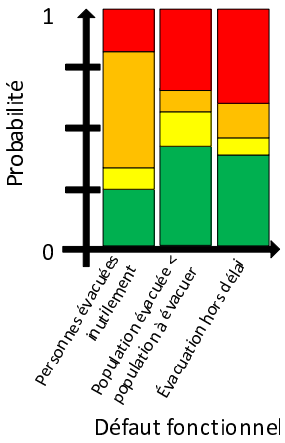


FIGURE 3.25 – Représentation des probabilités des différents niveaux de dégradation des modes de défaillance fonctionnels de la fonction Évacuation

3.6 Etape 3 : Prioriser les points d'amélioration

L'ultime étape de la démarche d'évaluation est de prioriser les événements observés, afin d'aider les instances décisionnaires à établir des programmes d'amélioration de leur organisation. Cette priorisation est donnée en mesurant l'importance d'une défaillance de ressource sur la défaillance d'une fonction, au sens de la modélisation FIS.

Pour cela, il est choisi d'utiliser et d'adapter les principes théoriques présentés à la section 2.3.4. Le critère de réduction de fiabilité [Levitin *et al.*, 2003] a été retenu pour le classement de l'importance des événements, car il permet d'identifier les éléments dont l'amélioration sera la plus efficace pour renforcer la fonction.

Pour rappel, la relation proposée était :

$$MRRW_j = 1 + \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} max\left(0, \frac{P(G \geq d)}{P(G \geq d | g_j = g_{j,i})} - 1\right) \tag{3.1}$$

Avec

$$P(G \geq d | g_j = g_{j,i}) > 0 \text{ pour tout } i$$
$$n_j = 4$$

Cependant, cette considération de l'interprétation des principes binaires fonctionne bien dans le cas où la performance est croissante. C'est-à-dire que l'état 0 est un état de défaillance totale et l'état n (avec $n > 0$) un état de performance totale. Or dans le cadre de ces travaux, les considérations sont inversées. L'état de fonctionnement optimal est 1, plus petit que l'état de dégradation maximale ($n = 4$).

Une nouvelle adaptation du critère $MRRW$ est proposée, pour correspondre aux caractéristiques des considérations de ces travaux.

$$MRRW_j = \frac{P(G \geq d)}{P(G \geq d | g_j = g_{j,1} \cup g_j = g_{j,2})} \tag{3.2}$$

Avec

$$d = 3$$

Dans ces travaux, la valeur de d sera fixée à 3, signifiant que l'état du système sera jugé insatisfaisant dès lors qu'il est dans les niveaux : Plutôt dégradé (Niv. III) ou dégradé (Niv. IV).

Chaque nouvelle porte définie dans la modélisation FIS embarquera ce critère d'importance. Il sera alors possible, grâce à un algorithme de recherche en profondeur d'abord, de classer les défaillances des ressources qui impactent l'état d'une fonction. À tout instant dans un arbre de défaillance donné, cette approche permet de visualiser l'importance des événements d'entrée sur la sortie d'une porte. Un exemple d'exploration pour la première branche de l'arbre de Défaut de diffusion du message d'évacuation (Figure 3.18) est donné à la Figure 3.26.

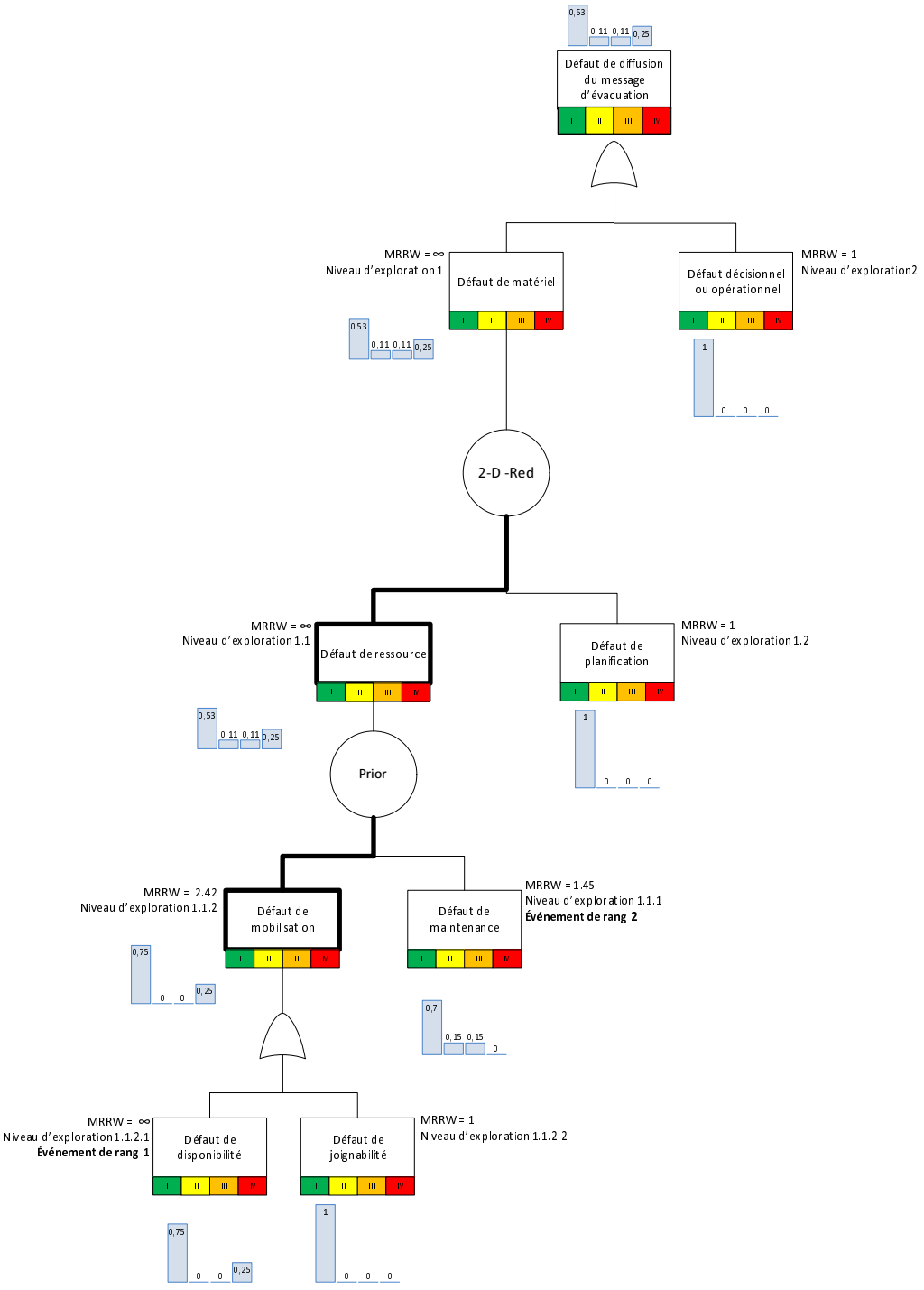


FIGURE 3.26 – Illustration de l'exploration de recherche des facteurs d'importance pour la première branche de l'arbre de défaillance Figure 3.18 page 101

Pour l'événement sommet Défaut de diffusion du message d'évacuation, la répartition des probabilités des niveaux est la suivante : $p_1 = 0.53$, $p_2 = 0.11$, $p_3 = 0.11$ et $p_4 = 0.25$. Cet événement sommet est la combinaison par une porte *max* des événements Défaut décisionnel ou opérationnel et Défaut matériel. La porte de cet événement est donnée dans le Tableau 3.9.

TABLE 3.9 – Porte OU multi-niveaux avec probabilité de l'événement Défaut de diffusion du message d'évacuation

		Défaut décisionnel ou opérationnel			
		Niv. I $\{1, 1.0\}$	Niv. II $\{2, 0.0\}$	Niv. III $\{3, 0.0\}$	Niv. IV $\{4, 0.0\}$
Défaut matériel	Niv. I $\{1, 0.53\}$	$\{1, 0.53\}$	$\{1, 0.0\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$
	Niv. II $\{2, 0.11\}$	$\{2, 0.11\}$	$\{2, 0.0\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$
	Niv. III $\{3, 0.11\}$	$\{3, 0.11\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{3, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$
	Niv. IV $\{4, 0.25\}$	$\{4, 0.25\}$	$\{4, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$	$\{4, 0.0\}$

Pour le Défaut décisionnel ou opérationnel, le calcul du niveau d'importance ($MRRW_1$) est le suivant :

$$MRRW_1 = \frac{P(G \geq 3)}{P(G \geq 3 | g_1 = g_{1,1} \cup g_1 = g_{1,2})} \tag{3.3}$$

Avec

$$P(G \geq 3 | g_1 = g_{1,1} \cup g_1 = g_{1,2}) = \frac{P(G \geq 3) \cap P(g_1 = g_{1,1} \cup g_1 = g_{1,2})}{P(g_1 = g_{1,1} \cup g_1 = g_{1,2})}$$

D'où

$$MRRW_1 = \frac{0.36}{0.11 + 0.25} \times 1 = 1 \tag{3.4}$$

Pour le Défaut matériel, le calcul du niveau d'importance ($MRRW_2$) est le suivant :

$$MRRW_2 = \frac{P(G \geq 3)}{P(G \geq 3 | g_2 = g_{2,1} \cup g_2 = g_{2,2})} \tag{3.5}$$

Avec

$$P(G \geq 3 | g_2 = g_{2,1} \cup g_2 = g_{2,2}) = \frac{P(G \geq 3) \cap P(g_2 = g_{2,1} \cup g_2 = g_{2,2})}{P(g_2 = g_{2,1} \cup g_2 = g_{2,2})}$$

D'où

$$MRRW_2 = \frac{0.36}{0} \times 0.66 \rightarrow \infty \tag{3.6}$$

Étant donné $MRRW_1 < MRRW_2$, le mode de défaillance Défaut matériel doit être exploré en priorité par rapport au Défaut décisionnel ou opérationnel. Les niveaux d'exploration sont donc respectivement 1 et 2.

Le Défaut matériel est constitué des Défaut de ressource et Défaut de planification. De la même façon que précédemment ces événements sont priorisés. Les valeurs d'importance obtenues pour le Défaut de ressource et le Défaut de planification sont respectivement ∞ et 1. Les niveaux d'exploration attribués à ces événements sont 1.1 et 1.2 signifiant, que le Défaut de ressource doit être investigué avant le Défaut de planification.

Le Défaut de ressource est constitué des Défaut de mobilisation et Défaut de maintenance. L'opération de calcul du facteur d'importance est une nouvelle fois répétée. Les valeurs d'importance obtenues sont respectivement de 2.42 et 1.45. Le Défaut de maintenance se voit attribuer le niveau d'exploration 1.1.1, tandis que le Défaut de mobilisation se voit attribuer l'indice 1.1.2. Le Défaut de maintenance étant une défaillance de base, il est alors possible de compléter le Tableau 3.10 en ajoutant cette première donnée en entrée du tableau ($1^{\text{ère}}$ ligne).

Enfin, une ultime exploration est nécessaire pour le Défaut de mobilisation. Constitués du Défaut de disponibilité et du Défaut de joignabilité, les résultats du calcul du facteur d'importance donnent la priorité au Défaut de disponibilité ($MRRW \rightarrow \infty$). Le Défaut de joignabilité a, quant à lui, un facteur d'importance de 1. Les niveaux d'exploration pour ces deux niveaux sont donc respectivement 1.1.2.1 et 1.1.2.2. S'agissant de modes de défaillance de base, ces données sont portées en données d'entrée du Tableau 3.10 ($2^{\text{ème}}$ ligne).

L'objectif de cette descente dans l'arbre étant de trouver les leviers qui permettront d'augmenter le plus efficacement possible la qualité de la fonction étudiée.

Le Tableau 3.10 donne le classement de cette exploration. Dans celui-ci, le Défaut de maintenance a une priorité plus importante (rang 1) que le Défaut de disponibilité (rang 2). Le niveau d'exploration permet de classer les événements en fonction de la profondeur d'exploration de l'arbre. Il s'agit de la position d'un événement de base dans l'arbre de défaillance par rapport à l'événement sommet, en fonction de la priorité des événements intermédiaires.

TABLE 3.10 – Comparaison des facteurs d'importance pour une demande $d \geq 3$

	$MRRW$	Niveau d'exploration	Rang final
Défaut de maintenance	1.45	1.1.1	2
Défaut de disponibilité	∞	1.1.2.1	1

Remarque : les éléments de base ayant un $MRRW = 1$, sont ceux n'impactant pas la dégradation de la défaillance de la fonction, pour un seuil donné.

Conclusion

Dans ce chapitre, les appropriations des concepts décrits au chapitre 2 ont été présentées. Ces concepts ont été intégrés à la méthode de modélisation FIS dans le cadre de l'évaluation des plans d'urgence à base de modèle. Le choix de l'homogénéité du modèle est discuté et les caractéristiques informatiques pour la prise en compte des modes de défaillance multi-niveaux sont présentées.

Dans un deuxième temps, la démarche d'évaluation des plans de secours a été présentée. Cette démarche se découpe en deux temps : 1) la modélisation des interactions fonctions-ressources et 2) la modélisation de la propagation des perturbations pour la construction d'indicateurs.

Une étude de plusieurs PCS a permis de déterminer un modèle générique des plans d'urgence dans son intégralité. La modélisation générique a permis de déterminer une liste de ressources, fonctions, modes de défaillances structurels et fonctionnels, un séquencement des fonctions dans le temps, caractérisant des déclencheurs pour activer ou désactiver les fonctions, suivant le type d'événement.

Grâce à la structure générique du modèle, des relations entre modes de défaillance structurels et modes de défaillance fonctionnels ont pu être établies. La caractérisation de ces relations de défaillance est supportée par le formalisme des arbres de défaillance, adapté pour caractériser les événements sur plus de deux états discrets, à la différence de ce qui est proposé usuellement. Une caractérisation à plus de deux états discrets permet une meilleure représentation de la dégradation apportée par les modes de défaillance. Cette nouvelle considération a nécessité le développement de portes spécifiques pour les arbres de défaillance.

La démarche proposée rend alors possible, en observant des états de ressources, d'accéder à un niveau de fonctionnement de la fonction. Ceci est réalisé en évaluant des couples de {niveau, probabilité} des défaillances structurelles au travers d'un questionnaire sur l'ensemble des ressources d'une fonction. Grâce aux arbres de défaillance construits sur la base du modèle établi, il est possible de propager les perturbations des ressources observées via le questionnaire, vers des indicateurs fonctionnels.

Enfin une série d'indicateurs a pu être proposée suivant les différentes vues du système. Il est alors possible d'avoir une vue de la dégradation des fonctions assurées par le plan, des ressources et des modes de défaillance. Ces différentes vues permettent aux instances décisionnaires d'avoir une représentation graphique de la capacité des fonctions décrites dans le plan à se réaliser. Cela permet par la suite de connaitre les vulnérabilités du plan

au moment de son exécution et/ou de les anticiper en phase pré-urgence, en déployant des plans d'amélioration.

Chapitre 4

Application à une collectivité locale de la démarche d'évaluation *a priori*

Sommaire

Introduction

Pour valider la démarche présentée au chapitre 3, le protocole suivant a été adopté pour le cas d'étude d'une commune du Languedoc-Roussillon :

1. Validation de la modélisation
2. Collecte d'informations sur l'état des ressources des fonctions validées
3. Présentation et interprétation des résultats

Avant de détailler chacune de ces parties dans les sections suivantes, la section 4.1 de ce chapitre décrira les caractéristiques territoriales de la commune étudiée, retenue pour cette étude. La section 4.2 traitera de la validation de la représentation modélisée d'une mission particulière : la mission d'évacuation. La section 4.3 présentera les données collectées pour ce cas d'étude. Quant à la section 4.4, elle présentera les résultats issus de cette collecte de données.

4.1 Description du territoire communal

4.1.1 Caractéristiques géographiques

La commune étudiée est située en Région Languedoc-Roussillon (Figure 4.1). Elle est peuplée de plus de 40 000 habitants avec une densité de population de plus de 1 700 habitants/km^2 sur une superficie de 23,2 km^2 [INSEE, 2009a]. La commune étudiée se situe sur un terrain majoritairement marneux et calcaire [BRGM, 2014], elle est traversée par un premier cours d'eau dont le bassin versant à une superficie de 315 km^2 [DREAL Rhône-Alpes et DREAL du bassin Rhône Méditerranée, 2014] et un second dont le bassin versant (inclus dans le premier) a une superficie de 34,5 km^2.

FIGURE 4.1 – Position géographique en France de la Région Languedoc-Roussillon (fond de carte IGN)

4.1.2 Risques Naturels

La commune est située dans un périmètre d'un PPRn appliqué. Il a été approuvé en 2010 pour l'aléa : inondation. La commune étudiée est située dans une zone de sismicité Faible (0,7 m/s^2 $\leq$ accélération $<$ 1,1 m/s^2) [Prefeture du Gard, 2011].

La liste des risques présents sur la commune est la suivante :

- Séisme Zone de sismicité : 2
- Mouvement de terrain
- Inondation - Par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau
- Feu de forêt
- Inondation

La Figure 4.2 montre le nombre d'arrêtés préfectoraux par type d'événement naturel survenu sur le territoire de la commune étudiée de 1982 à 2012. Elle a subi depuis 30 ans 9 inondations menant à des prises d'arrêtés de catastrophe naturelle, sur 10 événements.

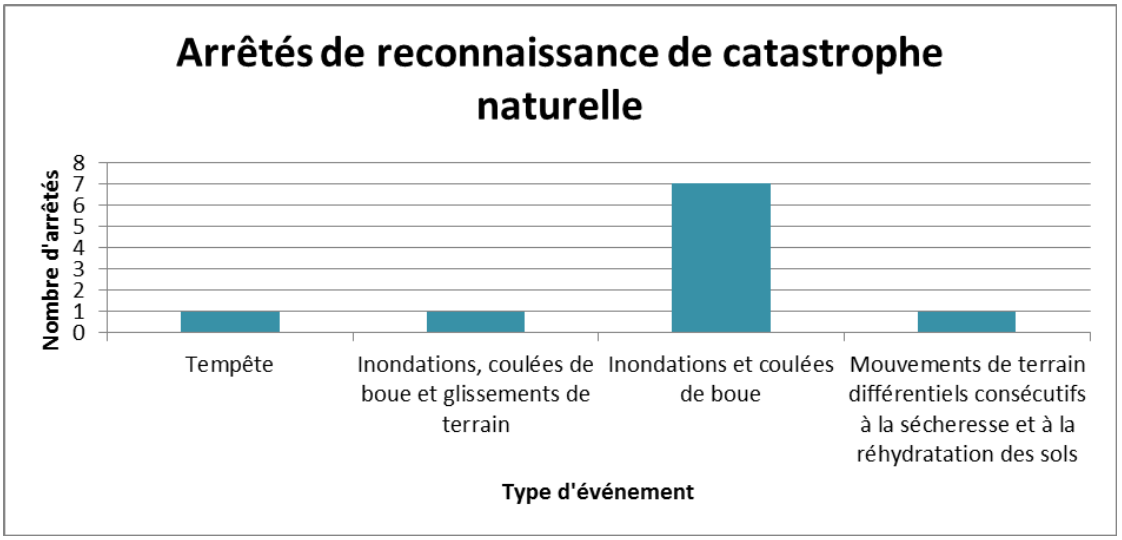


FIGURE 4.2 – Graphique du nombre d'arrêtés préfectoraux de catastrophes naturelles pour la commune étudiée [Prim.net, 2011]

Parmi ces 9 inondations, l'évévement naturel le plus préjudiciable pour la commune est décrit dans le paragraphe suivant.

Le 8 et 9 septembre 2002, le Sud-Est de la France connait des événements pluvieux considérables. Le Gard principalement, mais aussi Vaucluse, Ardèche, Hérault, Drôme, Bouches-du-Rhône et Lozère sont impactés. L'événement a sinistré 419 communes et 24 morts sont à déplorer [MEEDDM, 2008]. Les secteurs du haut bassin du Vidourle, la Gardonnenque et le bassin Alésien sont les plus touchés. Les quantités de pluies recueillies sont exceptionnelles, 514 mm sont mesurés sur la commune étudiée pendant la durée de l'épisode [Météo-France, 2002] (elles sont en moyennes de 100 mm pour le mois de septembre à Nîmes, préfecture du Gard [Météo-France, 2014]). Les coûts estimés pour cet événement sont de 400 millions de dollars américains [Senat.fr, 2002] (en 2002 l'euro est à parité avec le dollar américain [INSEE, 2014]). Un quartier de la commune étudiée est fortement touché par les intempéries. Il est aujourd'hui classé comme zone inondable par un aléa fort voir modéré à certains endroits dans le Plan de Prévention du Risque inondation (voir Figure 4.3).

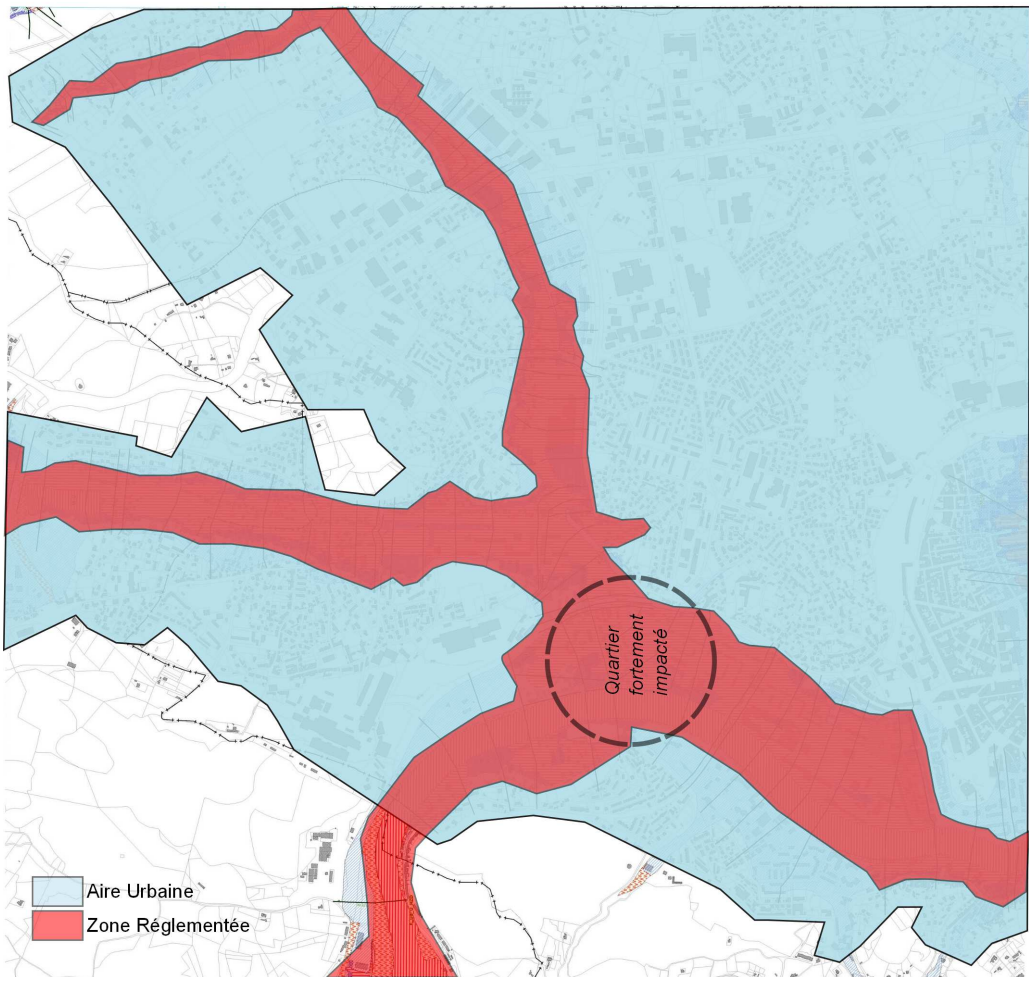


FIGURE 4.3 – Carte simplifiée du PPRi de la commune étudiée

4.1.3 Risques Technologiques

La commune étudiée n'est pas située dans le périmètre d'un PPRt [Prefeture du Gard, 2011]. En revanche, elle se situe dans le périmètre d'un PPI d'un barrage.

Sur la base ARIA du BARPI, 10 accidents industriels sont dénombrés sur la commune étudiée. La Figure 4.4 montre la répartition du nombre d'accidents en fonction de leurs conséquences (en matière de rejet, humaines, environnementales et financières).

Le détail de l'événement technologique le plus préjudiciable pour la commune étudiée est décrit dans le paragraphe suivant. Il est extrait de la base de donnée ARIA du BARPI [BARPI, 2014].

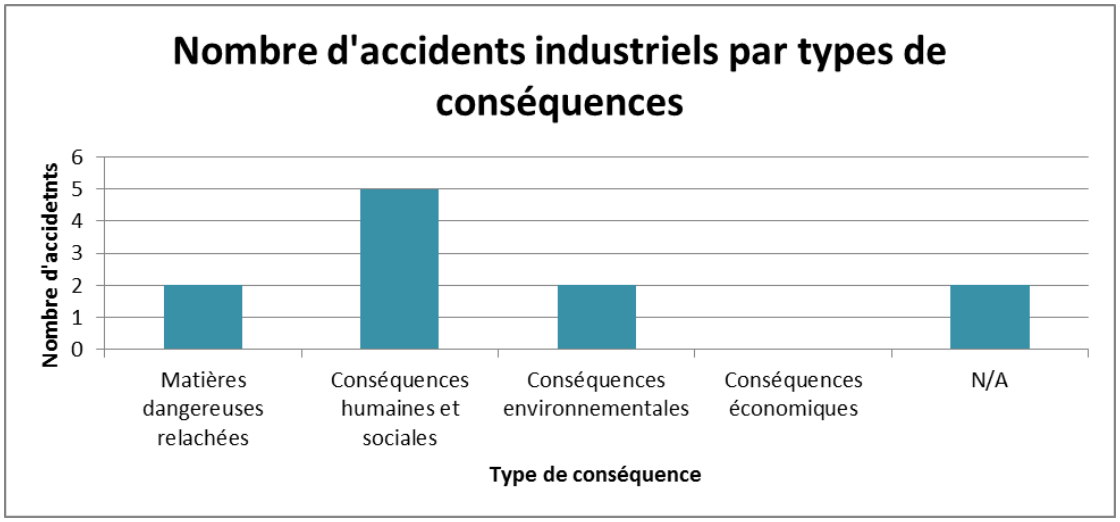


FIGURE 4.4 – Graphique du nombre d'événements industriels par type de conséquences [BARPI, 2014]

Dans un établissement de transit, de tri et de compostage de déchets, plusieurs départs de feu se produisent la nuit dans un entrepôt de 1 800 m² appartenant à une autre société et abritant 40 t de fongicides solides et liquides, à base de souffre ou de sulfate de cuivre, et 700 t d'engrais NPK. Le gardien de nuit présent éteint les foyers. Un autre incendie qui se déclare 4 h plus tard, se propage à 1 500 m² de l'entrepôt et nécessite l'intervention des pompiers. D'importants moyens sont mobilisés durant 10 h avant de maîtriser le sinistre. Deux écoles sont évacuées (200 enfants), 2 enfants et 2 adultes sont hospitalisées quelques heures. Une pollution probable des eaux n'a pas eu d'impact visible sur la faune aquatique. Des analyses sont effectuées pour évaluer le degré de pollution des sols et des eaux souterraines. L'exploitant porte plainte pour acte de malveillance.

Outre les conséquences économiques, cet événement est caractérisé comme ayant un fort impact humain, à cause de l'évacuation de deux écoles.

4.1.4 Détails des caractéristiques de l'organisation de gestion d'événement du PCS

La commune étudiée dispose d'un Plan Communal de Sauvegarde réalisé et acté (dernière version en date de juin 2013). Il est rendu obligatoire en 2010 à cause de l'approbation d'un PPRn approuvé pour l'aléa inondation (voir section 4.1.2). Le PCS de la commune est disponible en Mairie au format papier et sur CD-ROM. Il est en permanence à disposition de l'agent en charge de sa mise en oeuvre en cas de déclenchement. Cet agent est par ailleurs sollicitable 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 par le moyen d'un téléphone d'astreinte.

Le PCS recense les enjeux et les vulnérabilités sur le territoire de la commune étudiée. Il décrit également les activités de gestion d'urgence des différents acteurs de l'organisation :

- DOS
- Cellule Coordination

- Cellule Sécurité
- Cellule Hébergement d'urgence
- Cellule Accueil
- Cellule Sociale et Relogement
- Cellule Logistique et Moyens Généraux
- Cellule Technique

Pour chacun de ces acteurs identifiés, le PCS met à disposition des ressources organisationnelles et décrit les moyens techniques qui peuvent être employés.

Deux particularités sont à noter dans ce cas d'étude. L'organisation de gestion d'événement décrite par le PCS de la commune utilise des lieux publics comme points de rassemblement lors de l'évacuation. Ces lieux publics font également office de centres d'hébergement d'urgence. Dans ce cas, points de rassemblement et centres d'hébergement d'urgence sont confondus. La seconde particularité est qu'il n'existe pas de cellule responsable de l'évacuation. Les missions de l'évacuation étant assurées par la coordination des autres cellules. La cellule coordination est donc le chef d'orchestre de l'évacuation.

4.1.5 Conclusion

Le territoire de la commune étudiée est soumis à de nombreux aléas. Ces derniers majoritairement naturels et de type inondation, font de la mairie de cette commune un acteur fort dans l'implication de la démarche d'élaboration du PCS. Les prochaines sections présentent la démarche de validation de l'approche d'évaluation des plans d'urgence proposée dans ces travaux de recherche. D'abord la validation du modèle permettant d'appréhender la complexité de l'organisation est décrite, puis la collecte d'informations et la présentation des résultats sont abordées.

4.2 Validation de la modélisation

4.2.1 Modèle présenté

Afin de valider la démarche d'évaluation du Plan Communal de Sauvegarde, la première étape a été de valider le modèle générique proposé. La validation du modèle a été réalisée dans le détail, sur une partie de l'organisation décrite par le PCS, à savoir la mission d'évacuation. Cette fonction ayant été décrite comme importante (chapitre 2) dans le processus de gestion d'événements.

Le diagramme d'activité du système d'évacuation a été présenté aux agents en charge de la mise en place du PCS de la commune étudiée. Le diagramme présenté est celui décrit dans la Figure 3.9 page 86 du chapitre 3. Face à chacune des fonctions décrites par celui-ci, une liste de ressources a été proposée, pour visualiser les informations du modèle d'interactions fonctions-ressources décrit par la modélisation FIS. Cela a permis de valider les deux aspects de la modélisation, d'une part le séquencement des fonctions et d'autre part le modèle d'interaction fonctions-ressources. Le choix de présenter le résultat du modèle générique sous cette forme a été fait, suite aux retours d'une autre collectivité locale, qui a soulevé le fait que la représentation sous forme de logigramme est plus parlante pour les acteurs de terrain que la représentation SimFIS de la modélisation FIS.

La liste des ressources mise face au diagramme d'activité présenté aux agents de la commune étudiée est donnée au Tableau 4.1. Cette liste d'interactions fonctions-ressources ainsi que le diagramme d'activité ont fait l'objet d'une validation par les agents de la commune. Ces derniers ont approuvé le séquencement des missions et apprécié le niveau de détail des fonctions et des ressources, qui semble être suffisant pour avoir une bonne image de la représentation de la fonction, sans la complexifier.

TABLE 4.1 – Liste des ressources par fonction pour la fonction d'évacuation dans le cas de la commune étudiée

Ressource		**Fonction**
Type	Nom	Nom
Entrée	Ordre d'évacuation	
	Cartes, scénarios	Sectoriser les zones à évacuer
	Cellule Coordination et DOS (PCC)	(Décision)
Sortie	Info zone à évacuer	
Entrée	Info zone à évacuer	
	Cartes, scénarios	Définir les points de
	Cellule Coordination et DOS (PCC)	rassemblement (Décision)
Sortie	Localisation des PR et Ordre de mise en place	
Entrée	Ordre de mise en place	
	Panneaux, marquage...	Mettre en place les points de
	Cellule Accueil (PCC)	rassemblement (Action)
Sortie	Info PR en place et PR en place	

Ressource		**Fonction**
Type	Nom	Nom
Entrée Sortie	Info zone à évacuer et PR en place Cellule Coordination et DOS (PCC) Cartes des itinéraires et Ordre de balisage	Identifier des itinéraires d'évacuation (Décision)
Entrée Sortie	Ordre de balisage Itinéraire, panneaux, marquage... Cellule Technique et Sécurité Info PR en place et PR en place	Assurer le balisage de l'itinéraire (Action)
Entrée Sortie	Localisation des PR et Cartes des itinéraires Liste des transporteurs, scénarios Cellule Coordination et Logistique (PCC) Ordre de contacter le transporteur	Identifier les moyens de transport (Décision)
Entrée Sortie	Ordre de contacter le transporteur Moyens de communications Cellule Logistique Information de mobilisation (avec PR + itinéraire) et Info contact effectué	Contacter transporteur (Action)
Entrée Sortie	Info zone à évacuer et Info PR en place et Info balisage en place et Info contacte transporteur Procédure de diffusion des messages d'évacuation DOS (PCC) Ordre de diffusion du message d'évacuation	Ordonner la diffusion du message d'évacuation (Décision)
Entrée Sortie	Ordre de diffusion du message d'évacuation Sirène et automate d'appel Cellule Coordination et DOS Info diffusion et message diffusé	Assurer la diffusion du message d'évacuation (Action)
Entrée Sortie	Info message diffusé Procédure de déclenchement du recensement Cellule Coordination et DOS (PCC) Ordre de recensement	Ordonner le recensement (Décision)
Entrée Sortie	Ordre de recensement Feuille de comptage Cellule Accueil et Hébergement Info population au PR	Recenser les personnes au PR (Action)
Entrée Sortie	Info recensement Cellule Coordination et DOS (PCC) Ordre d'évacuation	Ordonner l'évacuation (Décision)

4.2.2 Adaptations

La structure du modèle générique présentée a été adaptée pour l'objet de l'étude :

1. Dans le diagramme d'activité utilisé (voir Figure 4.5), la fonction de mise en place des véhicules de transport aux points de rassemblement est considérée comme une boîte grise, car cette fonction relève de la compétence du transporteur, un acteur externe de l'organisation de gestion d'événement de sécurité civile pour la commune étudiée. De même pour la diffusion du message d'alerte par voie médiatique, les médias étant des acteurs externes à la commune. Seules les informations envoyées pourront être vérifiées dans la démarche et le retour des acteurs (suite à ces informations). Il ne sera donc pas possible de vérifier les moyens utilisés par le transporteur ou les médias, pour prévenir d'éventuels défauts.
2. Une adaptation a été faite par rapport au modèle générique proposé au chapitre 3. La commune étudiée n'utilise pas la diffusion par porte-à-porte, mais un automate d'appel. La branche liée à la diffusion porte-à-porte a donc été rendue inactive dans le diagramme d'activité final.
3. Une des caractéristiques qui a été également relevée est que la commune étudiée ne dispose pas, en situation de gestion d'urgence, d'une cellule a part entière qui s'occupe de l'évacuation. Cette mission est gérée par un ensemble de cellules, qui interviennent à différents instants dans l'organisation. Cette considération n'altère pas le principe de la démarche d'évaluation, mais nécessite d'être remarquée pour être prise en considération. De ce fait, les ressources humaines génériques, sont renseignées en affiliant les cellules correspondantes.
4. Dans le cas de la commune étudiée, il n'existe pas de ressources organisationnelles pour la planification des itinéraires d'évacuation, cet aspect étant géré par l'autorité préfectorale. De même, il n'existe pas de ressources organisationnelles pour lancer le signal d'évacuation, car les points d'hébergement se trouvent être les centres d'hébergement d'urgence. En revanche cette fonction est tout de même considérée dans les missions de l'évacuation, dans le cas où ces points d'hébergement seraient soumis à l'aléa en cours.

Ces adaptations n'ont pas eu comme objectifs de créer de nouvelles fonctions ou ressources. Elles ont visé à faire correspondre les ressources de la commune aux ressources du modèle générique (comme par exemple leur nom) et à choisir des chemins dans l'organisation décrite par le diagramme d'activité (exemple évitement de la branche porte-à-porte). Ce qui signifie pour ce dernier exemple que ces fonctions ne sont pas (dans le cas présent) utilisées par la commune. Finalement le cas de la commune étudiée représente bien une instance du modèle générique. Ce qui implique que du point de vue de ce cas d'étude, le modèle générique est validé.

Cette structure validée, l'étape suivante est la collecte des informations pour la caractérisation des ressources afin d'obtenir des indicateurs de fonctionnement des fonctions du PCS.

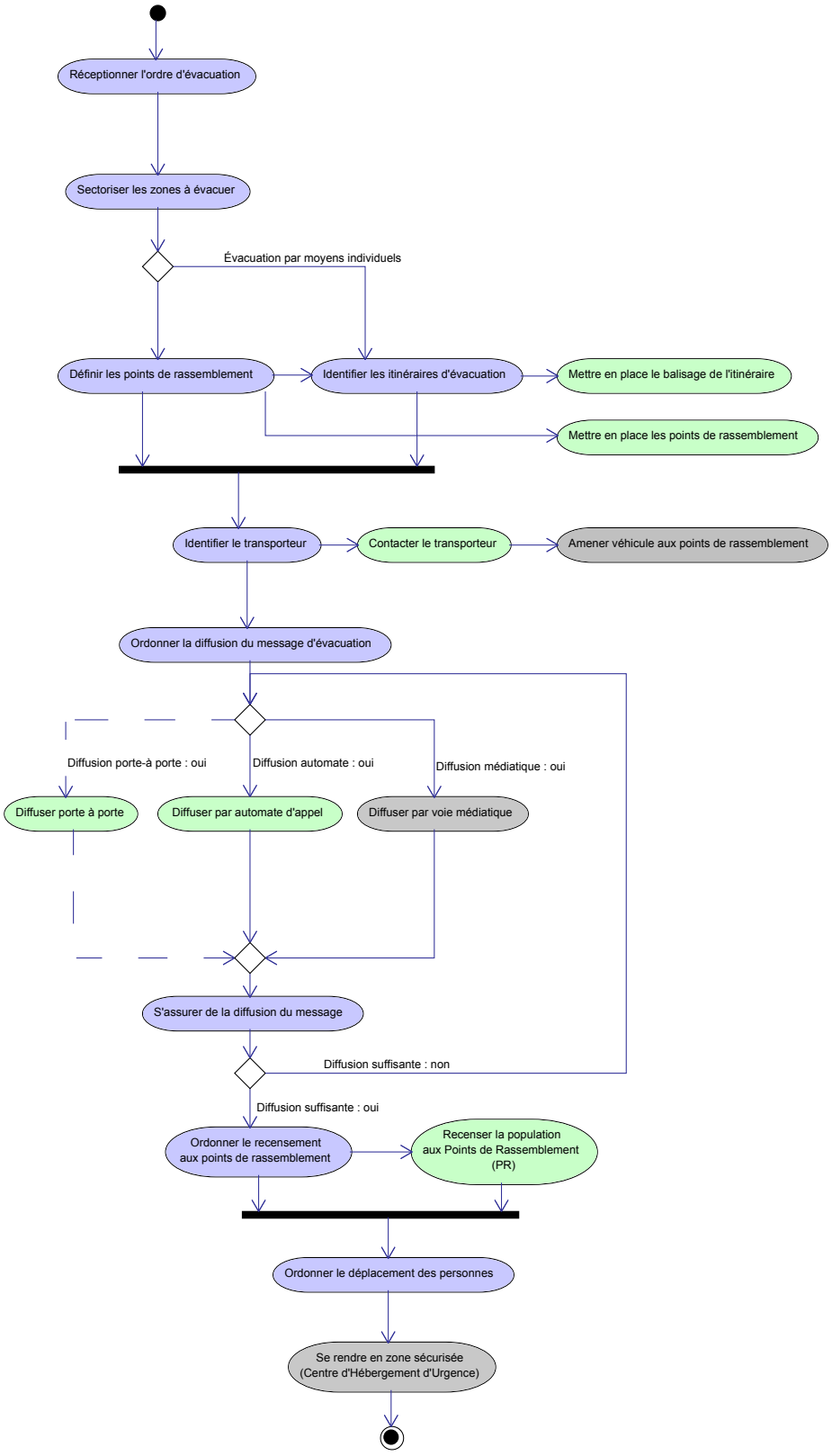


FIGURE 4.5 – Diagramme d'activité UML du système évacuation pour la commune étudiée

4.3 Collecte des informations sur les ressources de la fonction d'évacuation

Sur la base du questionnaire, dont la trame a été présentée à la section 3.5.1 du chapitre 3, les défaillances des ressources ont été caractérisées selon les informations données par les acteurs de la conception du PCS de la commune. Deux scénarios ont été considérés, 1) inondation et 2) feu de fôret. Les résultats présentés tiennent compte de ces deux événements, le PCS devant pouvoir s'appliquer à tout type de situation.

Pour chacune des fonctions, les ressources techniques, humaines et organisationnelles ont été évaluées. Les ressources de support pour des fonctions de décisions sont apparentées à des ressources humaines et organisationnelles. Dans le cas de fonctions d'actions, celles-ci sont apparentées à des ressources humaines et techniques.

Les résultats obtenus lors de la collecte d'informations sur ces ressources sont donnés dans le tableau 4.2.

TABLE 4.2 – Liste des réponses aux questions d'évaluation de la défaillance des ressources pour la fonction d'évacuation pour le cas de la commune étudiée

Ressource	**Question**	**Niveaux de défaillance**			
		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Sectoriser les zones à évacuer (Décision)					
Cartes, scénarios, procédures	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Cellule Coordination et DOS (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,3	0,1	0
	Le personnel est-il joignable ?	0,8	0,2		
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,3		
Définir les points de rassemblement (Décision)					
Cartes, scénarios, procédures	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Cellule Coordination et DOS (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,15	0,15	

Ressource	Question	Niveaux de défaillance			
		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Mettre en place les points de rassemblement (Action)					
Panneaux, marquage	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?			0,25	0,75
	La ressource est-elle joignable ?			0,25	0,75
	La ressource est-elle maintenue ?				1
Cellule Accueil (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?				1
	Le personnel est-il formé ?	0,8	0,2		
Identifier des itinéraires d'évacuation (Décision)					
Cellule Coordination et DOS (PCC))	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,3	0,1	
	Le personnel est-il joignable ?	0,8	0,2		
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,15	0,15	
Assurer le balisage de l'itinéraire (Action)					
Itinéraire, panneaux, marquage	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle disponible ?	0,6	0,2	0,2	
	La ressource est-elle joignable ?	0,6	0,2	0,2	
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Cellule Technique et Sécurité	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			
Identifier les moyens de transport (Décision)					
Liste des transporteurs	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Cellule Coordination et Logistique (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,2	0,2	
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Ressource	Question	Niveaux de défaillance			
		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Contacter transporteur (Décision)					
Moyens de communication	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Cellule Logistique	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			
Ordonner la diffusion du message d'évacuation (Décision)					
Procédure de diffusion du message	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
DOS (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			
Assurer la diffusion du message d'évacuation (Action)					
Moyens de diffusion (Sirène, Automate)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?	0,75			0,25
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	0,75	0,15	0,15	
Cellule Coordination et DOS	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			
Ordonner le recensement (Décision)					
Procédure de déclenchement du recensement	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			

Ressource	Question	Niveaux de défaillance			
		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Cellule Coordination et DOS (PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			
Recenser les personnes au PR (Action)					
Moyens de comptage	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Cellule Accueil et Hébergement	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,725	0,15	0,125	
Ordonner l'évacuation (Décision)					
Cellule Coordination et DOS (PCC))	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Ces résultats bruts issus du questionnaire d'évaluation viennent alimenter les différents arbres de défaillance présentés au chapitre 3 et disponibles en Annexe E. Ces derniers ont été adaptés suivants les caractéristiques d'utilisation de fonctions et ressources de la commune étudiée, lors de la phase de validation du modèle générique par les acteurs de conception du PCS.

Les résultats traités et interprétés sont présentés à la section 4.4.

4.3.1 Conclusions

Le modèle générique des plans locaux de gestion d'urgence a été présenté aux acteurs de la conception du PCS de la commune étudiée. La représentation sous forme de diagramme d'activité a été présentée, complétée des renseignements sur les interactions entre fonctions et ressources. Après avoir validé l'enchainement des fonctions pour la mission d'évacuation, les acteurs se sont appropriés le modèle générique pour faire correspondre les ressources utilisées par la commune étudiée. Cette phase a permis de mettre en évidence le bon niveau

de détail du modèle générique et des mécanismes qu'il embarque (activation ou inactivation de fonctions et/ou ressources). Une fois cette adaptation réalisée, les questions appropriées aux ressources et relatives à la caractérisation des niveaux de défaillance des défauts qu'elles peuvent présenter, ont permis de collecter les informations relatives aux probabilités de se trouver dans chaque état de défaillance pour un défaut de ressource donné.

Les utilisateurs du questionnaire se sont, au fur et à mesure de la démarche, posés des questions quant aux améliorations possibles, avant même de visualiser les résultats. Au-delà même de la présentation de résultats, disposer d'un outil comme celui-ci permet d'éveiller l'intérêts des protagonistes au moment du remplissage du questionnaire et de dégager dès cet instant des pistes de réflexions et d'amélioration.

Ces derniers ont suggéré une amélioration possible de la démarche. En effet durant celle-ci, la définition des défauts identifiés dans le questionnaire a parfois nécessité un rappel. Ils proposent donc d'avoir accès directement à un dictionnaire des défaillances, celui-là même présenté au Tableau 3.3 de la section 3.3.2.5 page 87.

4.4 Représentations des résultats et interprétations

Grâce aux informations collectées avec le questionnaire décrit dans la section précédente (section 4.3), il est possible de quantifier des indicateurs de fonctionnement d'une fonction, à partir :

1. Des événements perturbateurs identifiés pour celle-ci
2. De la structure en arbre de défaillance (qui relie ces événements perturbateurs aux événements de base et donc aux informations collectées par le biais du questionnaire)

Il est alors possible de renvoyer une information sous forme de tableau de bord, pour aider les instances décisionnaires à planifier l'amélioration de leur organisation en cas de survenue d'événement de sécurité civile.

Pour ce cas d'étude, les résultats obtenus pour la commune étudiée sont donnés dans les paragraphes suivants. Il seront organisés de la façon suivante : premièrement le tableau de bord du système "évacuation" sera présenté. Puis respectivement les fonctions à investiguer seront hiérarchisées, puis ce sera le cas des ressources. Ce qui amènera finalement pour une fonction et son ensemble de sous-fonctions, à identifier d'une part son statut de fonctionnement, et d'autre part à lister les ressources et leurs états qui imposent ce statut. Les informations seront ensuite utilisées par le gestionnaire du PCS afin de prévoir des plans d'action et de construire une meilleure organisation de gestion d'événement de sécurité civile.

4.4.1 Etats du système d'évacuation

Les deux événements perturbateurs retenus de ce système ont déjà été présentés dans le chapitre 3 page 88. Il s'agit de :

- Population évacuée < population à évacuer
- Population évacuée inutilement

Pour ce système, et avec les informations collectées du questionnaire, l'état du tableau de bord est donné à la Figure 4.6.

Cette figure donne selon les quatre niveaux de dégradation déterminés (pas dégradé, plutôt pas dégradé, plutôt dégradé et dégradé) une représentation de l'état de la mission d'évacuation à garantir.

Il est alors possible de hiérarchiser le traitement des événements selon leur importance et d'investiguer ainsi les causes d'une telle représentation de l'état de ce système. L'ordre de priorité est donc :

1. Population évacuée < population à évacuer
2. Population évacuée inutilement

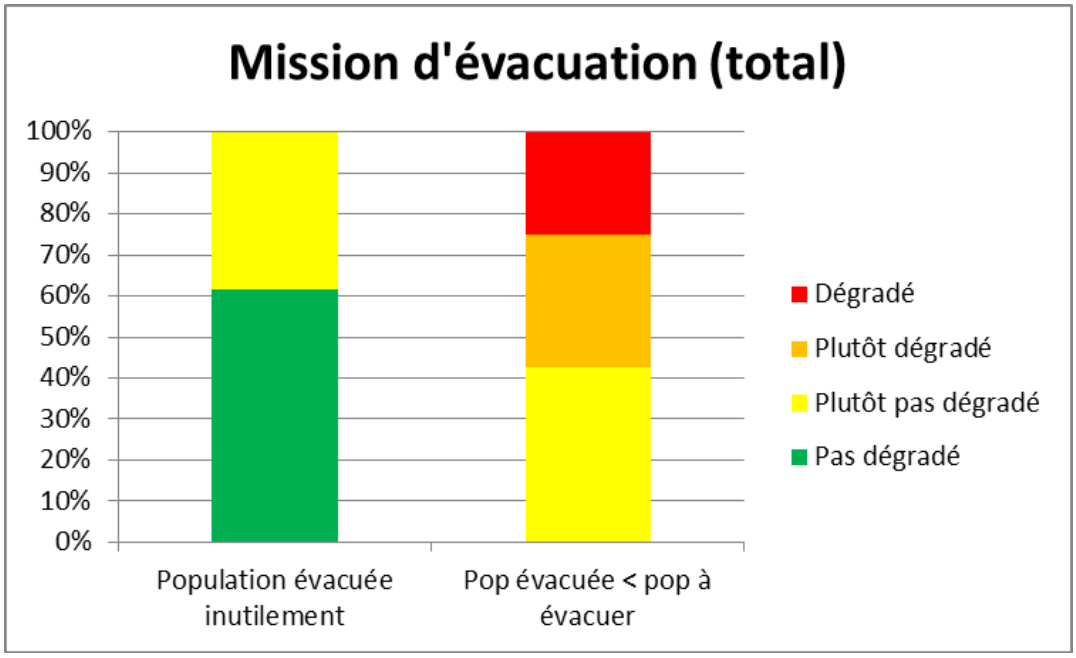


FIGURE 4.6 – Tableau de bord du système évacuation à partir des résultats du questionnaire

Un exemple d'investigation est donné pour le cas de l'événement Population évacuée < population à évacuer. Les autres investigations de causes des états des événements de perturbation du système sont donnés dans le rapport fourni à la commune étudiée.

4.4.2 Etats de l'événement population évacuée < population à évacuer

En se reposant sur la structure d'arbre de défaillance présentée dans le chapitre 3 page 100, les causes de cet événement sont données par la défaillance des fonctions :

- Défaut de sectorisation
- Défaut de matérialisation des PR
- Défaut de balisage de l'itinéraire
- Défaut de contact du transporteur
- Diffusion du message d'évacuation
- Défaut de vérification aux PR

Le graphique de la Figure 4.7 présente le tableau de bord pour cet événement et illustre l'état de chacune de ces fonctions.

En procédant à la hiérarchisation des fonctions, il est possible de classer les événements de défaillance des sous-fonctions du plus important au moins important, comme suit :

1. Défaut de diffusion du message d'évacuation
2. Défaut de balisage de l'itinéraire
3. Défaut de vérification au PR
4. Défaut de matérialisation des PR

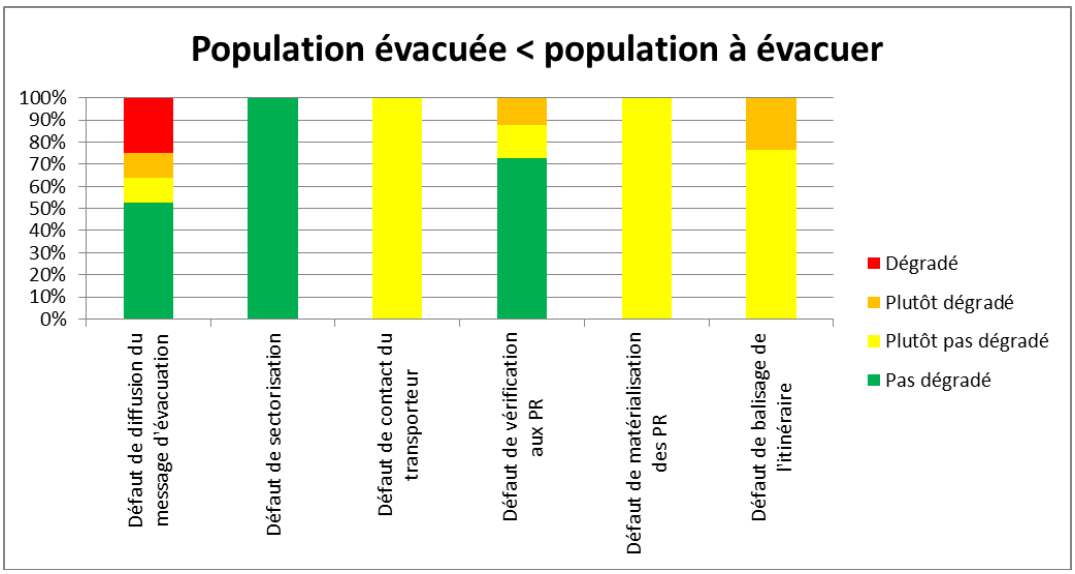


FIGURE 4.7 – Tableau de bord de l'événement population évacuée < population à évacuer à partir des résultats du questionnaire

5. Défaut de contact du transporteur
6. Défaut de sectorisation

Dans la suite des paragraphes, les événements 1 - Défaut de diffusion du message d'évacuation à 5 - Défaut de contact du transporteur, seront investigués pour en déterminer les causes. L'événement 6 - Défaut de sectorisation, ne sera pas détaillé car étant dans un état de fonctionnement optimal.

4.4.2.1 Etats de l'événement défaut de diffusion du message

Pour cet événement, le tableau de bord Figure 4.8 illustre les différents états des défaillances des ressources, pour cette défaillance de fonction.

Il est possible de noter que la perturbation de la fonction de diffusion du message d'évacuation provient de la défaillance de la ressource matérielle. Dans le cas de la commune, la ressource matérielle de diffusion du message d'évacuation est soit une sirène placée au dessus des locaux de la mairie, soit un automate d'appel. La sirène présentant des défauts, la disponibilité peut ne pas être assurée. Cette défaillance de disponibilité vient d'un entretien/maintenance difficile de la ressource (système datant de l'après la guerre), représenté par la défaillance de la maintenance. Un remplacement de la sirène est à prévoir pour une maintenance plus aisée, assurant la disponibilité totale des moyens en cas d'événements de sécurité civile.

La priorité est donnée à :

1. Défaut de disponibilité de la ressource matérielle
2. Défaut de maintenance de la ressource matérielle

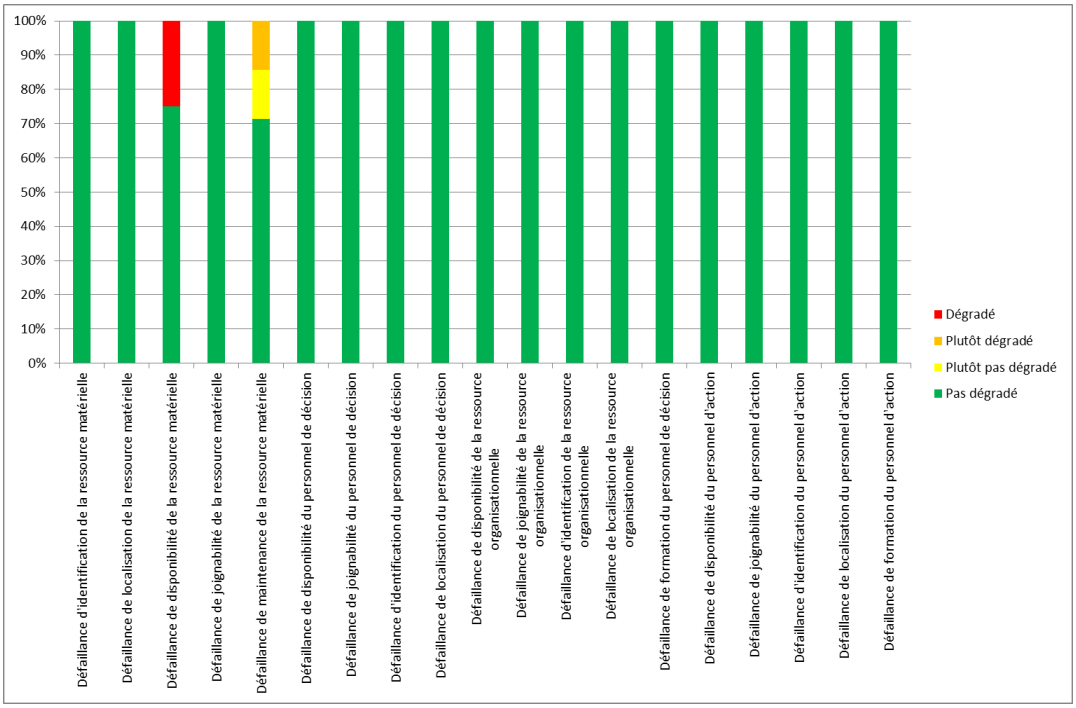


FIGURE 4.8 – Tableau de bord de l'événement défaut de diffusion du message d'évacuation à partir des résultats du questionnaire

Les autres événements n'ayant pas été observés comme dégradant pour la fonction de diffusion du message d'évacuation.

4.4.2.2 Etats de l'événement défaut de balisage de l'itinéraire

Pour cet événement, le tableau de bord Figure 4.9 est observé.

Pour cet événement, les deux ressources ayant un impact négatif sur l'état de sortie la fonction de balisage de l'itinéraire sont : 1) la ressource matérielle et 2) le personnel de décision.

4.4.2.2.1 Défaillance de la ressource matérielle

L'absence totale d'identification et de localisation du matériel de balisage provient du fait que dans le cas d'un balisage de l'itinéraire, l'autorité préfectorale est en charge de réaliser cette mission. De ce fait, il apparaît donc normal que les ressources ne soient pas complètement disponibles et joignables en cas de survenu d'un événement.

4.4.2.2.2 Défaillance du personnel de décision

Dans l'ensemble, le personnel de décision est formé à la mise en place des PR. Cependant, il peut arriver qu'une partie le soit moins, ce qui peut par la suite entraîner une vulnérabilité dans l'organisation. Il peut arriver parfois que le personnel de décision soit difficilement disponible. En revanche, le personnelle au moment de la réalisation de la fonction a été jugé globalement joignable.

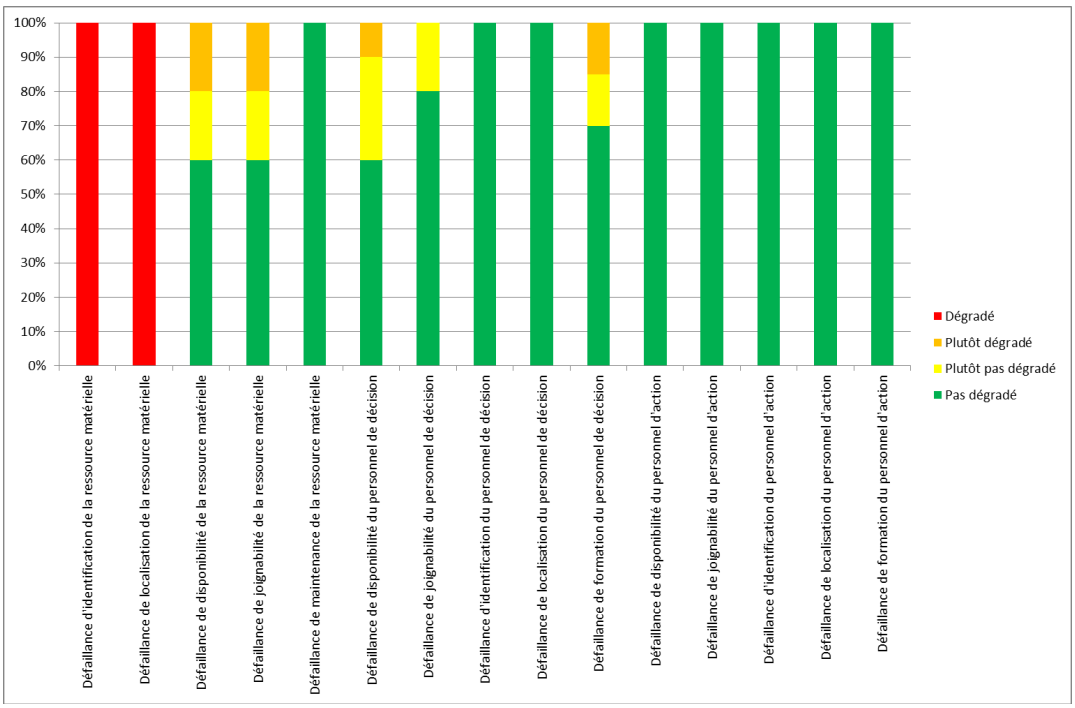


FIGURE 4.9 – Tableau de bord de l'événement défaut de balisage de l'itinéraire à partir des résultats du questionnaire

4.4.2.3 Etats de l'événement défaut de vérification aux PR

Pour cet événement, le tableau de bord Figure 4.10 est observé.

Cette fonction, dont la décision est placée sous la responsabilité du DOS ou de la cellule de coordination présente une défaillance du personnel d'action.

4.4.2.3.1 Défaillance du personnel d'action

Dans l'ensemble, le personnel d'action est formé à la vérification des personnes au lieu de rassemblement. Cependant, il peut arriver qu'une partie le soit moins, ce qui peut par la suite entraîner une vulnérabilité dans l'organisation. Ceci est d'autant plus vrai que le niveau de formation dépend des ressources mobilisées. Par exemple des ressources humaines RH_1 et RH_2 ont un niveau de formation respectivement de F_1 et F_2 avec $F_1 < F_2$. Si RH_1 est requis à la place de RH_2, alors la probabilité de défaillance de la fonction sera plus grande à cause du niveau de formation de RH_1 inférieur à RH_2. Ceci est pris en compte ici en admettant des défaillances allant jusqu'à un niveau de dégradation "Plutôt dégradé" (Niv. III).

4.4.2.4 Etats de l'événement défaut de matérialisation des PR

Pour cet événement, le tableau de bord Figure 4.11 est observé.

Pour cette fonction, des défaillances de la ressource matérielle et des ressources humaines (décision et action) sont relevées.

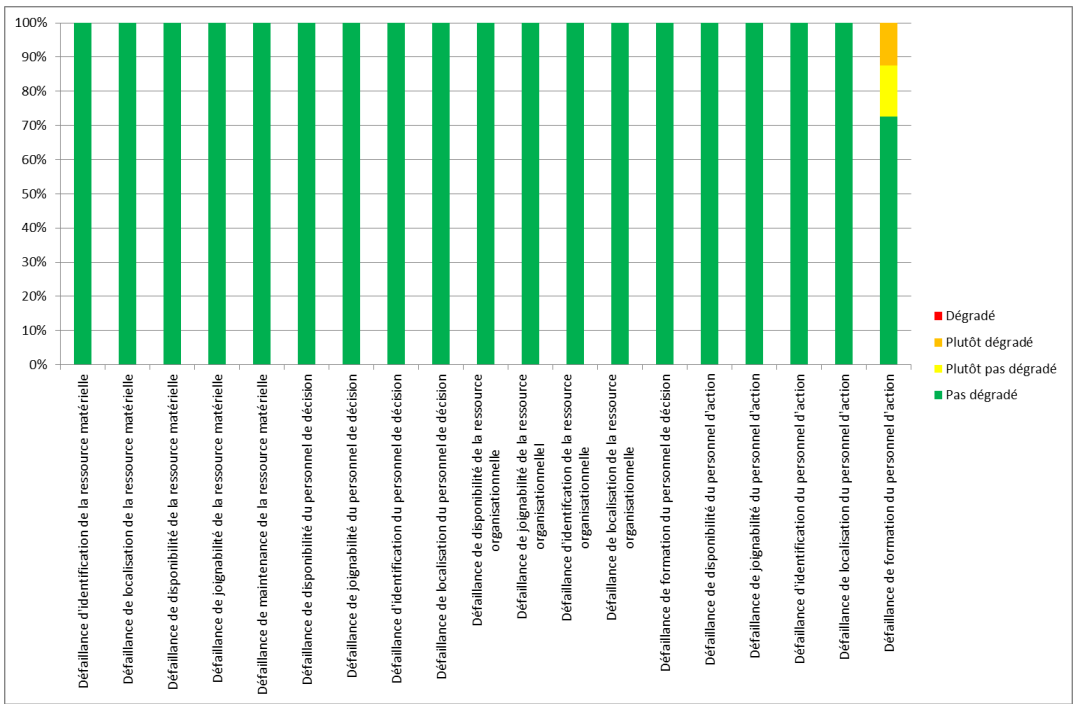


FIGURE 4.10 – Tableau de bord de l'événement défaut vérification aux PR à partir des résultats du questionnaire

4.4.2.4.1 Défaillance de la ressource matérielle

La ressource matérielle pour la mise en place des points de rassemblement n'est pas définie dans le plan ni localisée dans le plan. Elle n'est pas non plus maintenue. Cela vient du fait que dans le cas de la commune étudiée, les points de rassemblement sont des lieux publics et n'ont pas besoin nécessairement d'être mis en place en des lieux spécifiques. Cependant dans le cas où ces lieux seraient indisponibles, il serait bon de prévoir des ressources matérielles pour la matérialisation des PR.

4.4.2.4.2 Défaillance du personnel de décision

Dans l'ensemble, le personnel de décision est formé à la mise en place des PR. Cependant, il peut arriver qu'une partie le soit moins, ce qui peut par la suite entraîner une vulnérabilité dans l'organisation.

4.4.2.4.3 Défaillance du personnel d'action

Dans l'ensemble, le personnel d'action est formé à la mise en place des PR. Cependant, il peut arriver qu'une partie le soit moins, mais ne dépassant jamais un seuil de dégradation significatif. En revanche, les personnes en charge de la mise en place des PR ne sont pas localisées *a priori* dans le plan. C'est à dire que l'adresse du domicile ou du travail du personnel n'est pas renseignée dans le plan. Ce qui signifie qu'à l'instant du déclenchement de la mission de matérialisation des PR, il n'est pas possible de connaitre l'emplacement du personnel. Ceci pouvant entraîner une difficulté dans le cas où le personnel est réquisitionné

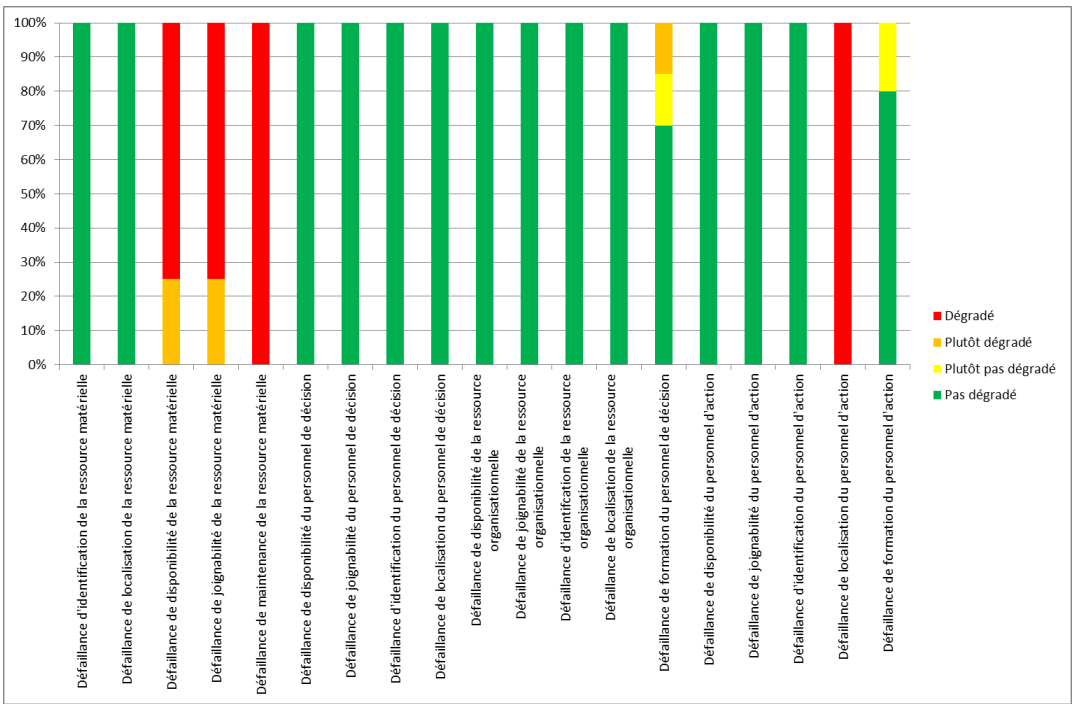


FIGURE 4.11 – Tableau de bord de l'événement défaut de matérialisation des PR à partir des résultats du questionnaire

par voies de télécommunication, si celles-ci sont coupées. Une réquisition au domicile ou sur le lieu de travail du personnel est donc inenvisageable.

4.4.2.5 Etats de l'événement défaut de contact du transporteur

Pour cet événement, le tableau de bord Figure 4.12 est observé.

Pour cette fonction, des défaillances de la ressource matérielle et du personnel de décision sont observées.

4.4.2.5.1 Défaillance de la ressource matérielle

La ressource matérielle de cette fonction est un moyen de communication : le téléphone. Ce dernier n'est pas identifié ni localisé dans le PCS, mais n'empêche en rien le mauvais fonctionnement du plan. En effet, il a été admis lors de l'entretien pour la collecte des informations avec les chargés de mission Risques majeurs de la commune étudiée, que même si un téléphone n'était pas identifié dans le plan, cela n'entrainerait pas la perte de la fonction, étant donné la redondance de la ressource (autres téléphones à disposition au sein du PCC). Cependant, cela impose que la défaillance de maintenance doit être considérée pour l'ensemble de la ressource téléphone. De même pour le défaut de disponibilité (évaluation de l'occupation/utilisation de la ressource par d'autres fonctions).

C'est pour cette raison particulière que la porte $2 - D - Red$ a été développée dans les arbres de défaillance, ne considérant la dégradation de planification que comme un élément perturbateur de la défaillance de mobilisation.

FIGURE 4.12 – Tableau de bord de l'événement défaut de contact du transporteur à partir des résultats du questionnaire

4.4.2.5.2 Défaillance du personnel de décision

A ce stade de l'organisation de l'évacuation, le personnel de décision (cellule coordination et logistique) peut être sollicité par d'autres missions (exemple ravitaillement des centres d'hébergement). C'est pourquoi il est observée une défaillance de disponibilité de cette ressource. Cette défaillance peut être contrée par la redondance de ressources.

4.4.2.6 Hiérarchisation globale des événements et propositions d'améliorations

Les événements à considérer pour l'amélioration de l'organisation de la gestion d'événements peuvent être classés dans le Tableau 4.3. Ce tableau considère la priorité de traitement de la fonction du système d'évacuation, croisée à la priorité de la défaillance des ressources mobilisées par la fonction considérée. Des actions à mener pour améliorer l'organisation de gestion d'événements peuvent être ajoutées (Tableau 4.4). Ces propos sont disponibles dans le rapport d'évaluation en Annexe F. Un exemple de calcul de priorité (ou importance) d'un événement est donné au chapitre précédent pour le fonction Diffusion du message d'évacuation (section 3.6 page 111). Uniquement les événements Défaut de diffusion du message d'évacuation, Défaut de balisage et Défaut de vérification aux PR sont présentés dans les Tableaux 4.3 et 4.4 en raison du seuil ($d \geq 3$) fixé à la section 3.6.

TABLE 4.3 – Hiérarchisation des défauts pour la fonction d'évacuation dans le cas de la commune étudiée

Fonction		**Défaut de ressource**	
Priorité (rang)	Nom	Priorité (rang)	Nom
1	Défaut de diffusion du message d'évacuation	1	Défaut de disponibilité de la ressource matérielle (sirène, automate)
		2	Défaut de maintenance de la ressource matérielle (sirène, automate)
2	Défaut de balisage de l'itinéraire	1	Défaut de formation du personnel de décision
		2	Défaut de disponibilité du personnel de décision
3	Défaut de vérification au PR	1	Défaut de formation du personnel d'action

TABLE 4.4 – Actions correctives pour les défauts hiérarchisés de la fonction d'évacuation dans le cas de la commune étudiée

Défaut de ressource		**Action corrective**
Priorité (rang)	Nom	Désignation
1-1	Défaut de disponibilité de la ressource matérielle (sirène, automate)	Un changement du dispositif est prévu, sa vétusté le rendant difficile à maintenir
1-2	Défaut de maintenance la ressource matérielle (sirène, automate)	Un changement du dispositif est prévu, sa vétusté le rendant difficile à maintenir
2-1	Défaut de formation du personnel de décision	S'assurer de la formation du personnel de décision du balisage de l'itinéraire
2-2	Défaut de disponibilité du personnel de décision	S'assurer que le personnel de décision pour le balisage de l'itinéraire puisse être disponible (délégation)
3-1	Défaut de formation du personnel d'action	S'assurer de la formation du personnel de vérification aux PR

Il est également possible d'ajouter à ce tableau une colonne qui permettrait de visualiser le degré de réalisation de l'action corrective pour perfectionner la visualisation des actions en cours pour l'amélioration de l'organisation.

Conclusion

Ce chapitre décrit un cas d'application de la démarche d'évaluation des plans d'urgence locaux que sont les PCS. Ce chapitre débute par la description de la collectivité locale choisie pour ce cas d'étude. Puis le modèle générique développé au chapitre 3 a pu être validé par les chargées de mission Risques majeurs de la commune étudiée. Cette validation a permis l'appropriation du modèle générique. Grâce à ce cas d'étude, il a été également possible de valider le niveau de détail décrit dans le modèle générique.

Dans un second temps, l'organisation a pu être évaluée selon le questionnaire généré par le modèle générique. Les résultats de ce questionnaire ont pu être présentés. Ces derniers ont servi à l'alimentation des données d'entrées dans le calcul d'indices de fonctionnement d'une fonction choisie. En l'occurrence, la fonction décrite est l'une dès plus importantes dans l'organisation d'événements de sécurité civile, à savoir la fonction d'évacuation. Le calcul des indicateurs de fonctionnement est basé sur les arbres de défaillance présentés au chapitre 3. Certains ont cependant nécessité une légère adaptation pour décrire au mieux l'organisation de gestion d'événements de la commune étudiée.

Enfin, une interprétation des résultats issus des données d'entrée du questionnaire a été présentée. À partir de l'état de la fonction, une investigation des éléments les plus préjudiciables pour cette dernière a été menée. Ces derniers ont été hiérarchisés pour pouvoir aider les instances décisionnaires à mettre face à ces événements, des actions correctives, les aidant ainsi à prévoir un programme d'amélioration.

La démarche d'évaluation a pu être validée sur ce cas d'étude. Des améliorations peuvent être apportées dans cette démarche. Ces améliorations et suggestions sont décrites dans les perspectives de ce travail de recherche.

Conclusion et perspectives

La gestion d'événements de sécurité civile débute au niveau local. La Commune est le premier échelon de réponse qui permet de garantir la sauvegarde de la population. En France, l'État impose aux instances locales, dont au moins un risque a été identifié comme pouvant mettre en danger leur population, de se munir d'un Plan Communal de Sauvegarde. Ce plan a pour vocation de décrire les événements pouvant survenir sur le territoire communal et de recenser les enjeux et vulnérabilités de la commune. Il décrit également l'organisation prévue pour gérer ces événements de sécurité civile. Cependant, bien que cette organisation soit présente, le Maire, responsable de l'administration de sa Commune, ne dispose pas d'information *a priori* sur la capacité de fonctionnement du plan établi.

Les objectifs des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit visent à proposer une démarche structurée pour l'analyse *a priori* des Plans Communaux de Sauvegarde, en vue de fournir aux instances décisionnaires des indications sur la capacité de l'organisation prévue à fonctionner tel que cela a été planifié. Ceci passe par la mise en exergue d'indicateurs de fonctionnement, permettant de repérer dans cette organisation les éléments névralgiques, pour proposer un programme d'amélioration.

Les plans de secours sont des systèmes organisationnels complexes, car ils regroupent différents types de ressources concourant à la réalisation de fonctions. Afin d'appréhender cette complexité, ces travaux proposent de se baser sur une modélisation qui permet de représenter l'interaction fonctions-ressources des processus organisationnels. Baser la proposition sur un modèle permet alors de mener une analyse structurée de cette organisation. Après l'étude de plusieurs plans de secours et du guide officiel d'élaboration, un modèle générique a été proposé pour représenter les mécanismes de l'organisation de gestion d'événements de sécurité civile. Ce modèle générique est réalisé par le biais de la méthode de modélisation FIS, qui permet de représenter les liens entre les fonctions et les ressources et de générer des analyses de risques. Deux fonctions ont été complètement modélisées avec le modèle générique. Il s'agit de la fonction de réception de l'alerte et d'évacuation. Elles sont décrites par 26 sous-fonctions, 88 ressources, 21 relations décrivant le séquencement de ces fonctions et sous fonctions.

Ce modèle a permis de mettre en évidence des similarités dans les ressources utilisées et de décrire le séquencement des missions des Plans Communaux de Sauvegarde. Des arbres de défaillance ont pu être décrits, permettant de relier les défaillances des ressources aux défaillances de fonction. Deux structures génériques d'arbres de défaillance ont pu être proposée, pour des défaillances fonction en deçà et au-delà de leurs objectifs. Ces arbres de défaillance génériques se base sur treize modes de défaillance génériques répartis par types de ressource (humaine, technique, organisationnelle et informationnelle). En menant une analyse sur la probabilité d'occurrence des défaillances, la démarche est en mesure d'analyser la vulnérabilité d'une fonction et donc sa capacité de fonctionnement. Pour le seul événement

Population évacuée < population à évacuée, 235 événements tous types confondus (de base, intermédiaire, sommet) ont été combinés.

Cependant, des extensions ont dû être apportées aux arbres de défaillance classiques. En effet, ceux-ci ne gèrent classiquement que des défaillances binaires. A savoir qu'un mode de défaillance ne possède que deux états : fonctionnement ou dysfonctionnement. Cette considération est à revoir dans le cas de l'évaluation des plans locaux de gestion d'urgence. De fait, dans les systèmes réels, les défaillances ne sont pas binaires, mais possèdent des états multiples. Avoir plusieurs états de défaillance permet ainsi d'affiner l'analyse des plans de secours. Ces travaux ont donc été amenés à considérer dans les arbres de défaillance, des états de modes de défaillance multiples. Pour cela, il est proposé de s'appuyer sur la théorie des systèmes multi-états. De nouvelles façons de combiner les modes de défaillance entre eux ont été développées, pour propager la défaillance multi-états des ressources vers la défaillance multi-états des fonctions.

Afin d'alimenter le modèle, un questionnaire a été établi pour recueillir les informations nécessaires à la caractérisation des modes de défaillance multi-niveaux. Ce questionnaire permet alors de récupérer auprès des gestionnaires des plans d'urgence les données sur les états de défaillance des ressources qui permettent, par la suite et grâce aux nouvelles règles de calcul développées pour les portes multi-états, d'accéder à la défaillance multi-états d'une fonction. Le questionnaire servant à décrire des modes de défaillance génériques, les questions les caractérisant héritent alors de la généricité de ce modes.

Enfin, une proposition de hiérarchisation des ressources critiques a été faite, pour assister les gestionnaires dans la construction de programmes d'amélioration (identification et priorisation d'actions).

L'ensemble de cette démarche a été testée sur une organisation communale. Elle a reçu un bon accueil de la part des gestionnaires du Plan Communal de Sauvegarde. En effet, l'idée de leur proposer un outil capable de surveiller la capacité du plan à fonctionner et programmer des actions d'amélioration a été identifiée comme indispensable.

Grâce aux résultats de cette expérience, des concepts théoriques ont pu être validés, comme le niveau de détail dans la modélisation, l'enchainement des fonctions dans le diagramme de séquence, ou encore les combinaisons de défaillances dans les arbres menant de la défaillance des ressources à la défaillance des fonctions.

Ils ont également permis de dégager des pistes d'améliorations qui seront exposées dans les paragraphes suivants.

Perspectives

Les perspectives de ces travaux sont listées dans les paragraphes suivants.

Améliorations au niveau de la prise en compte des ressources

Dans le modèle proposé, la ressource population est bien identifiée, cependant, ses caractéristiques ne sont pas suffisamment explorées pour être intégrées à la démarche entière. Il serait intéressant d'ajouter des indications sur le niveau de formation, d'information de la population, sa vulnérabilité et sa prédisposition à résister aux ordres émis par les instances décisionnaires.

Utilisation de la démarche

La récolte d'information pour le cas d'étude a été menée auprès des personnes qui ont conçu le Plan Communal de Sauvegarde de la commune à l'étude. Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec les instances décisionnaires, les acteurs de décision, les opérateurs terrain et également la population. Des comparaisons de représentation de l'état du système de gestion d'événements de sécurité civile selon les différents acteurs pourraient alors être menées. D'autres axes d'améliorations pourraient en être dégagés.

Prise en compte de la dynamique temporelle

Les considérations de la présente section ont été développées lors d'un séjour effectué durant ces travaux de recherche, au Centre Risque et Performance de l'École Polytechnique de Montréal, Canada. Ce séjour de recherche a été financé par la Région Rhône-Alpes.

Une amorce de la considération de la dynamique temporelle a déjà été présentée au chapitre 3 en réalisant un diagramme de séquence des fonctions des plans d'urgence. Considérer ce séquencement permet de donner un aspect dynamique au modèle qui, pour l'instant, ne renvoie qu'une image statique de l'organisation de gestion d'événements de sécurité civile valable à l'instant où le questionnaire est réalisé.

Pour considérer l'aspect temporel, les pistes de réflexions engagées se sont portées sur des outils de planification tels que le diagramme de Gantt ou réseau de PERT. Dans ces diagrammes, les activités (fonctions au sens de la modélisation FIS) utilisent des ressources (également employées dans la modélisation FIS). Les activités sont caractérisées par des durées de réalisation, ou plutôt de planification de réalisation. Des dates critiques sont décrites, comme les dates de début et de fin au plus tôt et les dates de début et de fin au plus tard, qui entraînent une dégradation de la fonction lorsqu'elles sont dépassées. En fonction du dépassement ou non de ces dates, des indicateurs de performance peuvent être donnés.

Ainsi, grâce à la prise en compte du séquencement des missions et à la caractérisation des durées pour l'ensemble des missions des plans d'urgence, il est possible d'avoir *a priori* et en temps réel, pour des scénarios donnés, des indications sur le temps de réalisation de chacune des missions. Cette information est utile pour les instances décisionnaires, avant et pendant l'exécution du plan, pour prévoir des ressources supplémentaires, où les ajuster,

si celle-ci sont requises par ailleurs. Une amorce de la réflexion sur la prise en compte de l'aspect temporel est disponible en Annexe C.

Prise en compte de la simulation

Un des autres objectifs qui peut être abordé à l'issue de ces travaux de recherche est la simulation dynamique du comportement du plan. Combinée à la prise en compte de l'aspect temporel décrit en Annexe C, la simulation permettrait, grâce à la modélisation FIS, de visualiser l'allocation des ressources en temps simulé. En admettant que des variables de besoin en termes de ressources soient ajoutées, d'autres indicateurs de performance pourraient alors être caractérisés. Il serait possible de visualiser les manques de ressources à des instants critiques et de mettre en place des solutions alternatives. La simulation rendrait alors possible l'utilisation de l'outil en phase d'exercice.

Prise en compte de la criticité des fonctions

Dans les considérations présentes, la criticité des fonctions n'est pas prise en compte dans la génération des indicateurs finaux. Dans ce sens, cela implique qu'aucune porte spécifique n'a été développée pour agglomérer les indications renvoyées par les fonctions. Les portes déjà développées pour la prise en compte des états multiples ont été utilisées. En revanche, à l'issue du retour d'expérience qui a pu être mené avec les travaux réalisés avec la commune à l'étude, la nécessité de caractériser l'importance des fonctions par rapport à d'autres s'est faite ressentir. Par exemple, actuellement dans le modèle, il est considéré que si une défaillance de la fonction de vérification des personnes aux points de rassemblement n'est pas réalisée, le système d'évacuation échoue. Ce qui n'est pas nécessairement le cas dans la réalité. Cependant garder des pratiques sécuritaires/conservatives est une pratique courante pour ce type de système.

Prise en compte des défaillances multi-états dans le logiciel X-Risk

Ajourd'hui la modélisation FIS supportée par le logiciel X-Risk ne supporte pas la prise en compte des défaillances multi-états. Une application tierce a été développée grâce à une Interface de Programmation (*Application Interface Programming* en anglais ou encore API). Cette interface permet de se connecter à l'outil de modélisation et de récupérer certaines informations du modèle (systèmes, fonctions, ressources, variables, événements de défaillance). L'application tierce développée permet d'implémenter dans les arbres de défaillance la considération d'états multiples, et de portes spécifiquement développées dans le cas de ces travaux. Elle intègre également la représentation sous forme de tableaux de bord proposée par la démarche de ces travaux de recherche.

Cependant, dû à certaines limites de l'interface, aujourd'hui il n'est pas possible d'intégrer toute la démarche proposée. Par exemple, il est impossible de générer de nouveaux éléments dans le modèle comme les systèmes, fonctions, ressources, variables ou événements

de défaillance. Ce qui rend difficile, voire impossible la génération automatique des événements génériques lors de la caractérisation d'une ressource, d'une fonction ou d'un système. L'interface ne permet également pas d'accéder à la liste entière des ressources d'une fonction, sans distinction de ressources d'entrée consommées, de support ou de contrôle. La résolution de ces deux points permettrait d'améliorer l'application développée pour la prise en compte des états multi-niveaux de défaillance dans l'évaluation des plans d'urgence. Outre les aspects d'interfaçage, l'application proposée n'embarque pas non plus l'aspect temporel dont une amorce est proposée en Annexe C. Cette application n'est pour l'instant qu'à sa phase de développement et pourrait être améliorée, sans difficultés majeures.

Application à d'autres types de plans

Ces travaux se sont concentrés sur une application de la démarche à un niveau de plan local. Il pourrait être tenté de réaliser cette même démarche aux échelons de plans supérieurs (Départemental et Zonal). Cependant, il faudrait faire attention à la lourdeur du modèle, à cause du nombre important de ressources techniques et d'acteurs engagés à ces niveaux. De même, les relations d'interactions verraient leur nombre s'accroître de manière significative.

Annexes

Annexe A

Tutoriel d'utilisation du Plug-In

- Lancer xrisk.exe
- Modéliser le système (description des fonctions (1) et des ressources (2))
- Connecter les ressources aux fonctions (3)
- Renseigner les modes de défaillance des ressources (4)
- Créer une ressource temporaire (5)
- Renseigner les modes de défaillance des fonctions (6) (à terme déplacer au niveau de la fonction)
- Lancer xmss.jar
- Entrer le chemin du logiciel x-risk (7)
- (Cliquer sur lancer X-Risk)
- Cliquer sur lancer X-MSS (8)
- Sélectionner le système à l'étude (9)
- Sélectionner la fonction à l'étude (10)
- Cliquer sur la ressource dont l'état est à renseigner (11)
- Cliquer sur l'Identifiant (Id) du mode de défaillance à renseigner (12)
- Si c'est un événement de base, entrer les valeurs de probabilité des états (13)
- Si c'est un événement intermédiaire au sommet, sélectionner le comportement de la porte, puis calculer (14)
- En cas de modification, cliquer sur le menu "Multi-États" puis "Calculer toutes les portes" (15)

A tout instant, il est possible d'accéder à la répartition des probabilités grâce au champ graphique (16). Une première estimation de la priorité de l'événement est donnée en réalisant la somme des produits de probabilité par leur valeur d'état (17). Par la suite, il faudra implémenter le calcul du $MRRW$.

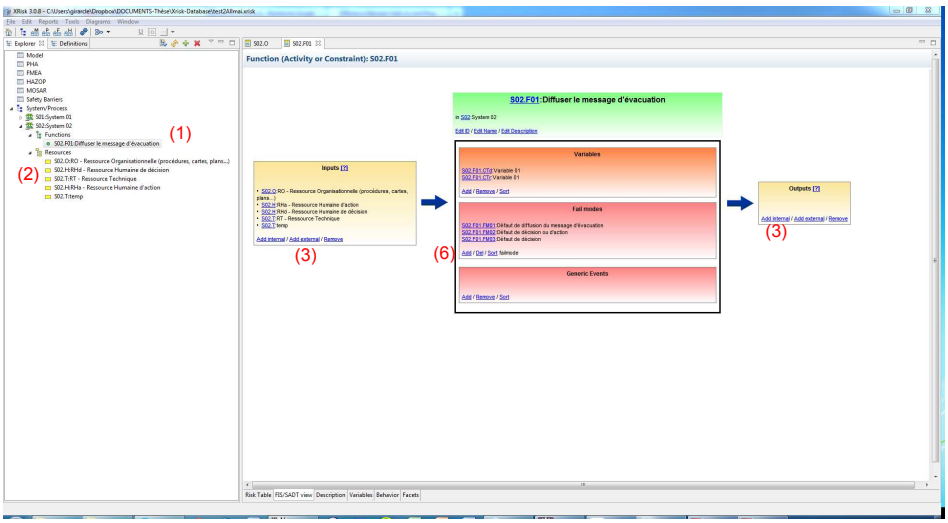


FIGURE A.1 – Étape 1

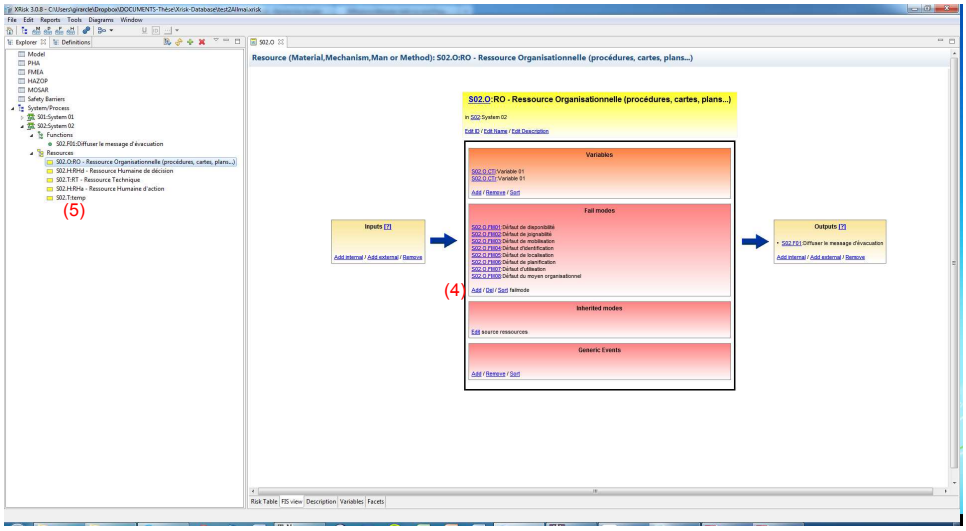


FIGURE A.2 – Étape 2

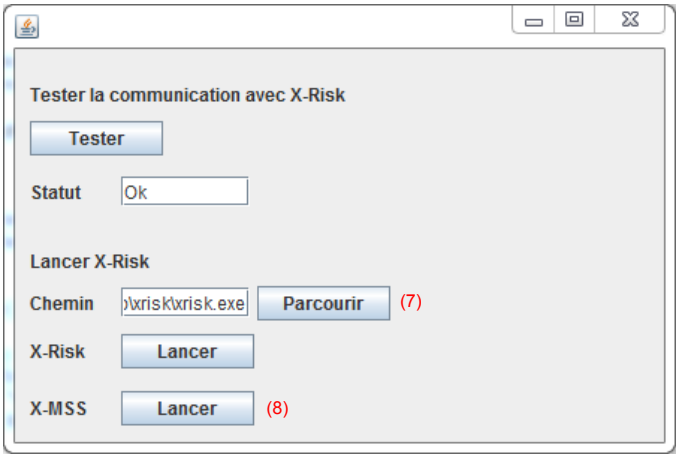


FIGURE A.3 – Étape 3

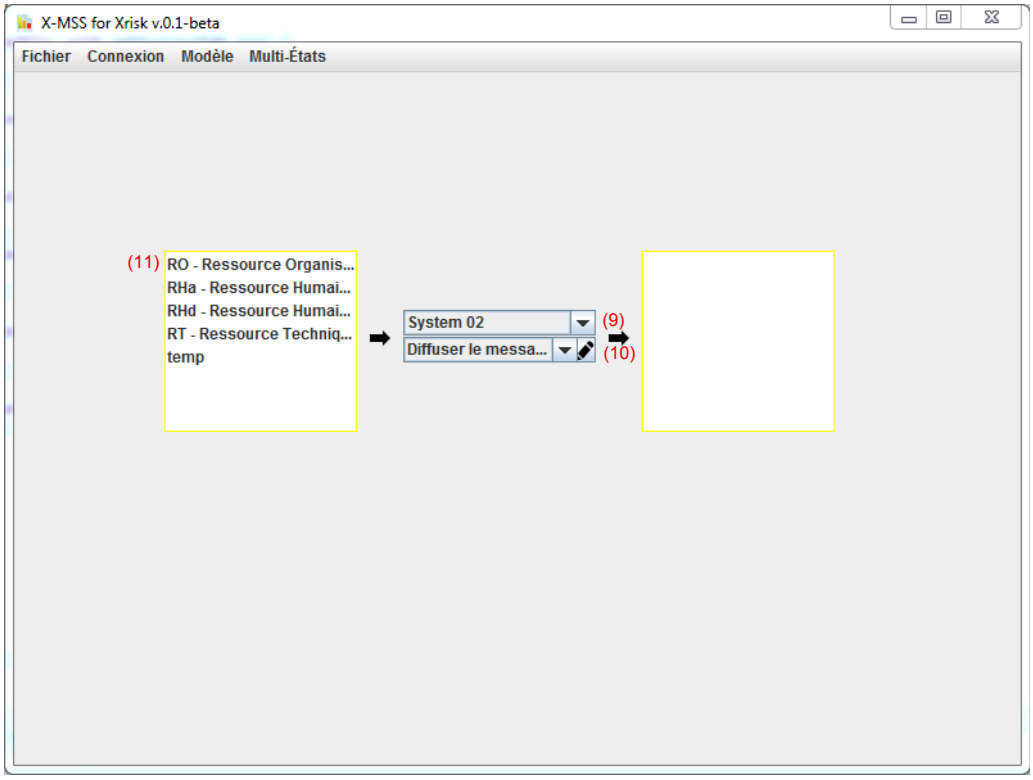


FIGURE A.4 – Étape 4

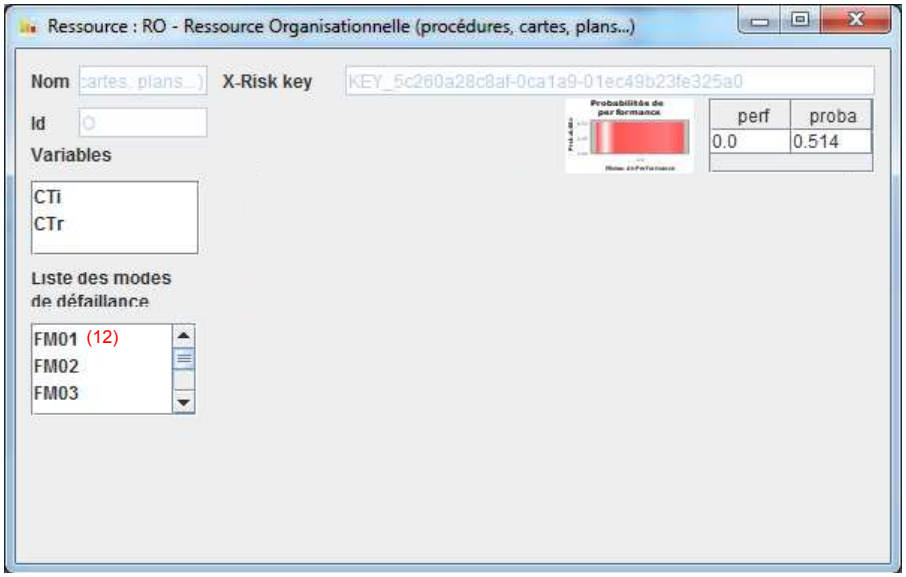


FIGURE A.5 – Étape 5

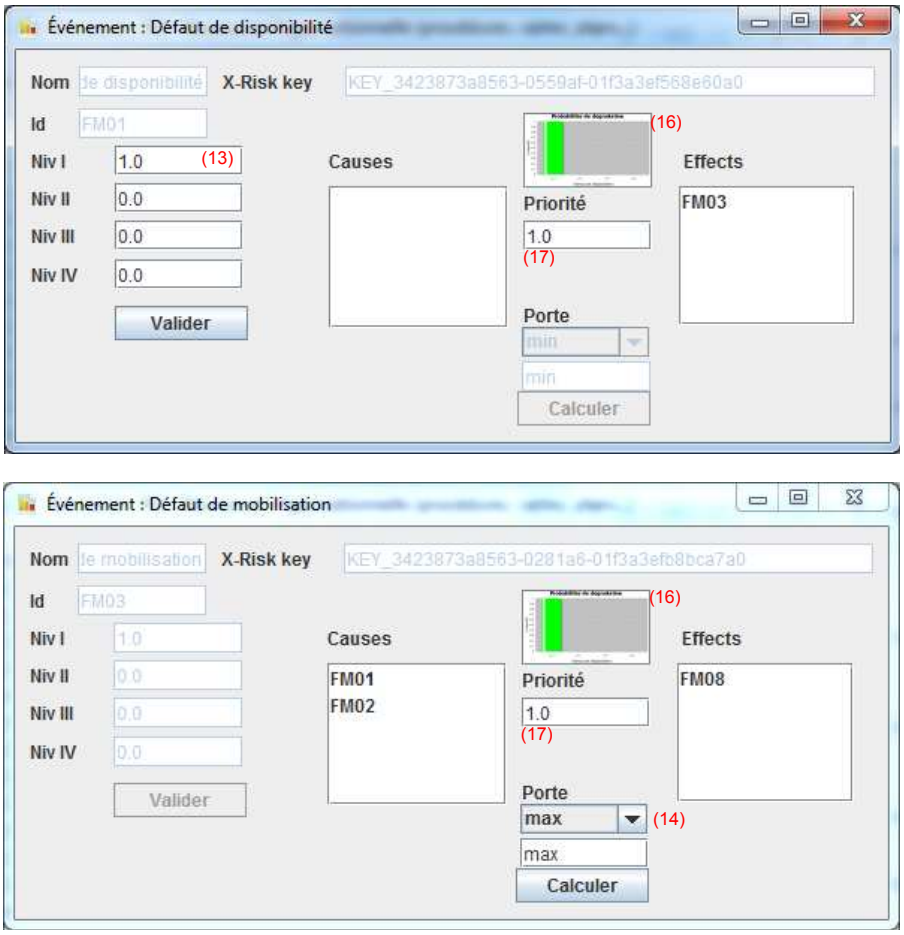


FIGURE A.6 – Étape 6

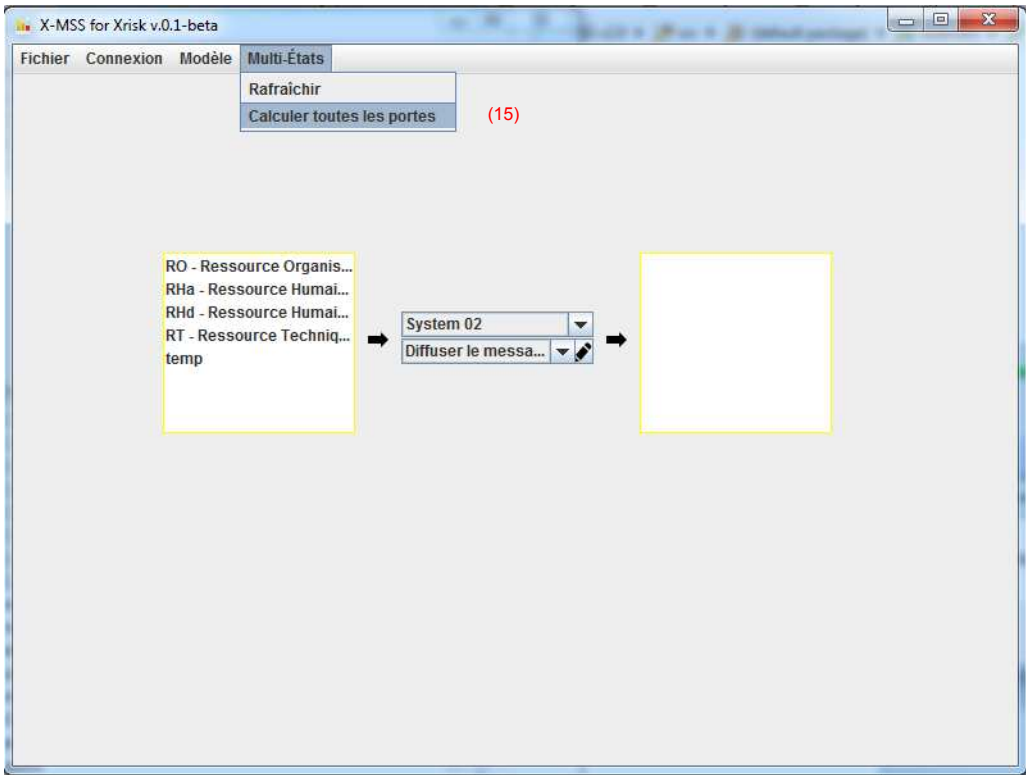


FIGURE A.7 – Étape 7

Annexe B

Analyses de PCS

B.1 Nancy

Population >100 000 ; densité 7000 hab/km^2 (2009)

Le PCS de la ville de Nancy (Ville de Nancy, 2009) est découpé en 4 parties :

- Généralités
- DICRIM
- PCS
- Moyens

B.1.1 Généralités

Dans la première partie, on trouve un rappel réglementaire qui indique le cadre d'action du PCS (événements naturels, technologiques et sociologiques).

B.1.2 DICRIM

La deuxième partie est le Dossier Communal d'Information sur les Risques Majeurs. Il rappelle principalement les notions générales à connaître pour la population en matière de risque majeur, information préventive et l'alerte. Il fait état des risques présents sur la commune, naturels (inondation et mouvement de terrain) et technologiques (rupture de barrage, explosion de silo, TMD, minier).

B.1.3 PCS

La troisième partie du document décrit le rôle de la cellule de crise, la mise en œuvre du plan, l'installation des locaux de crise ainsi que l'organisation et le fonctionnement. Il est bien spécifié que la cellule de crise ne doit en aucun cas se substituer aux centres opérationnels. Elle a pour mission de :

- Prendre connaissance de l'événement
- Juger son ampleur
- Étudier les modes d'assistance à la population
- Fournir les moyens
- Établir une communication avec les autorités
- Répartir les rôles
- Désigner un représentant terrain
- Désigner un représentant administratif
- Gérer la communication au public
- Déployer des stratégies pour un retour à la normale
- Coordonner les moyens extérieurs
- Gérer l'après crise

Il est a noter la présence d'une grille de déclenchement de la cellule de crise.

La mise en œuvre du plan est consécutive à la vigilance et au système d'astreinte. L'alerte est reçue par le PC sécurité de la ville. S'il y a lieu, il mobilise les astreintes technique et d'accident en même temps que les membres de la cellule de crise (astreinte de direction, le représentant du cabinet du maire, l'élu à la sécurité et au besoin le maire et le directeur général des services). Une cellule de crise restreinte est mise en œuvre sur ordre du maire, de son délégué ou de l'élu responsable de la sécurité et des biens. La cellule de crise a pour mission d'estimer la situation et ses évolutions possibles, décide de convoquer d'autres membres, choisit les locaux de crise, contacte les responsables logistiques et de cellule de crise, compose la cellule de crise, contacte les membres supplémentaires, s'assure de la convocation.

Les locaux de crise seront installés dans l'hôtel de ville. Deux locaux de repli sont identifiés. Une procédure de mise en service est décrite ainsi que l'organisation matérielle (récupérer la documentation, identifier les sections, fournir la documentation, installer les moyens de communication). L'organisation et le fonctionnement sont décrits dans la dernière partie de cette section. Une distinction est faite entre les objectifs de la cellule de crise (convergence des renseignements, départ des ordres) et le terrain (mise en œuvre de décision, alimente l'analyse, rend compte de la situation). Trois types de fiche sont fournis dans le PCS, les fiches organisation (rôle de chacun) les fiches réflexes (première action au début de la crise) et les fiches missions (qui fait quoi, comment). Les différents rôles des sections de la cellule de crise sont définis (direction, communication, logistique, renseignement, juridique, sociale).

B.1.4 Moyens

Les moyens sont découpés en quatre sections : les moyens d'alerte, les sociétés de transport, les moyens d'accueil et d'assistance, les moyens de transmission. L'alerte est donnée principalement par la préfecture. La population en est informée par le signal national d'alerte ou par des véhicules munis d'un haut-parleur. Les moyens d'alerte sont répertoriés dans le PCS de la ville. Les sociétés de transport sont répertoriées ainsi que les moyens d'accueil et d'assistance. On retrouve dans ces derniers, les hébergements (immédiatement utilisables et aménageables) ; un plan d'hébergement recense les capacités d'accueil. La restauration est intégrée aux moyens d'accueil, elle est régie par un plan restauration pour recenser les sources d'approvisionnement, les structures permettant la préparation des repas, les structures permettant la prise des repas. Deux types de restaurations ont été définis, celle d'urgence et celle de plus long terme. Enfin la mise en place des moyens radios est définie.

B.2 Metz

Population >120 000 ; densité 9000 hab/km^2 (2009)

Le PCS de la ville de Metz (Ville de Metz, 2007) est structuré de la manière suivante :

- Cadre administratif
- Cadre opérationnel
- Rôle
- Analyse de risque
- Annexe
- DICRIM

B.2.1 Cadre administratif

Le cadre administrative reprend le cadre réglementaire, où est rappelé que le maire doit prendre toutes les dispositions pour faire cesser les fléaux. Le PCS y est décrit comme un outil d'anticipation et d'organisation. Il y est rappelé que son objectif n'est pas de tout prévoir. Le PCS est un « maillon local de l'organisation de la sauvegarde » permettant de gérer les différentes phases d'un événement de sécurité civile : urgence, post urgence et retour à la normale. Le PCS est compatible avec les différents niveaux de plan ORSEC (départemental, zonal et national) ainsi qu'avec les plans relatifs au trafic routier (plan intempérie, plan de gestion du trafic...) et les plans de veille (Vigipirate).

B.2.1.1 Cadre opérationnel

Premièrement les responsabilités y sont redéfinies, avec la distinction entre le Directeur et le Commandant des Opérations de secours, respectivement le responsable de la coordination de l'action communal (Maire) et le responsable des opérations de secours (pompier).

Vient ensuite la caractérisation de la cellule de crise communale (ou poste de commandement communal). On y retrouve un index des fonctions à assurer et des personnes les assurant. Sont également précisés sa localisation et les moyens nécessaires. Un site de repli est également prévu en cas d'indisponibilité du premier site. Enfin, cette partie est clôturée par la procédure de déclenchement du PCS. La réception de l'alerte, assurée par la police municipale, déclenche des niveaux de mobilisation croissants :

1. Pré-alerte de l'antenne d'urgence
2. Alerte de l'antenne d'urgence
3. Déclenchement PCS (information population) + alerte cellule communale de crise
4. Déclenchement PCS (évacuation population) + alerte cellule communale de crise

B.2.2 Rôles

Dans cette section, tous les rôles des acteurs communaux sont définis suivant le triptyque avant, pendant et après l'événement : rôles du Maire, de la police municipale, de l'antenne

d'urgence (mission de sécurité publique, de réseaux et voirie) et de la direction de la communication.

B.2.3 Analyse des risques

La commune recense plus de 120 000 habitants sur une surface de plus de 4000 hectares et six risques majeurs. Les enjeux de la commune sont identifiés dans un atlas et le DICRIM est joint en annexe.

Le risque inondation est le premier décrit ainsi que l'organisation de sa surveillance (système d'annonce des crues et mesure d'échelles, capteurs). La ville dispose de plusieurs systèmes de protection comme des postes anti-crues, des lacs et aménagements urbains. Pour chaque scénario inondation, l'alerte est décrite ainsi que la procédure générale et le matériels à mobiliser.

Sont décrits par la suite les événements météorologiques exceptionnels (tempête, froid et canicule) avec leurs différents niveaux de déclenchement et les glissements de terrain.

Le risque industriel est pris en compte par la description de plusieurs scénarios. Les différents enjeux et procédures à mettre en œuvre sont décrits pour chacun des scénarios.

Une procédure commune est décrite pour tous les scénarios de transport de matières dangereuses (train, canalisation souterraine, route et fluvial).

Enfin des procédures de risque nucléaire et de mouvement de foule sont décrites.

B.2.4 Annexes

Dans les annexes, on retrouve les différentes fiches de renseignements
- Astreintes
- Évacuation – Famille
- Évacuation – Établissement médical
- Évacuation – Établissement scolaire
- Évacuation – Établissement entreprise
- Recensement lieu d'accueil
- Bénévoles

Vulnérabilité	Risque
2 lignes téléphoniques	Réseau saturé
1 tracteur	Ralentissement de la mise en œuvre des moyens opérationnels
Couverture téléphonique cellulaire <100%	Inertie probable de la gestion des équipes terrain
Internet limité à 2 mo dans le bourg et bas débit dans les hameaux	Limitation des transmissions de données, ralentissement des échanges d'information
Lignes électriques et téléphoniques non enfouies	Aggravation des problèmes de circulation (coupure des lignes ? ?)

B.3 Saint-Agnan

Population >900 ; densité 70 hab/km^2 (2009)

Le PCS de Saint Agnan (Ville de Saint-Agnan, 2009) est découpé en 4 parties :

- le préambule administratif
- l'analyse de risques
- l'alerte et l'organisation des secours
- les moyens

B.3.1 Préambule administratif

La commune y est présentée avec le recensement par rue du nombre de personnes présente sur la commune. Les entreprises de la commune (2) y sont indexées. Il est intéressant de noter que dans cette partie est présent un paragraphe sur les facteurs d'affaiblissement de la commune, du fait de sa petitesse.

B.3.2 Analyse de risque

Les risques inondation, nucléaire, de transport de matières dangereuses, conduite de transport de gaz, pandémie grippale, canicule, orage violent/tempête, neige/verglas, et incendie sont traités dans le PCS. Leur description est traitée de la même manière, un rappel sur les risques, les actions du maire en cas de déclenchement du PCS, les modalités d'alerte et le comportement de la population à adopter face à ce risque. L'alerte est globalement donnée par un véhicule d'alerte ou un message diffusé par les pompiers, radio ou télévision.

B.3.3 Organisation de l'alerte et des secours

La première partie de cette section est consacrée à l'alerte. Elle est reçue par la mairie, qui mobilise les différents acteurs de la cellule de crise (communication, logistique, travaux et économie) et déclenche le système d'alerte à la population (véhicule haut-parleur et porte-à-porte). Des fiches actions sont décrites pour aider le maire à connaître les ressources sur lesquelles il peut s'appuyer. Ces fiches servent également à évaluer la situation grâce à une

grille menaces/actions et les moyens à mettre en œuvre. Il existe aussi une fiche d'aide au raisonnement qui tire partie de la situation (type d'événement, origines, cinétique, milieu, conséquences immédiates/différées et impacts).La fiche action alerte décrit les missions et les moyens à déployer et stipule que les messages d'alerte doivent être court et précis. La fiche hébergement localise les deux centres d'hébergement de la commune avec leur capacité et moyens. Une fiche de recensement accompagne la fiche hébergement. La logistique est quant à elle définie comme support pour les autres fonctions de la cellule de crise. Elle met à disposition les moyens humains et techniques. Le secrétariat assure la main courante et l'accueil à la population. Enfin la dernière fiche liste les établissements sensibles de la commune. D'autres sont présentes mais non consultables (liste des personnes fragiles et propriétaires/éleveurs d'oiseaux).

B.3.4 Recensement des moyens

Les moyens humains sont composés de deux pompiers, et d'un médecin. Quatre agriculteurs sont également présents sur la commune. Une liste des moyens matériels est dressée, pour le transport (de marchandises) et pour le petit outillage. La même liste est dressée pour les engins de chantier à disposition au niveau de l'intercommunalité. Le bâti communal est listé. Les moyens mis à disposition pour la Poste de Commandement Communal sont listés. Sa localisation est faite sur une cartographie avec les centres d'accueil communaux.

B.4 Sinsat

Population >100 ; densité 25 hab/km^2 (2009)
Le PCS de Sinsat (Ville de Sinsat, 2004) est divisé en sept parties :
– l'objet
– le préambule
– l'état des lieux
– les risques identifiés
– le recensement des moyens matériels et humains
– l'organisation communale
– et une liste d'annexes (non consultable)

B.4.1 Objet

Cette partie fait état des rappels réglementaire.

B.4.2 Préambule

On apprend dans cette partie que la commune est sur un relief particulier, montagneux, qui engendre une difficulté supplémentaire dans la gestion d'événements de sécurité civile.

B.4.3 États des lieux

Dans cette partie, on trouve une grille d'audit permettant de connaître la maîtrise des risques, des enjeux, les moyens organisationnels et techniques ainsi que les moyens d'alerte. Grace a cet état des lieux, on relever des axes d'amélioration.

B.4.4 Risques identifiés

On dénombre 5 risques naturels présents sur la commune, 3 risques technologiques, 1 risque épidémiologique et 2 risques sanitaires. Chacun de ces risques sont décrits, avec les mesures prises par la commune.

B.4.5 Recensement des moyens matériels et humain

Une liste du petit matériel de la commune et des engins privés (mis à disposition) est dressée. Les capacités d'hébergement et lieux de stockage des denrées sont indexées. Enfin les moyens humains sont listés.

B.4.6 Organisation communale

L'organisation communale décrite permet de gérer le sinistre en alertant et informant la population et l'évacuer si besoin est.

Les moyens d'alerte y sont décrits, et composés d'une sirène industrielle et de message d'alerte diffusé par radio, mégaphone (prévu), cloche de l'église...

L'organisation est divisée en deux, une cellule de commandement et une cellule terrain. Le Poste de Commandement Communal est situé à la mairie. Un organigramme cellule/responsable, mission, outils et décrit, il permet de bien visualiser pour chacun des responsable, leur mission et les moyens à disposition pour y parvenir.

La dernière partie est réservée au comportement de la population en cas de déclenchement du PCS.

Annexe C

Pistes de réflexion sur la prise en compte de la notion temporelle dans la modélisation FIS

C.1 Spécification informatiques de la fonction pour la prise en compte du temps

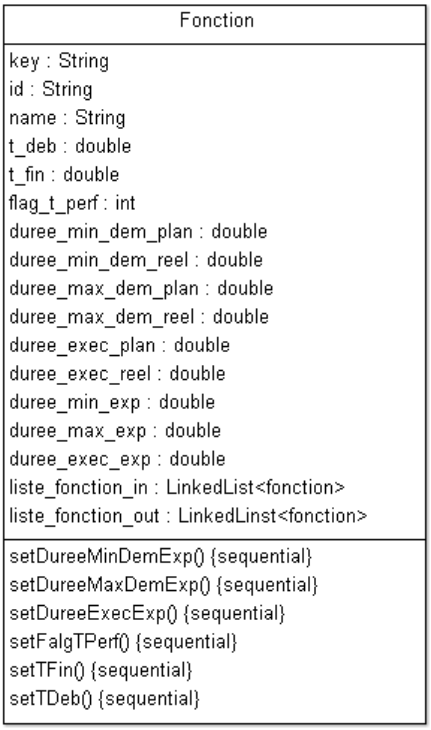


FIGURE C.1 – Diagramme de classe pour une fonction, avec prise en compte du temps

C.2 Proposition d'intégration à la modélisation FIS

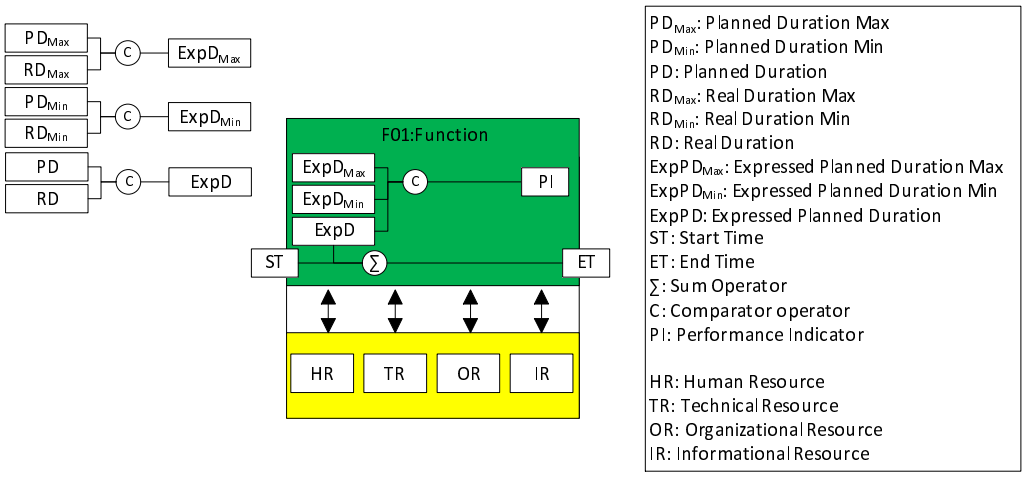


FIGURE C.2 – Intégration de la prise en compte du temps à la modélisation FIS

C.3 Représentation sous forme d'arbres pour une défaillance fonctionnelle

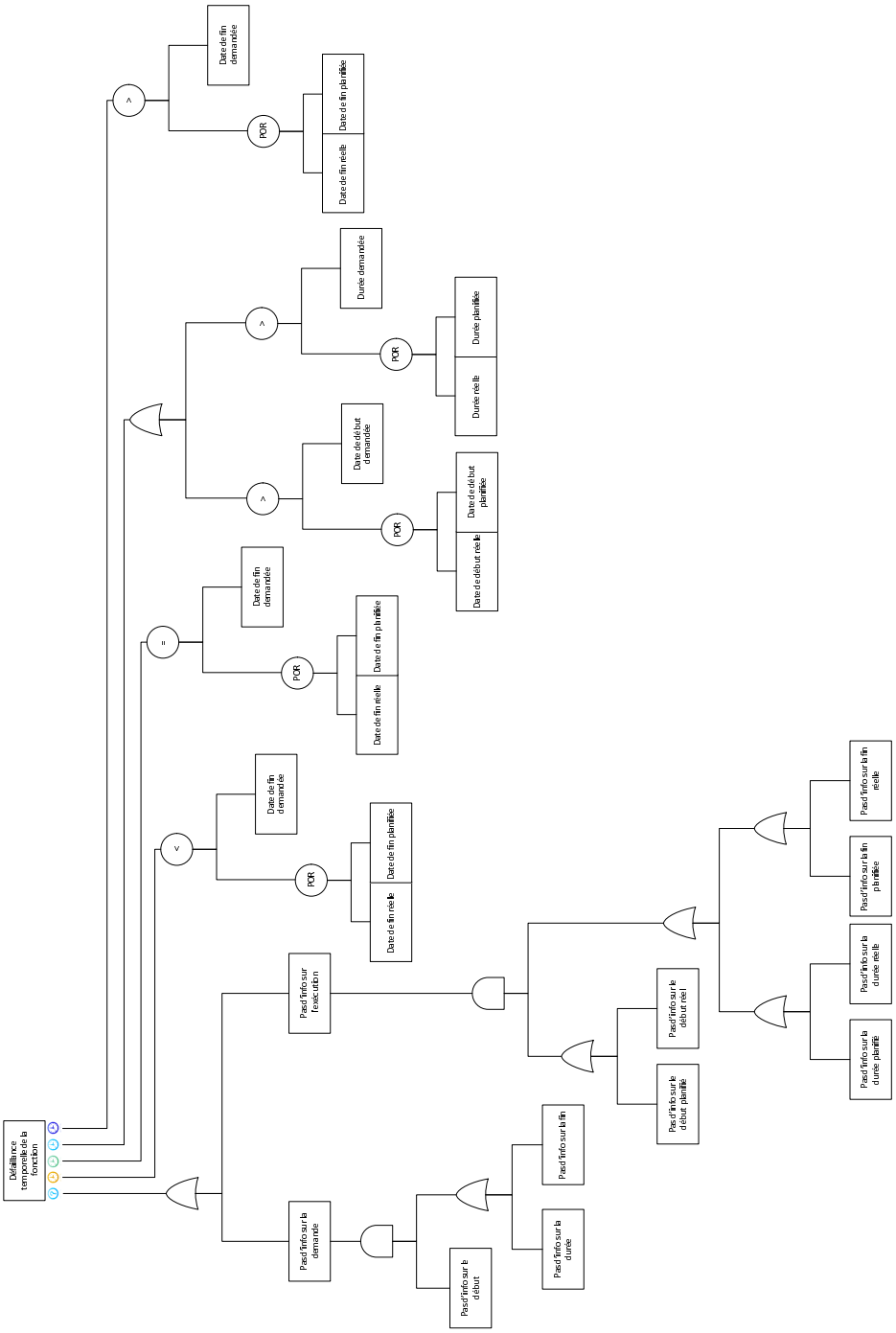


FIGURE C.3 – Arbre de défaillance amélioré, prenant en compte les aspects de défaillance temporelle

C.4 Application

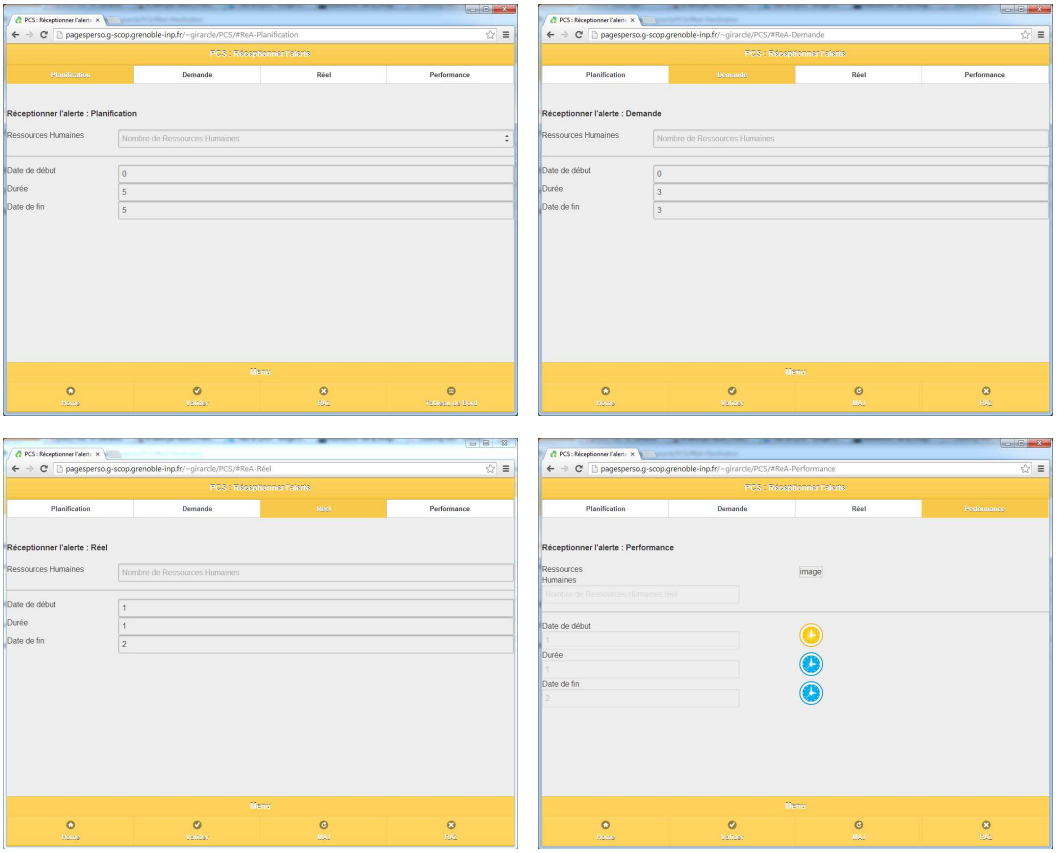


FIGURE C.4 – Application web de la prise en compte des défaillances temporelles

Annexe D

Arbres de défaillance génériques pour des défaillances en deça et au-delà des objectifs de fonction

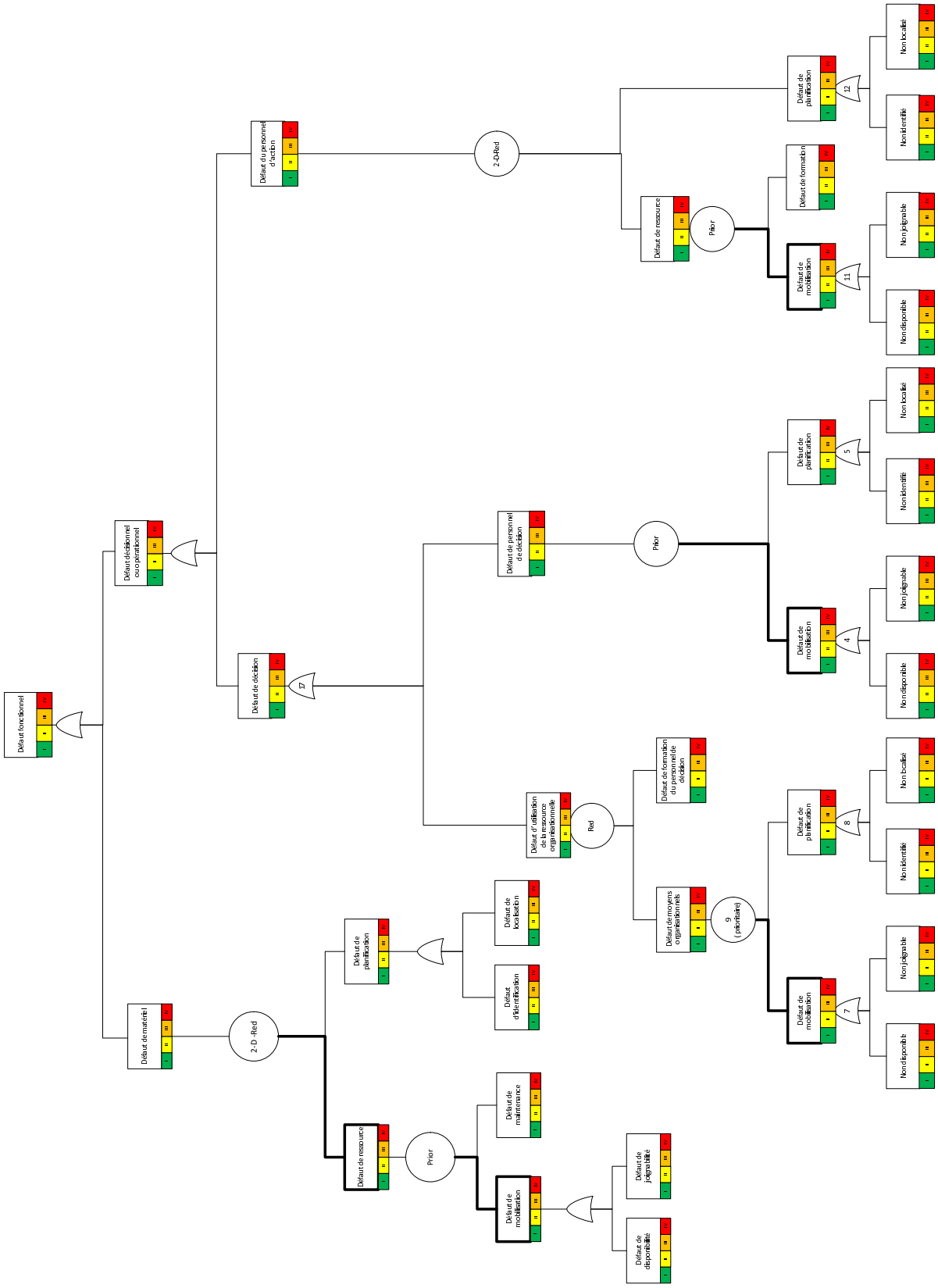


FIGURE D.1 – Arbre de défaillance générique pour une défaillance fonctionnel en deça des objectif de fonction

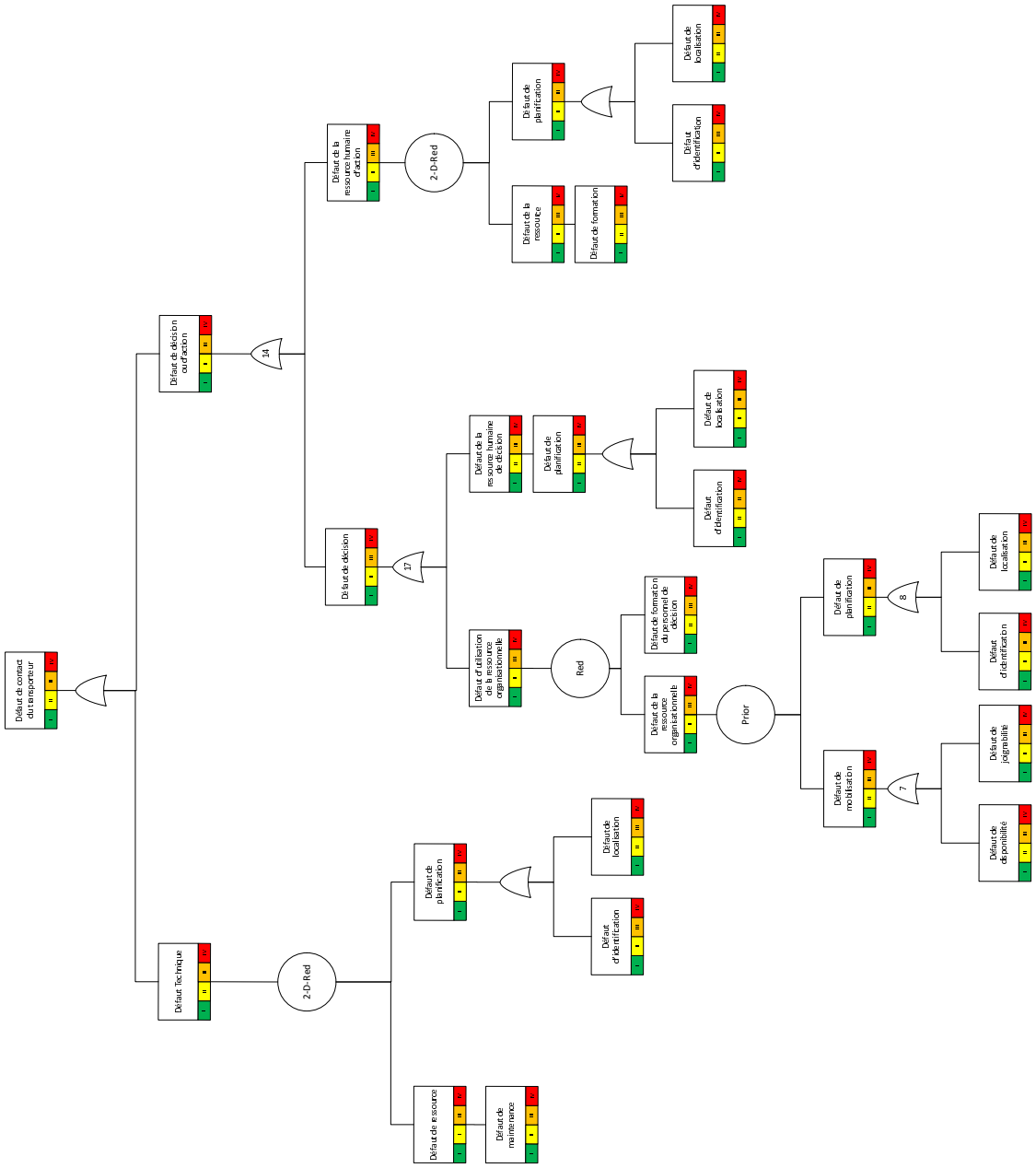


FIGURE D.2 – Arbre de défaillance générique pour une défaillance fonctionnel au delà des objectif de fonction

Annexe E

Adaptation des arbres de défaillance pour le cas d'étude

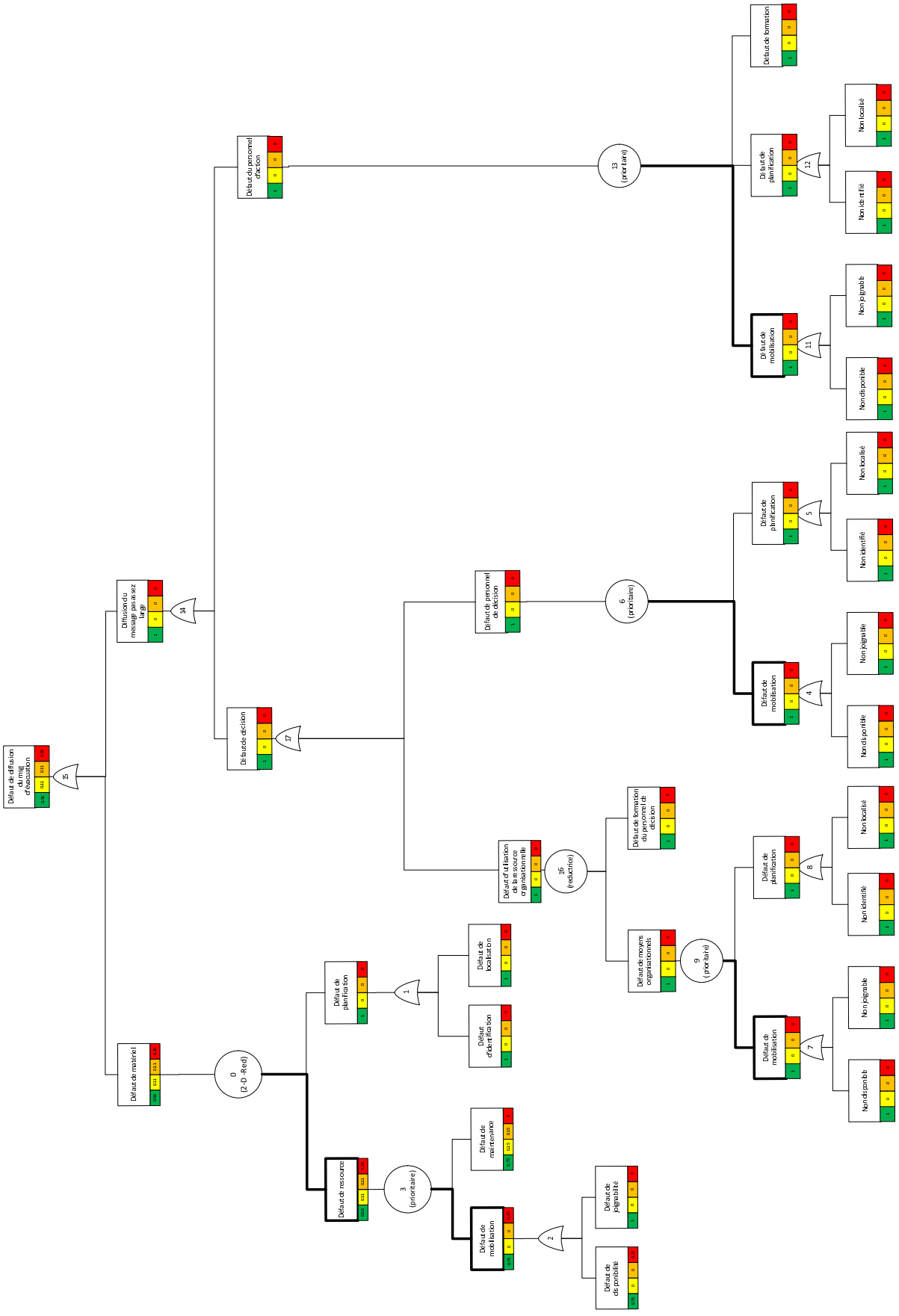


FIGURE E.1 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de diffusion du message d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

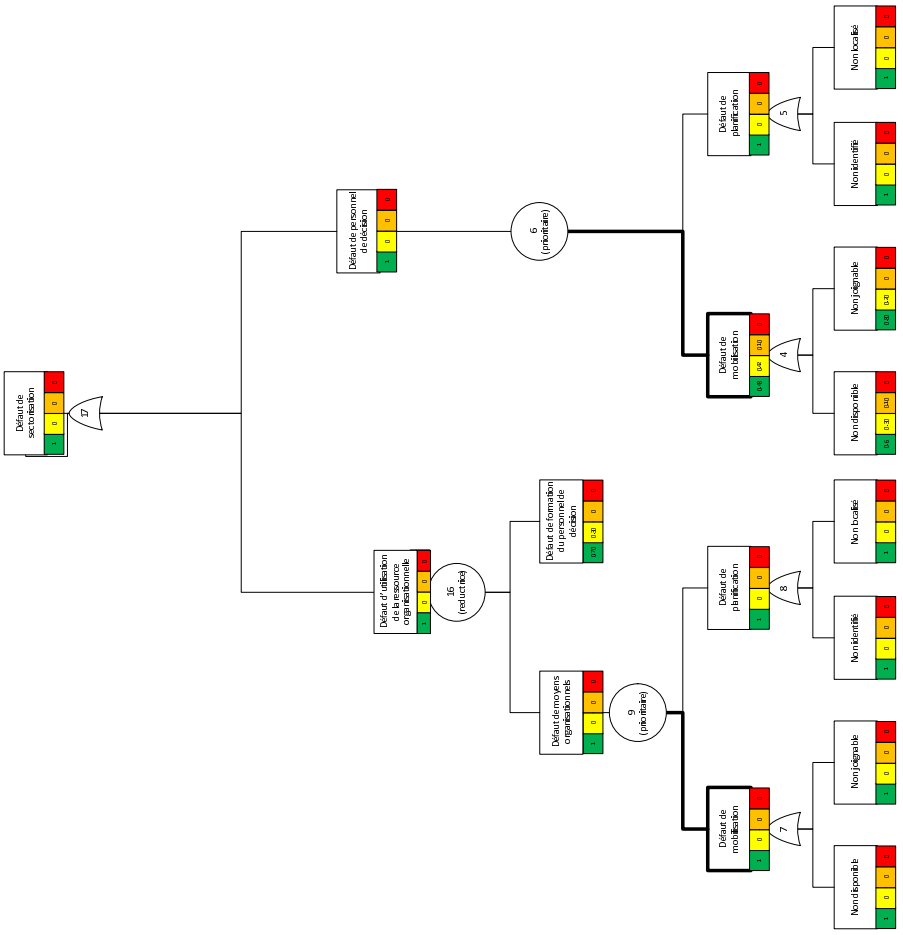


FIGURE E.2 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de sectorisation des zones à évacuer de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

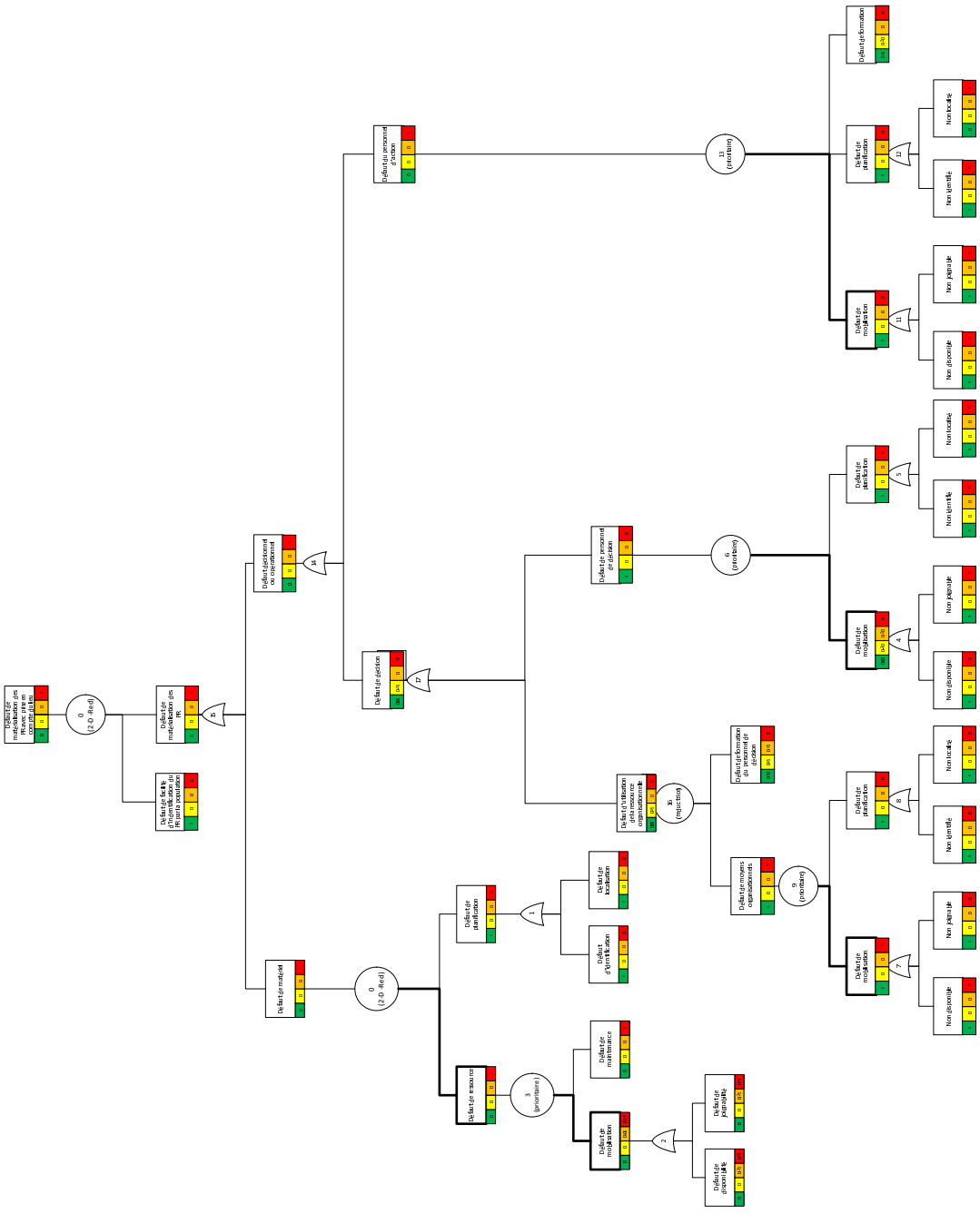


FIGURE E.3 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de matérialisation des points de rassemblement de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

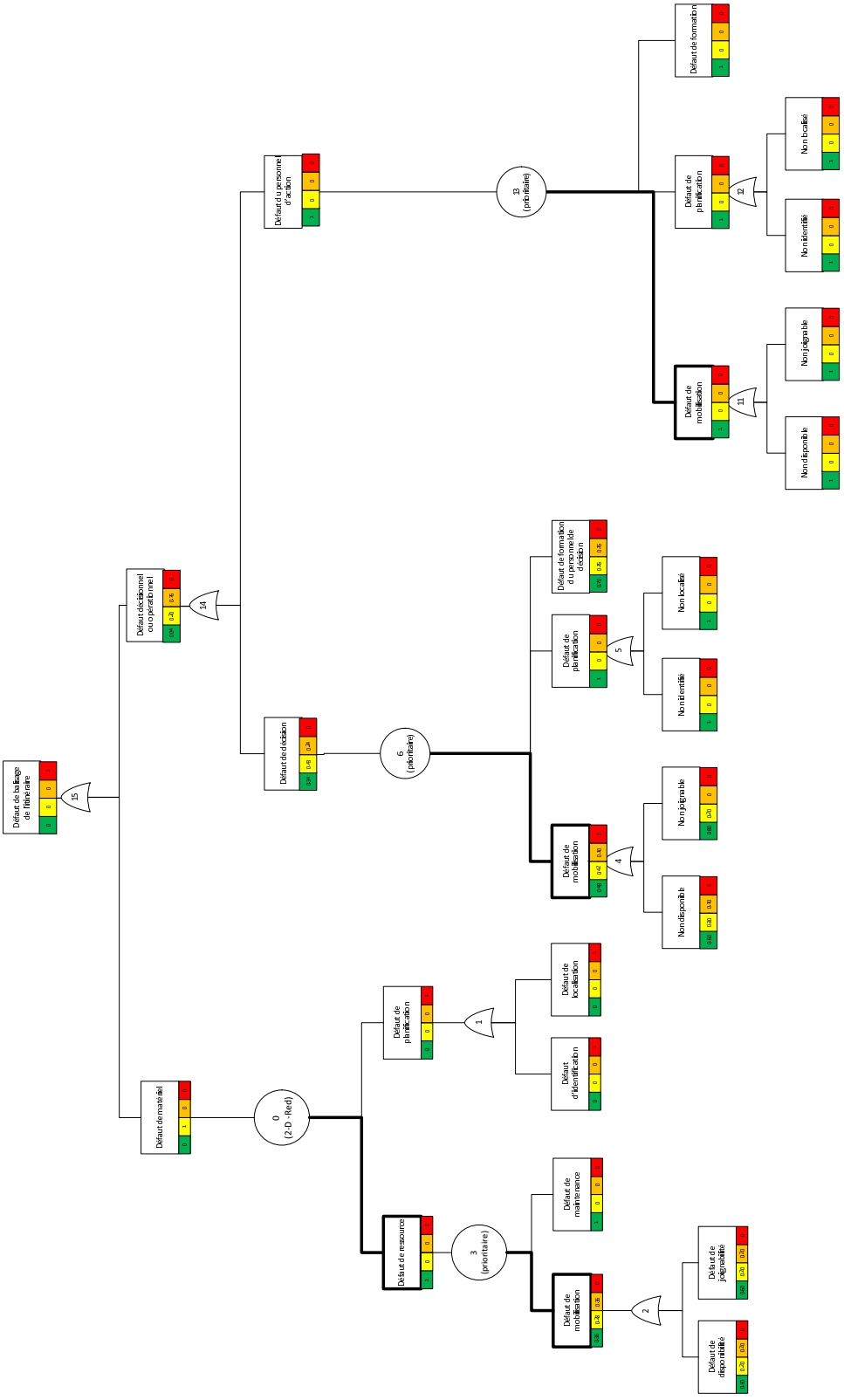


FIGURE E.4 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de balisage de l'itinéraire d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

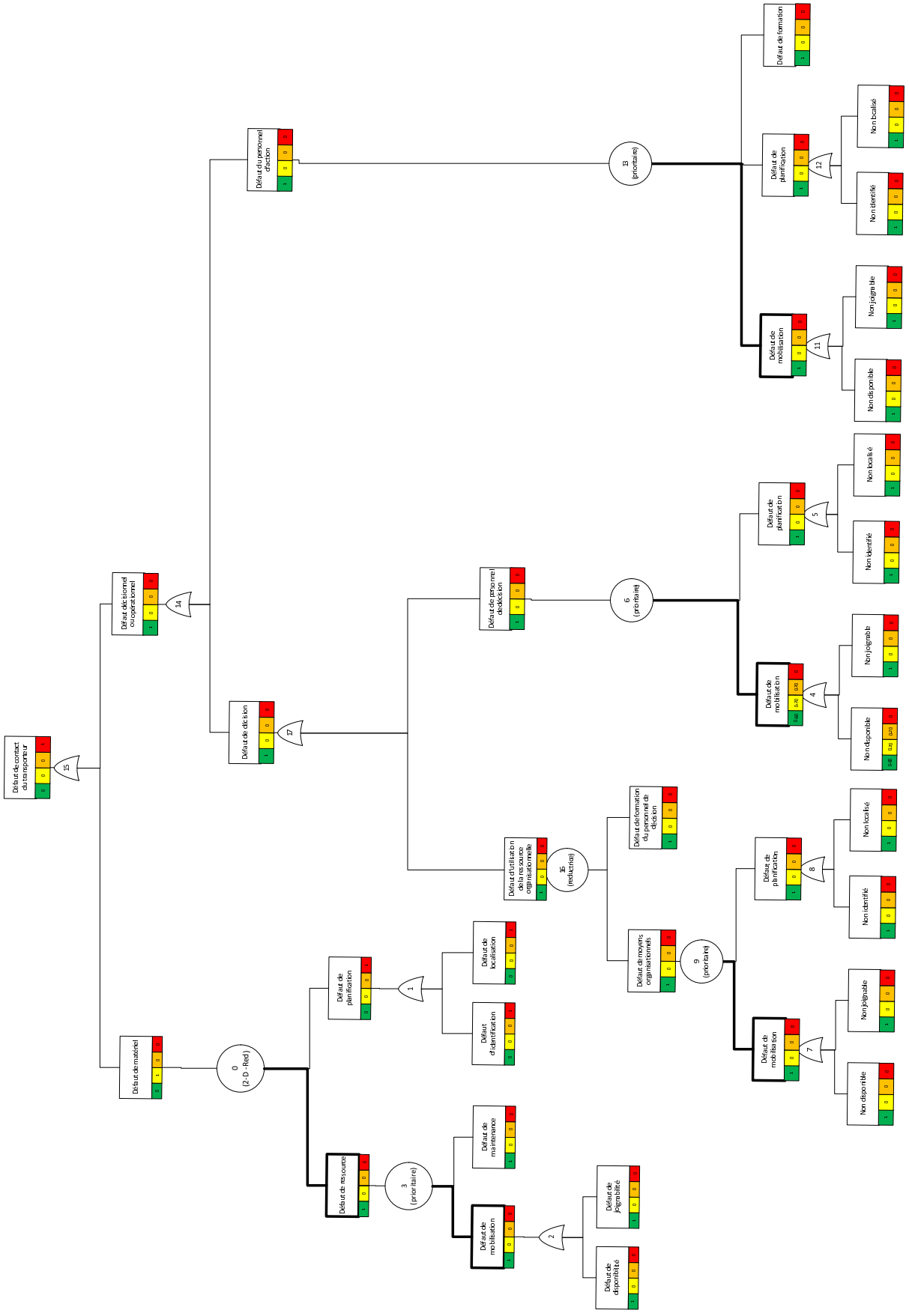


FIGURE E.5 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de contatct du transporteur de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

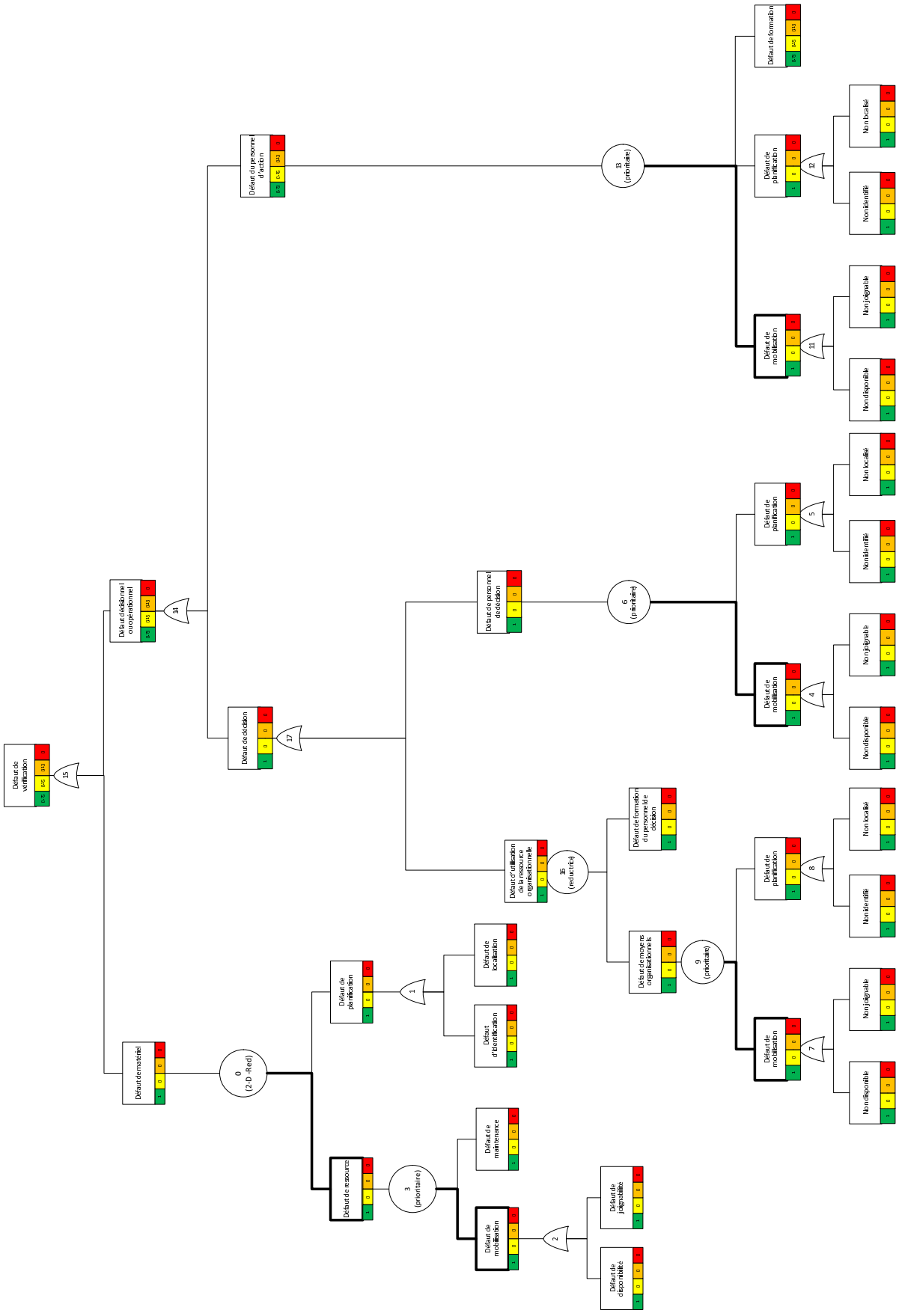


FIGURE E.6 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de vérification des personnes à l'embarquement de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

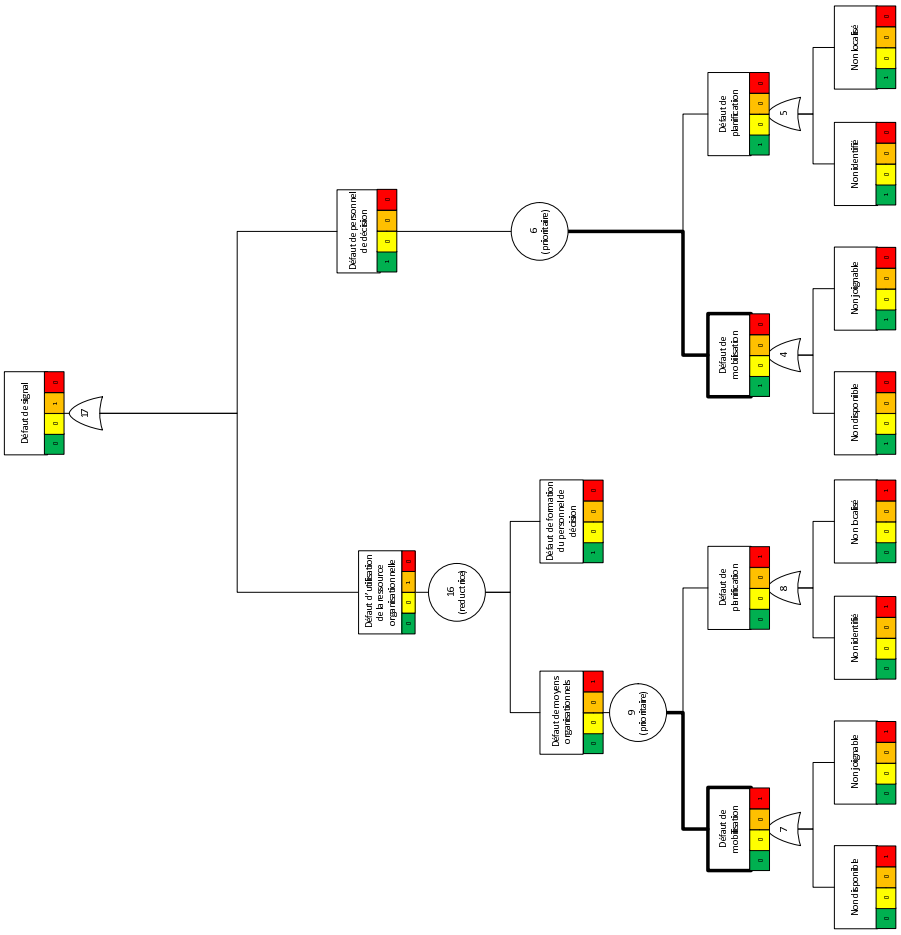


FIGURE E.7 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de signal d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

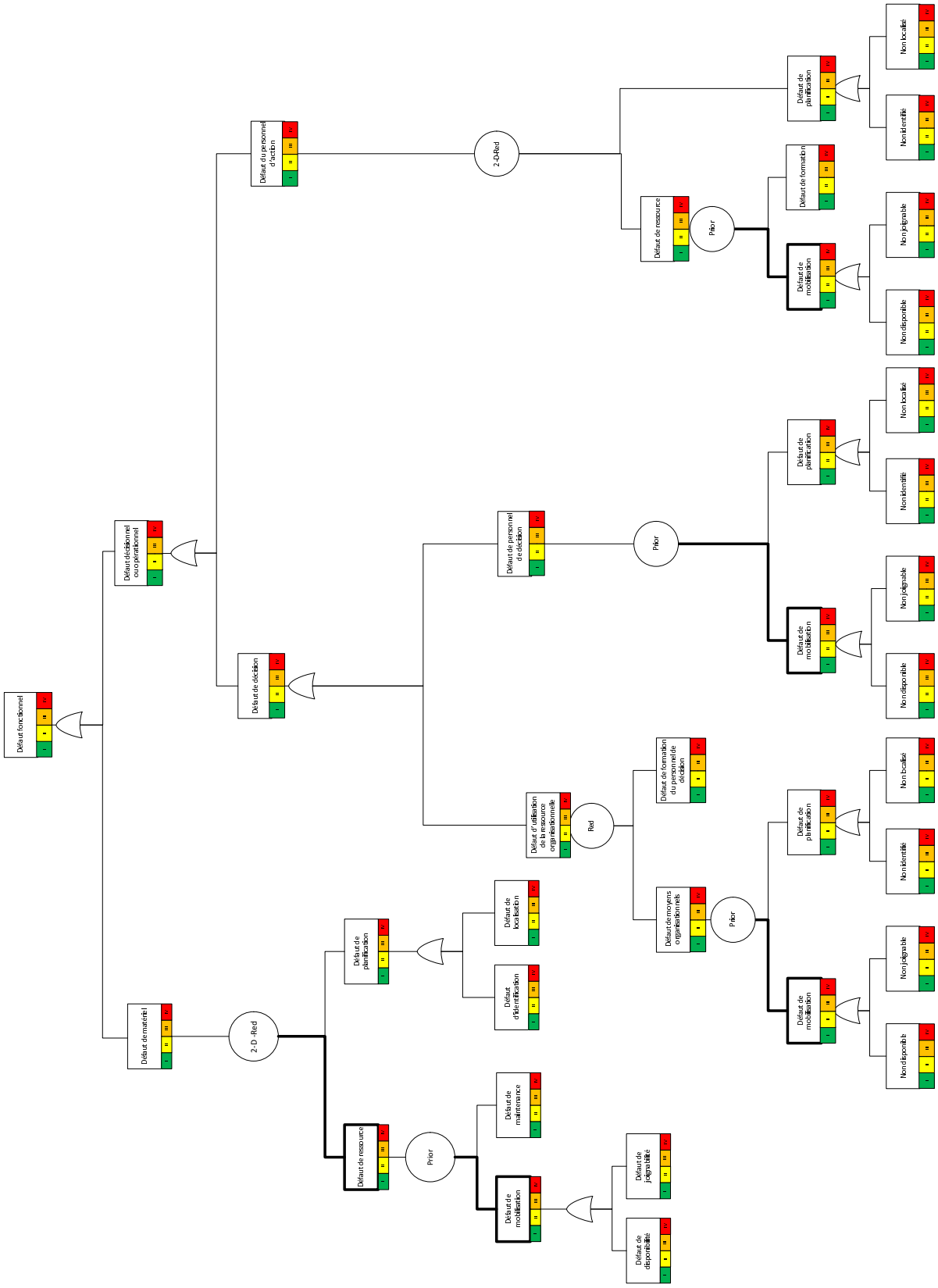


FIGURE E.8 – Arbre de défaillance pour l'événement fonctionnel population évacuée < population à évacuer

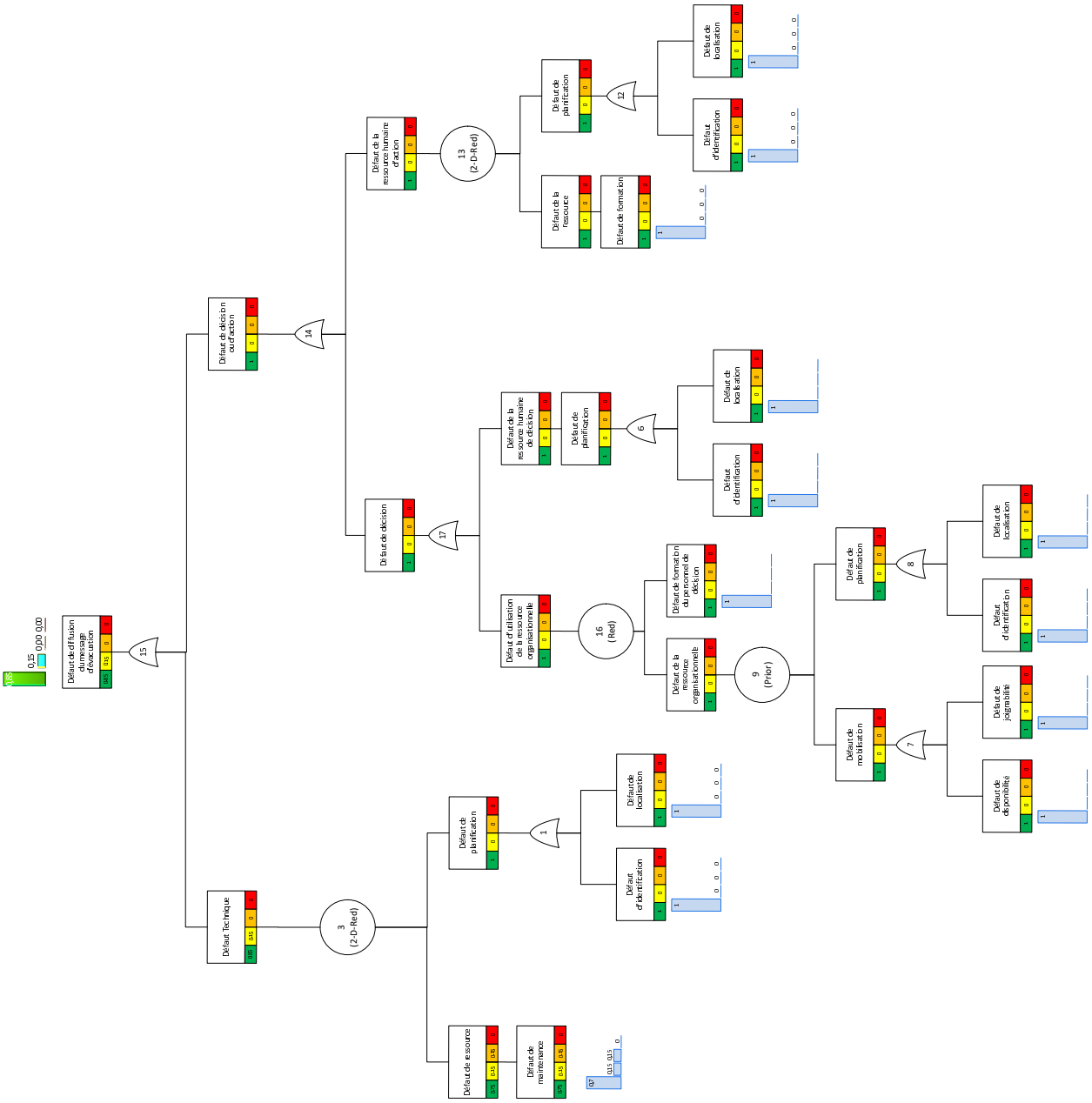


FIGURE E.9 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de diffusion du message d'évacuation de l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

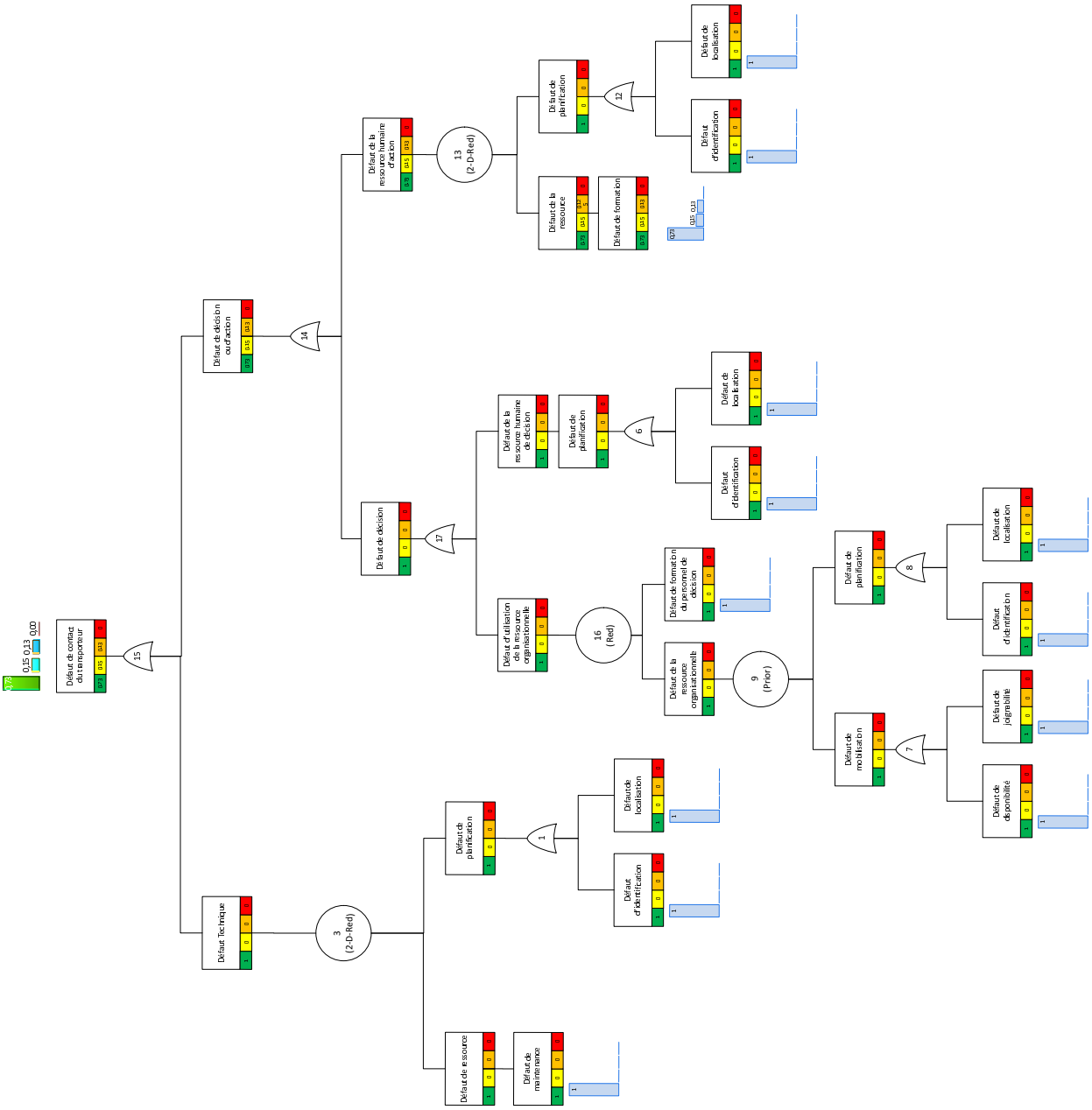


FIGURE E.10 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de vérification de l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

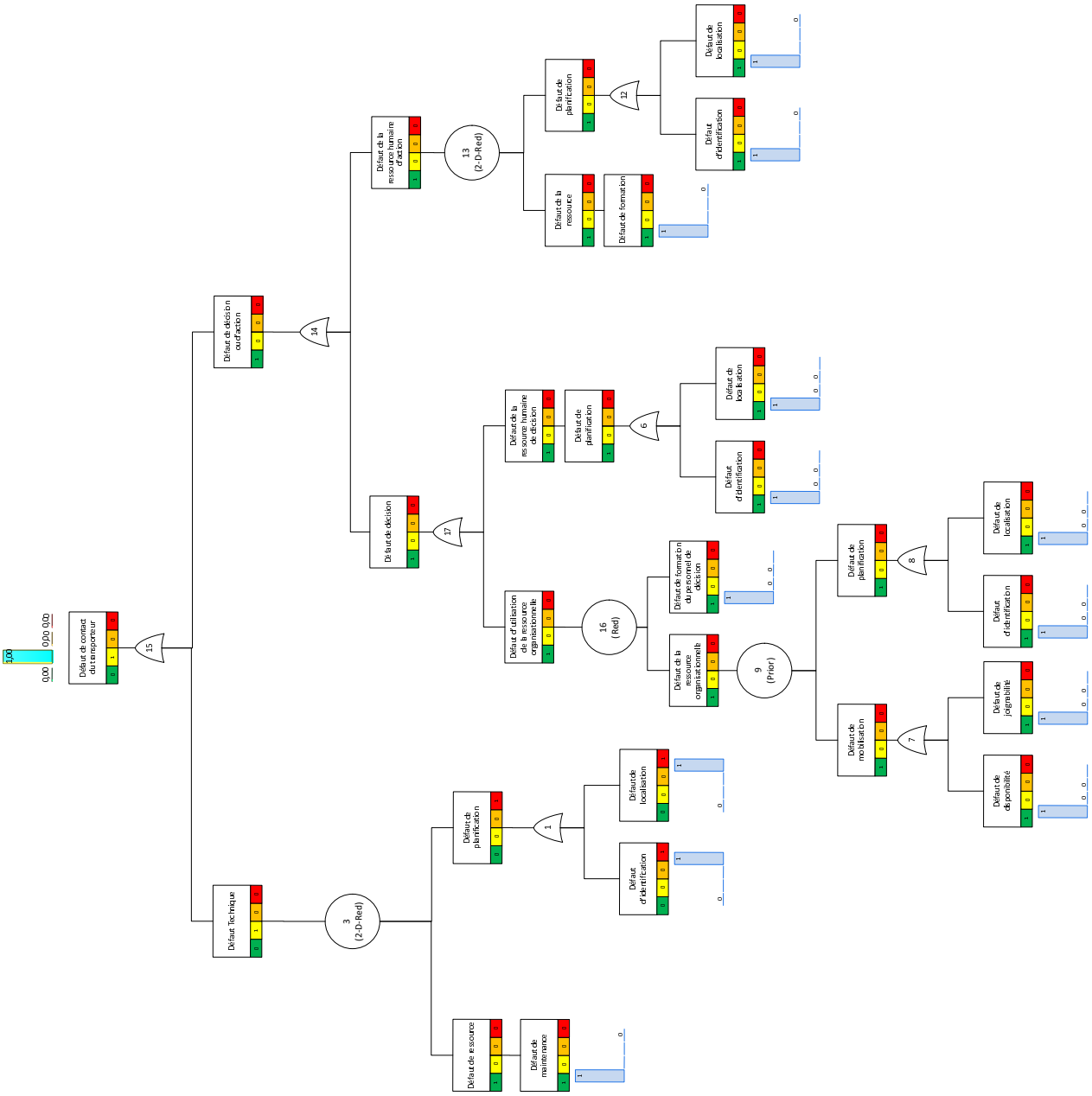


FIGURE E.11 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de contact du transporteur de l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

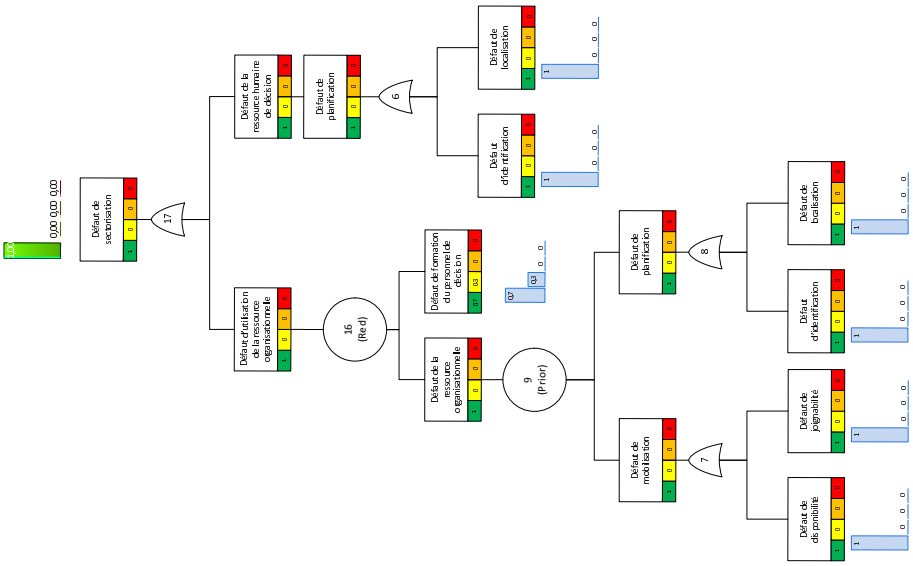


FIGURE E.12 – Arbre de défaillance pour l'événement défaut de sectorisation de l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

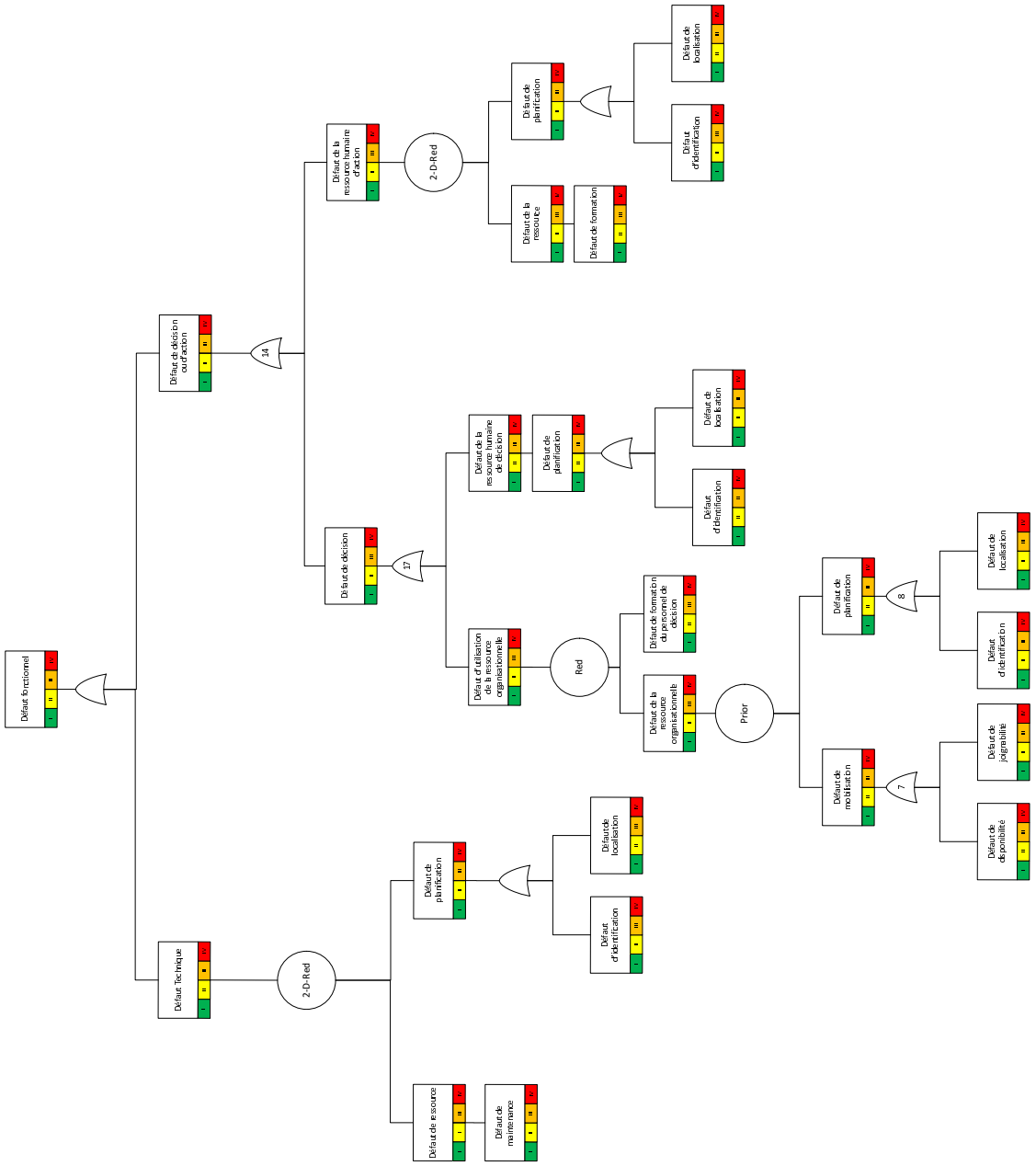


FIGURE E.13 – Arbre de défaillance pour l'événement fonctionnel population évacuée inutilement

Annexe F

Rapport d'étude sur l'évaluation de la fonction d'évacuation du PCS à l'étude

Résultats préliminaires

Particularités : deux scénarios ont été considérés pour ces résultats : le scénario inondation et le scénario feu de forêt. La mission d'évacuation étant observée selon un déroulement quel que soit l'événement, une moyenne des observations pour chaque résultat a été appliquée.

La présentation des résultats est donnée de la manière suivante :

Les particularités de l'organisation communale de la ville en temps de gestion d'événement de sécurité civile sont données. Puis une appropriation des éléments du modèle générique pour l'évaluation des PCS est faite. Dans un troisième temps, les résultats du questionnaire pour l'évaluation des PCS sont présentés. Le questionnaire a été réalisé sur la mise en œuvre de la fonction d'évacuation. Le tableau de bord de cette fonction est présenté selon les résultats du questionnaire. Une investigation des événements les plus critiques est menée. Il sont présentés selon leur ordre de priorité de traitement. Un récapitulatif de l'ensemble de ces données est proposé et des pistes d'actions correctives sont proposées.

Enfin, une analyse temporelle de la fonction d'évacuation, sous forme de diagramme de Gantt est donnée dans la dernière partie de ce rapport.

Particularités de l'organisation communale

Deux particularités sont à noter dans ce cas d'étude. L'organisation de gestion d'événement décrite par le PCS de la ville utilise des lieux publics comme points de rassemblement lors de l'évacuation. Ces lieux publics font également office de centre d'hébergement d'urgence. Dans ce cas, points de rassemblement et centre d'hébergement d'urgence sont confondus. La seconde particularité est qu'il n'existe pas de cellule responsable de l'évacuation. Les missions de l'évacuation étant assurées par la coordination des autres cellules. La cellule coordination est donc le chef d'orchestre de l'évacuation.

Données d'entrée du modèle de la fonction d'évacuation pour le cas de la ville

Ressource	**Fonction**
Ordre d'évacuation Cartes, scénarios Cellule Coordination et DOS (PCC) Info zone à évacuer	Sectoriser les zones à évacuer (Décision)
Info zone à évacuer Cartes, scénarios Cellule Coordination et DOS (PCC) Localisation des PR et Ordre de mise en place	Définir les points de rassemblement (Décision)
Ordre de mise en place Panneaux, marquage. . . Cellule Accueil (PCC) Info PR en place et PR en place	Mettre en place les points de rassemblement (Action)
Info zone à évacuer et PR en place Cellule Coordination et DOS (PCC) Cartes des itinéraires et Ordre de balisage	Identifier des itinéraires d'évacuation (Décision)
Ordre de balisage Itinéraire, panneaux, marquage. . . Cellule Technique et Sécurité Info PR en place et PR en place	Assurer le balisage de l'itinéraire (Action)
Localisation des PR et Cartes des itinéraires Liste des transporteurs, scénarios Cellule Coordination et Logistique (PCC) Ordre de contacter le transporteur	Identifier les moyens de transport (Décision)
Ordre de contacter le transporteur Moyens de communications Cellule Logistique Information de mobilisation (avec PR + itinéraire) et Info contact effectué	Contacter transporteur (Action)
Info zone à évacuer et Info PR en place et Info balisage en place et Info contacte transporteur Procédure de diffusion des messages d'évacuation	Ordonner la diffusion du message d'évacuation (Décision)

DOS (PCC) Ordre de diffusion du message d'évacuation	
Ordre de diffusion du message d'évacuation Sirène et automate d'appel Cellule Coordination et DOS Info diffusion et message diffusé	Assurer de la diffusion du message d'évacuation (Action)
Info message diffusé Procédure de déclenchement du recensement Cellule Coordination et DOS (PCC) Ordre de recensement	Ordonner le recensement (Décision)
Ordre de recensement Feuille de comptage Cellule Accueil et Hébergement Info population au PR	Recenser les personnes au PR (Action)
Info recensement Cellule Coordination et DOS (PCC) Ordre d'évacuation	Ordonner l'évacuation (Décision)

Justification des réponses de l'audit

Sectoriser les zones à évacuer					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Cartes, scénarios)	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,3	0,1	0
	Le personnel est-il joignable ?	0,8	0,2		
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,3		

Définir les points de rassemblement					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Cartes, scénarios)	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,15	0,15	

Mettre en place les points de rassemblement|balisage pancarte					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Moyens techniques (Panneaux, marquage)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?			0,25	0,75
	La ressource est-elle joignable ?			0,25	0,75
	La ressource est-elle maintenue ?	0			1
Personnels d'action (Cellule évacuation terrain)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?				1
	Le personnel est-il formé ?	0,8	0,2		

Identifier des itinéraires d'évacuation					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Cartes, scénarios)	La ressource est-elle disponible ?	0,25	0,25	0,25	0,25
	La ressource est-elle joignable ?	0,25	0,25	0,25	0,25
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	0,25	0,25	0,25	0,25
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	0,25	0,25	0,25	0,25
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,3	0,1	
	Le personnel est-il joignable ?	0,8	0,2		
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,7	0,15	0,15	

Assurer le balisage de l'itinéraire					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Moyens techniques (Itinéraire, panneaux, marquage)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle disponible ?	0,6	0,2	0,2	
	La ressource est-elle joignable ?	0,6	0,2	0,2	
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Personnels d'action (Cellule évacuation terrain)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Mobiliser les moyens de transport					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Liste des transporteurs)	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	0,6	0,2	0,2	
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Contacter transporteur					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Moyens techniques (Moyens de communication)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?				1
	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Personnels d'action (Cellule évacuation terrain)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Ordonner la diffusion du pré-message et le message d'évacuation					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Procédure de diffusion du message)	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Assurer la diffusion du pré-message et du message d'évacuation					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Moyens techniques (Sirène, Automate)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?	0,75			0,25
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	0,7	0,15	0,15	
Personnels d'action (Cellule évacuation terrain)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

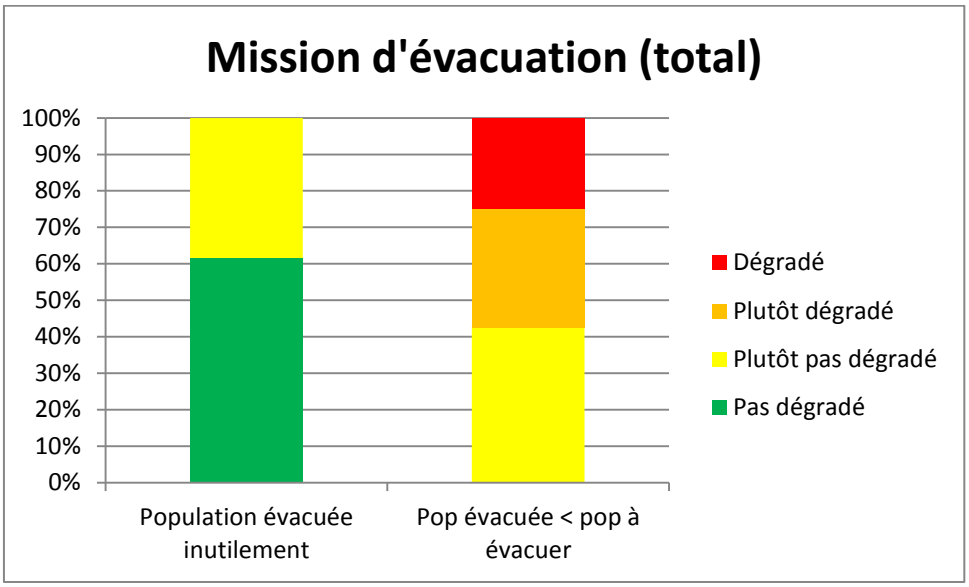
Ordonner le recensement					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Procédure de déclenchement du recensement)	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

Recense les personnes au PR					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
Moyens techniques (Moyens de comptage)	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	1			
	La ressource est-elle disponible ?	1			
	La ressource est-elle joignable ?	1			
	La ressource est-elle maintenue ?	1			
Personnels d'action (Cellule évacuation terrain)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	0,725	0,15	0,125	

Ordonner l'évacuation					
id ressource		Niv. I	Niv. II	Niv. III	Niv. IV
moyens organisationnels (Cartes, scénarios)	La ressource est-elle disponible ?	0	0	0	1
	La ressource est-elle joignable ?	0	0	0	1
	La ressource est-elle identifiée dans le plan ?	0	0	0	1
	La ressource est-elle localisée dans le plan ?	0	0	0	1
Personnels de décision (Cellule évacuation PCC)	Le personnel est-il disponible ?	1			
	Le personnel est-il joignable ?	1			
	Le personnel est-il identifié dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il localisé dans le plan ?	1			
	Le personnel est-il formé ?	1			

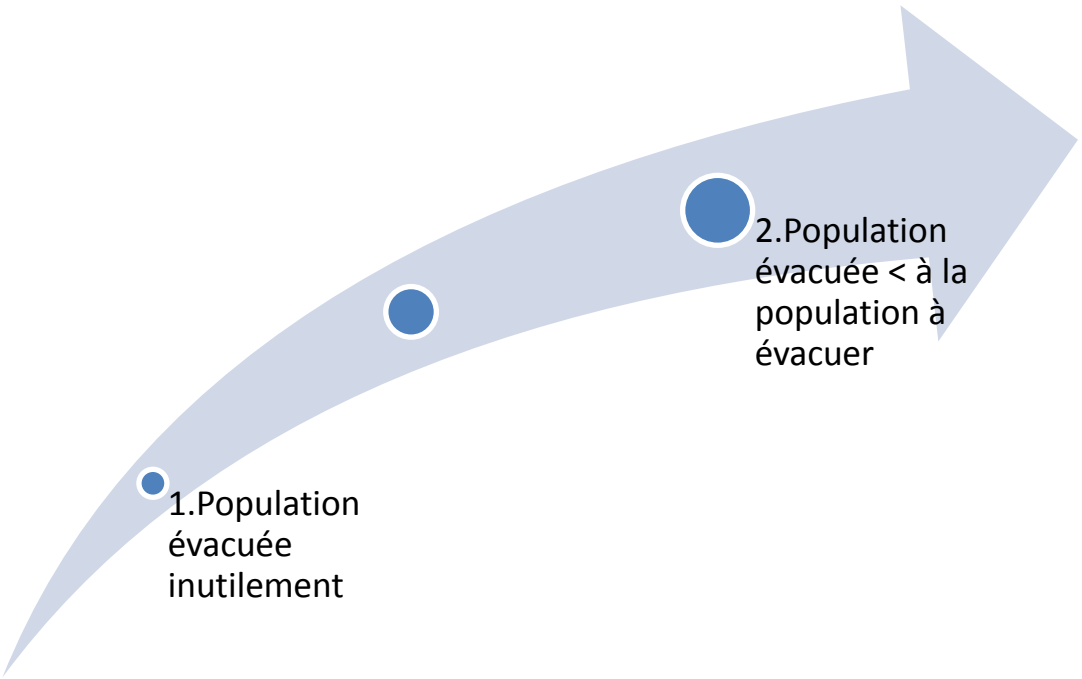
État de la mission d'évacuation

Tableau de bord

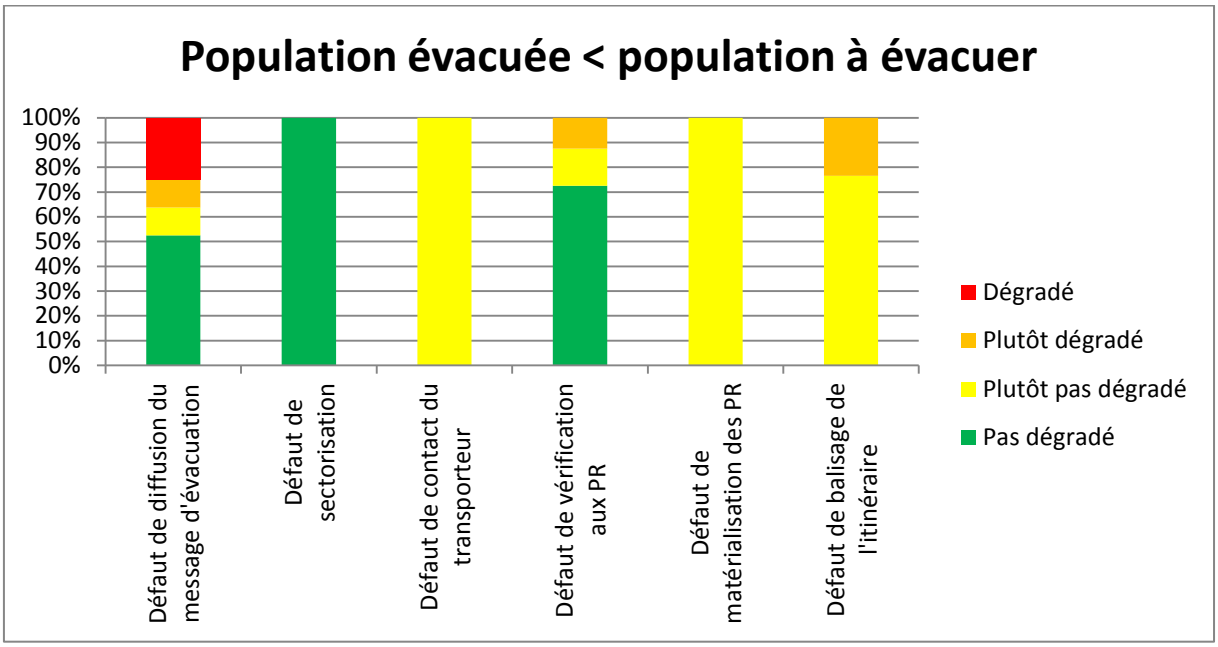


1. **Population évacuée inutilement :** Au vue des réponses apportées, il ne semble pas que cette perturbation produise d'effets significatifs sur la mission d'évacuation.
2. **Population évacuée < à la population à évacuer :** Les causes de ce résultats seront discutés dans les prochains paragraphes.

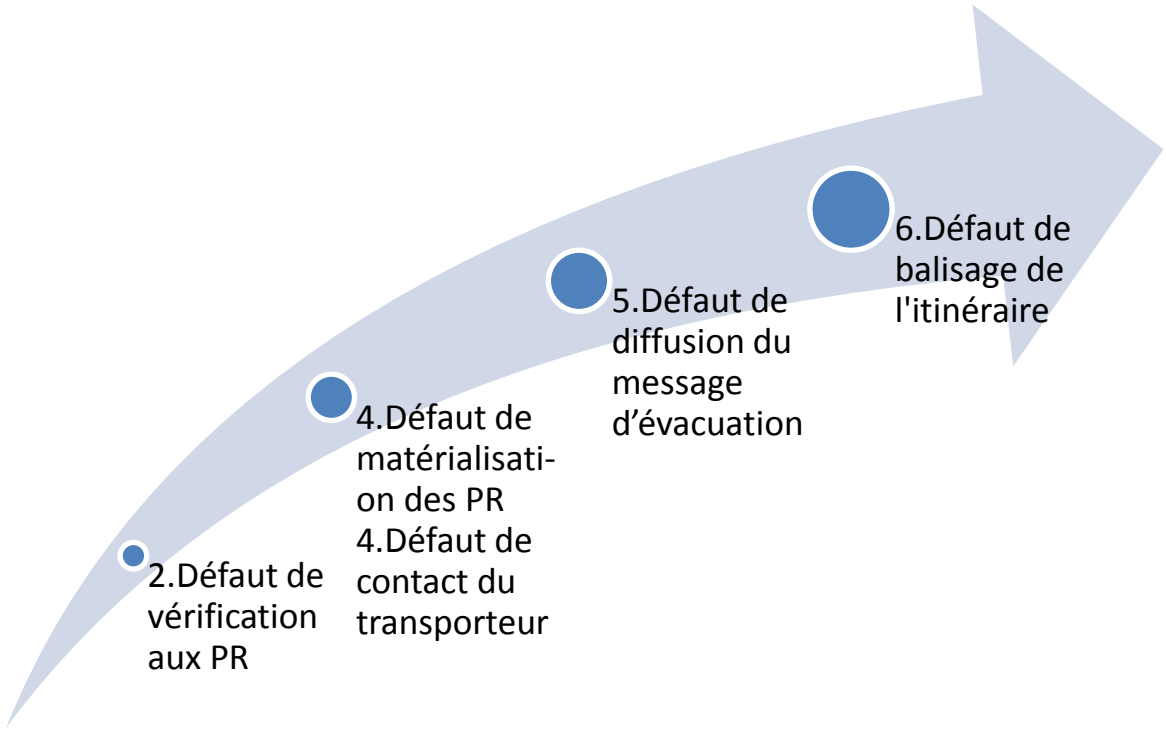
Priorité



Causes de l'événement population évacuée < population à évacuer : Recherche de sous-fonctions critiques

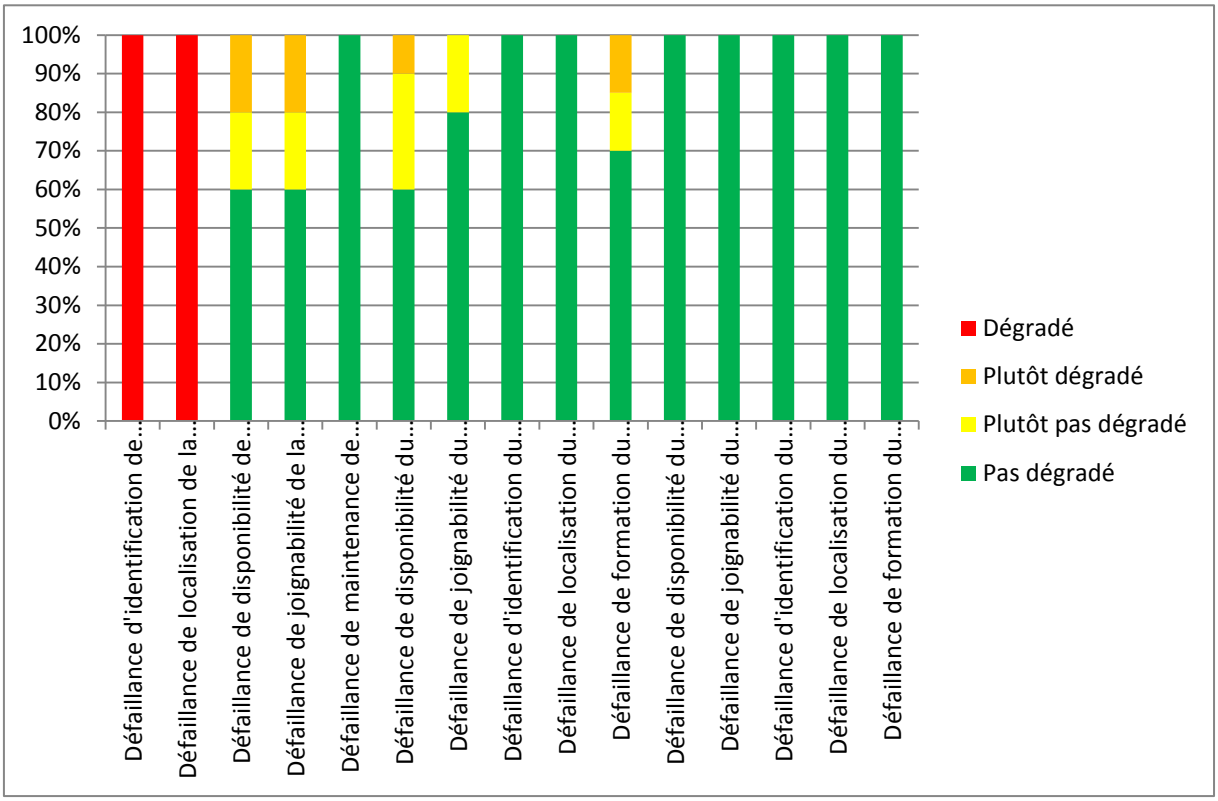


Priorité

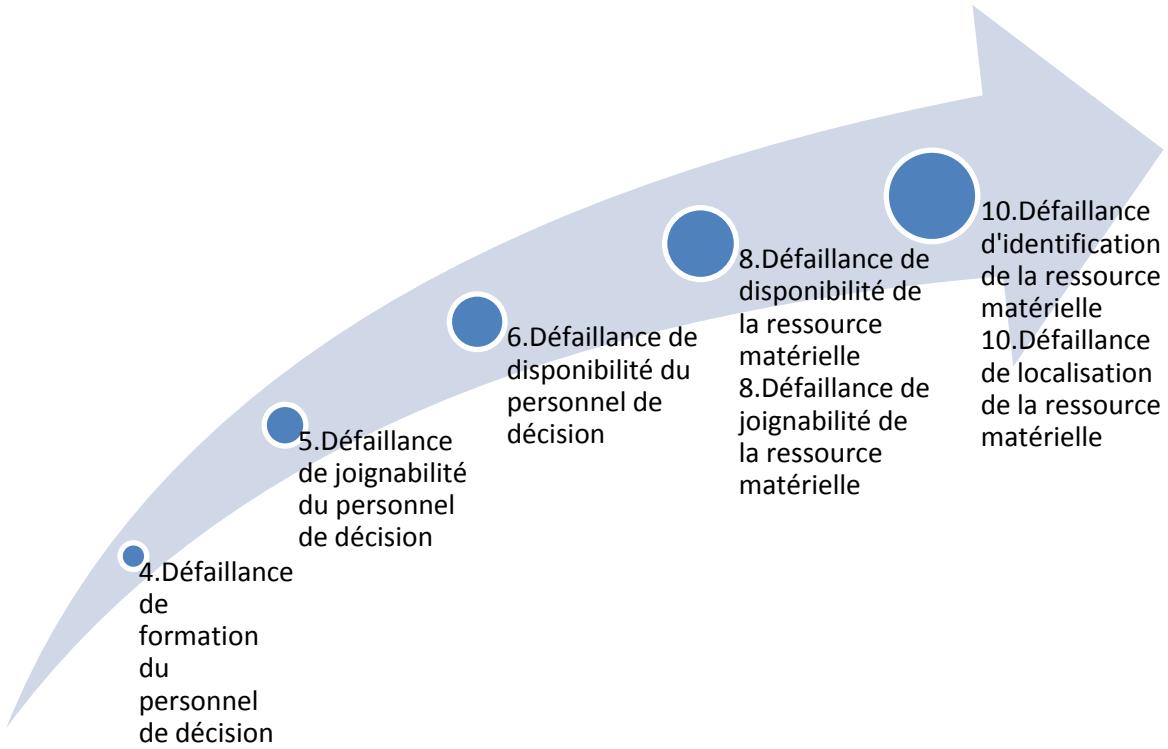


Sur cette figure, uniquement les événements dont l'ensemble de l'évaluation est différent de l'état de fonctionnement complet sont représentés. Les événements priorisés de 2 à 6 seront investigués dans la suite du document

Défaut de balisage

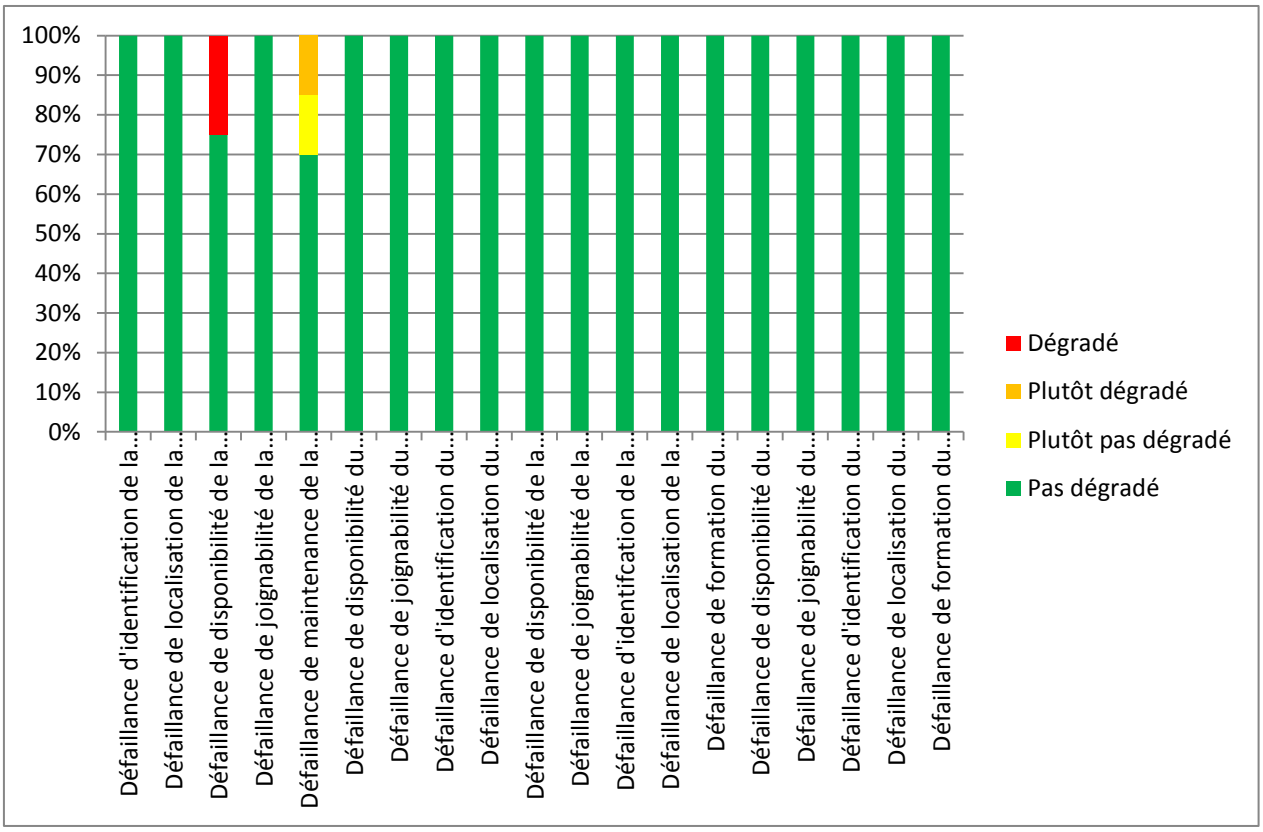


Priorité

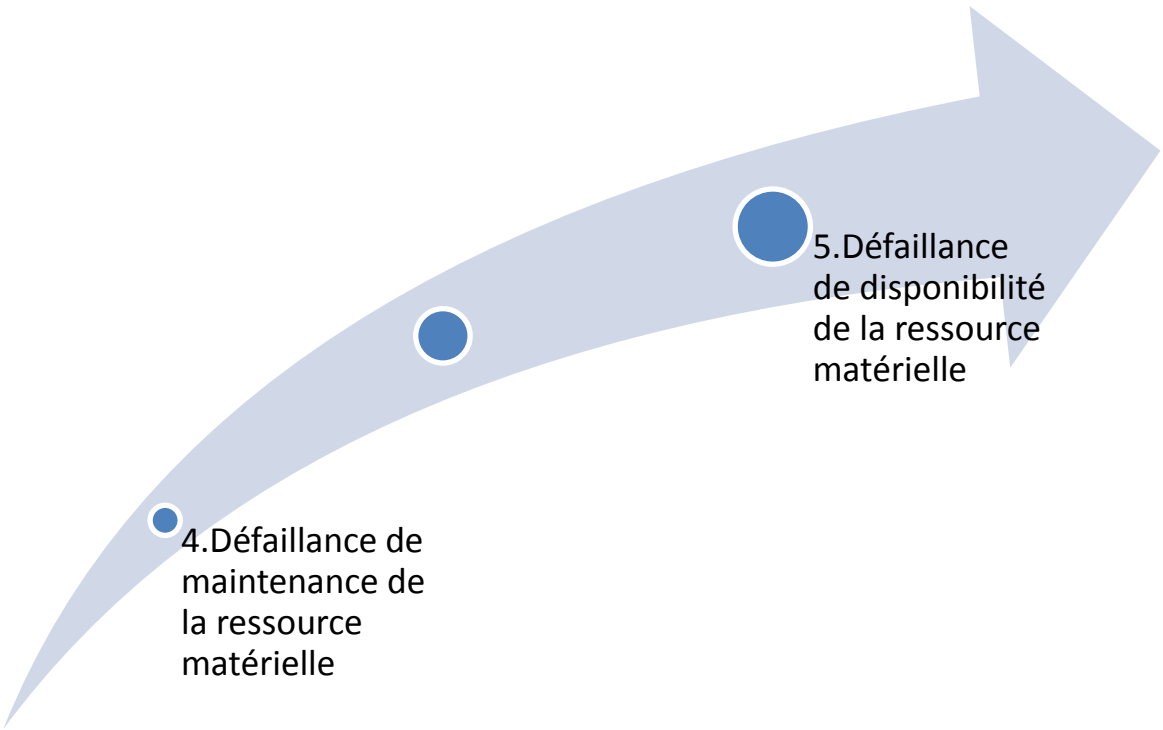


Sur cette figure, uniquement les événements dont l'ensemble de l'évaluation est différent de l'état de fonctionnement complet sont représentés.

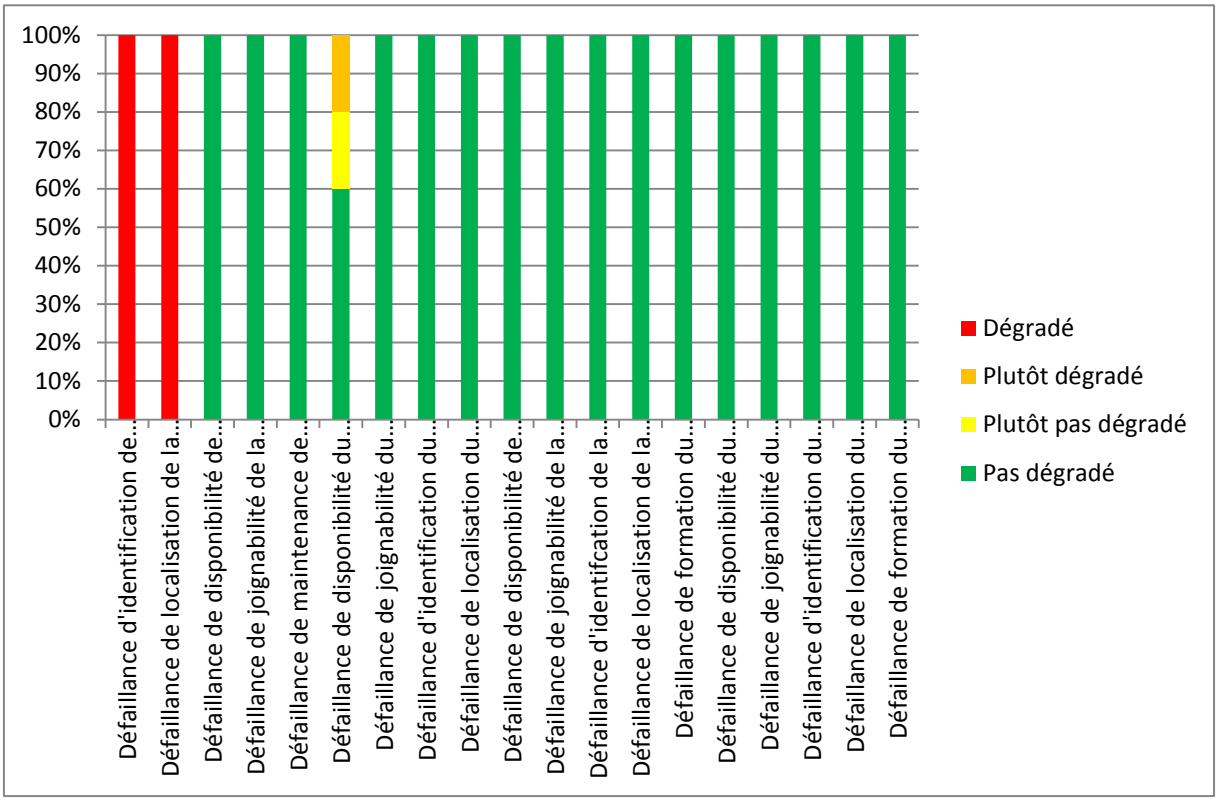
Défaut de diffusion du message d'évacuation



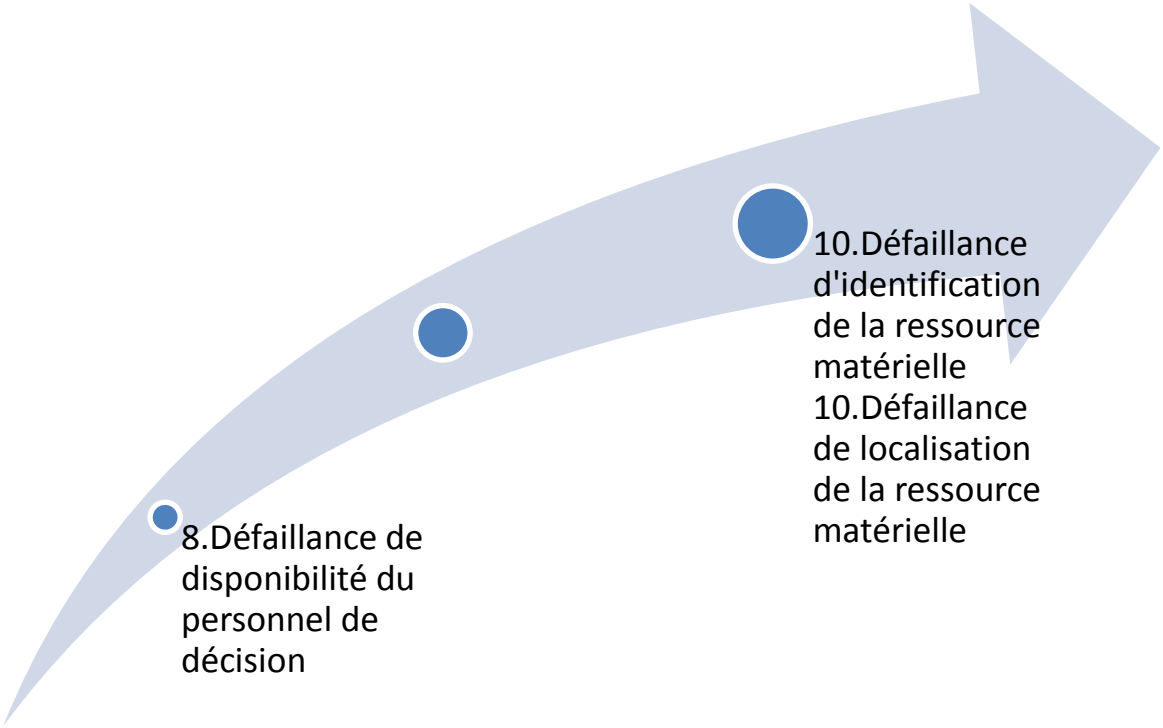
Priorité



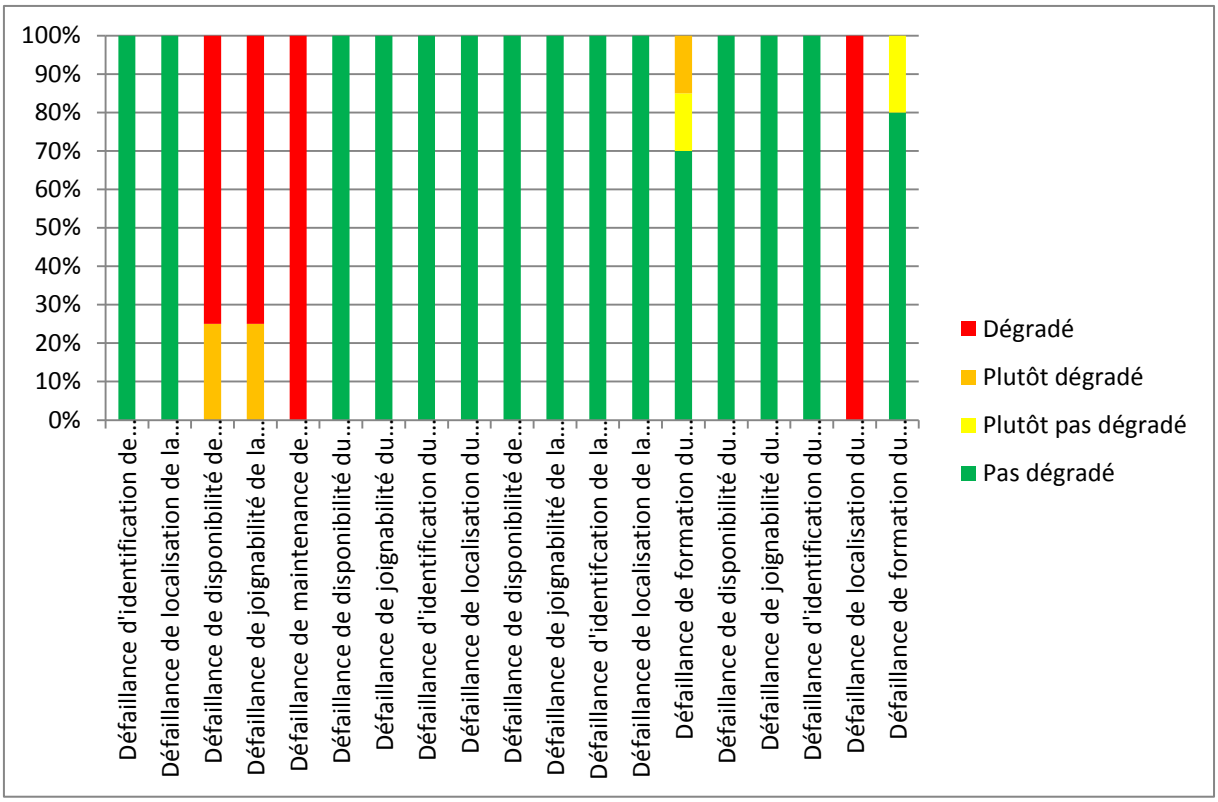
Défaut de contact du transporteur



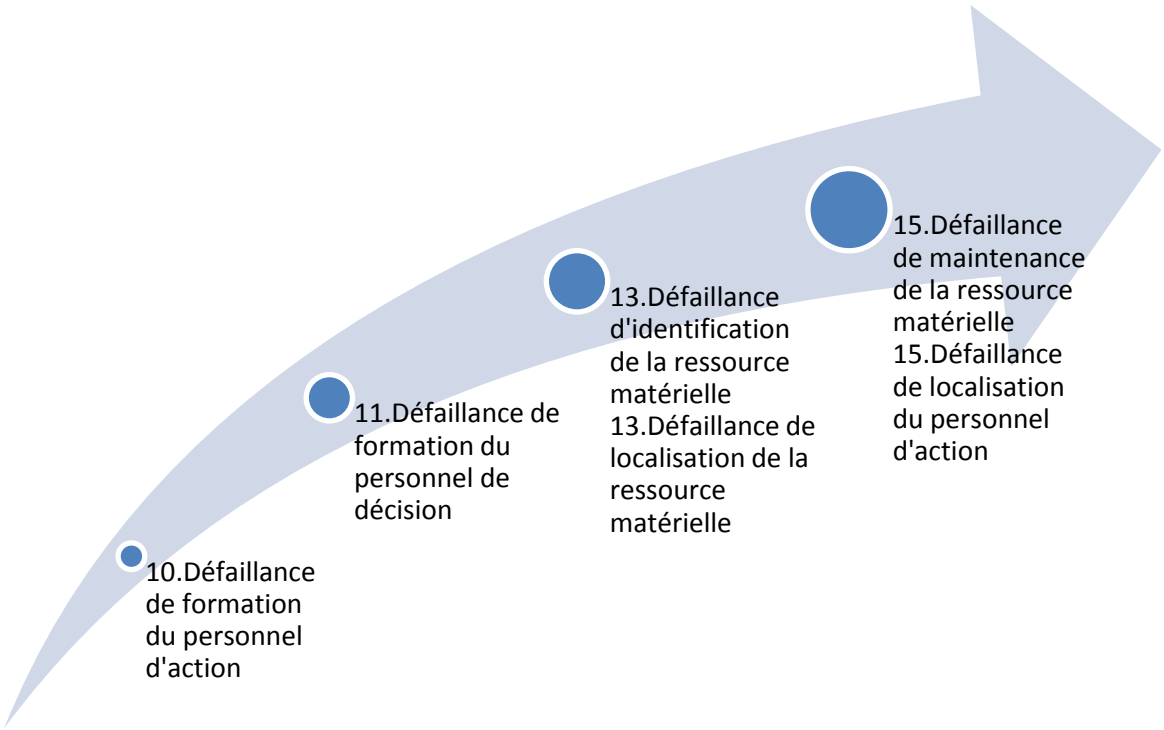
Priorité



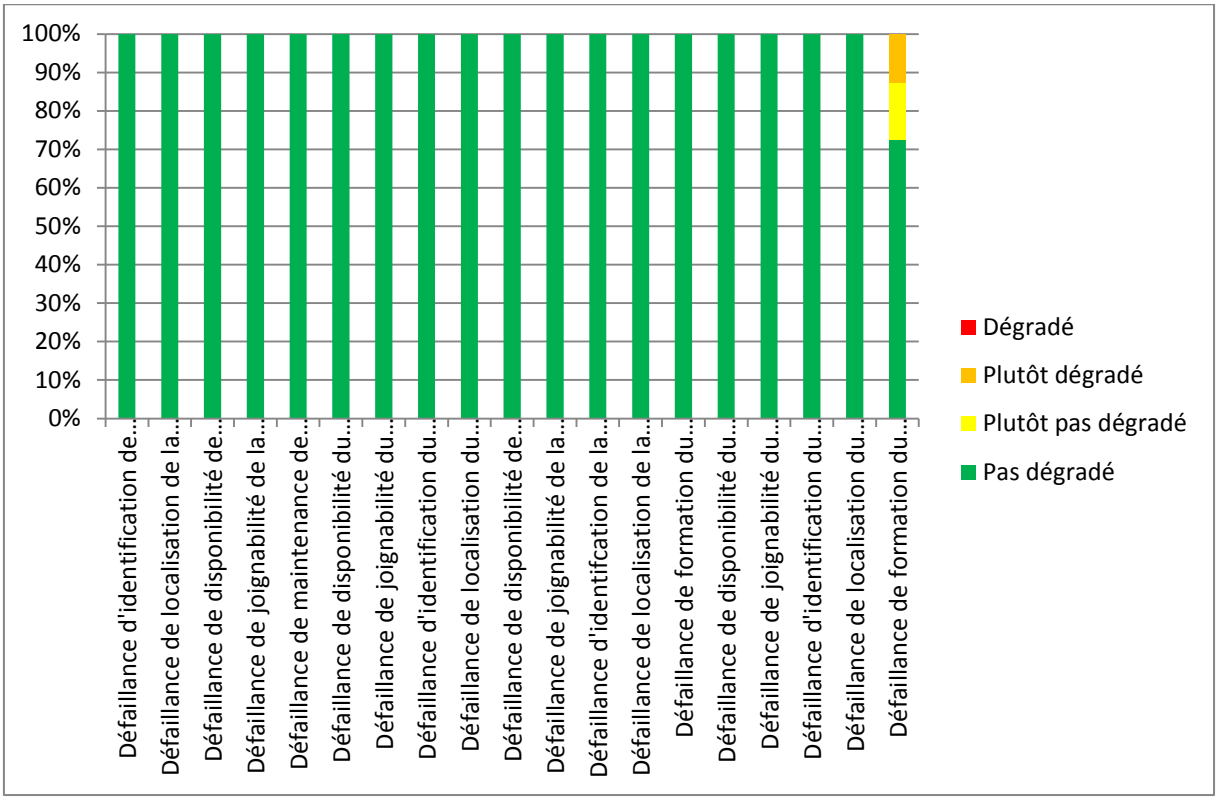
Défaut de matérialisation des PR



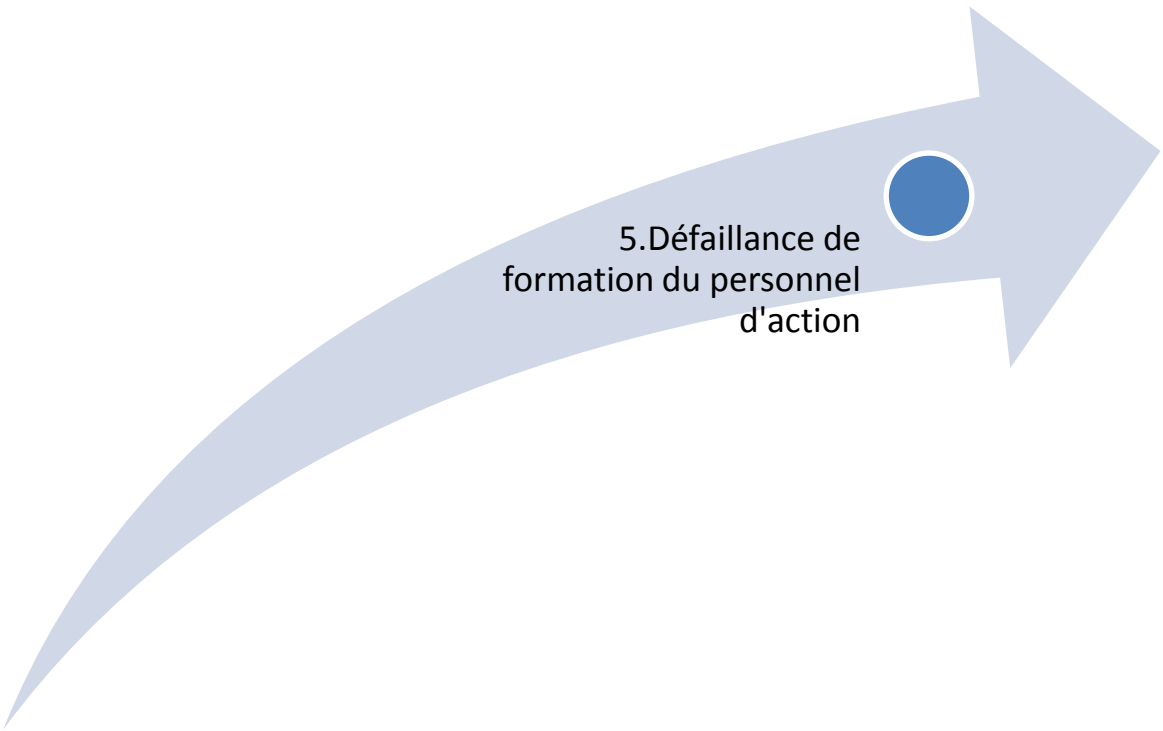
Priorité



Défaut de vérification aux PR



Priorité



Récapitulatif des défaillances et de leur priorité

Fonction Priorité	Nom	Ressource Priorité	Nom
6	Défaut de balisage	10	Défaillance d'identification de la ressource matérielle Défaillance de localisation de la ressource matérielle
		8	Défaillance de disponibilité de la ressource matérielle Défaillance de joignabilité de la ressource matérielle
		6	Défaillance de disponibilité du personnel de décision
		5	Défaillance de joignabilité du personnel de décision
		4	Défaillance de formation du personnel de décision
5	Défaut de diffusion du message d'évacuation	5	Défaillance de disponibilité de la ressource matérielle (sirène, automate)
		4	Défaillance de maintenance de la ressource matérielle (sirène, automate)

4	Défaut de matérialisation des PR	15	Défaillance de maintenance de la ressource matérielle (panneaux, marquage) Défaillance de localisation du personnel d'action
		13	Défaillance d'identification de la ressource matérielle (panneaux, marquage) Défaillance de localisation de la ressource matérielle (panneaux, marquage)
		11	Défaillance de formation du personnel de décision
		10	Défaillance de formation du personnel d'action
4	Défaut de contact du transporteur	10	Défaillance d'identification de la ressource matérielle (téléphone) Défaillance de localisation de la ressource matérielle (téléphone)
		8	Défaillance de disponibilité du personnel de décision
2	Défaut de vérification aux PR	5	Défaillance de formation du personnel d'action

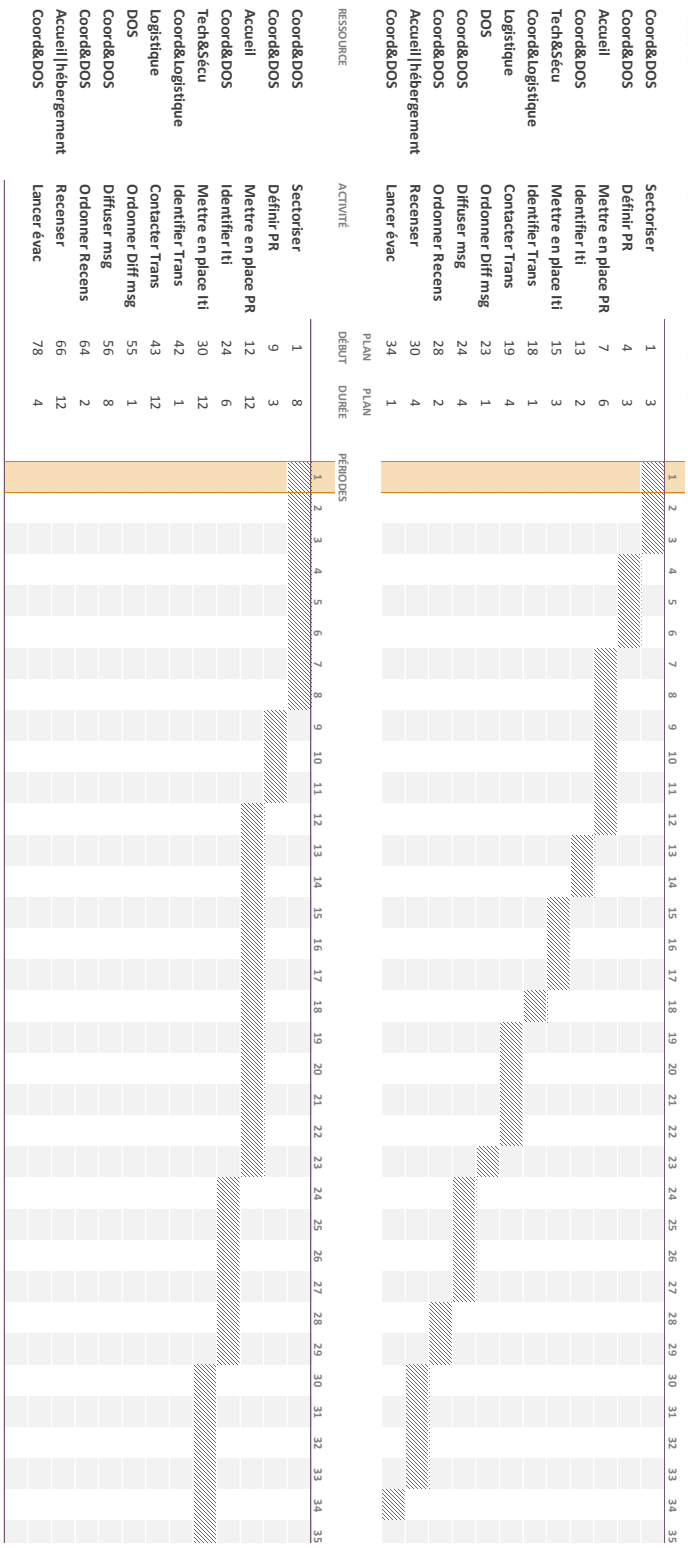
Proposition d'actions correctives

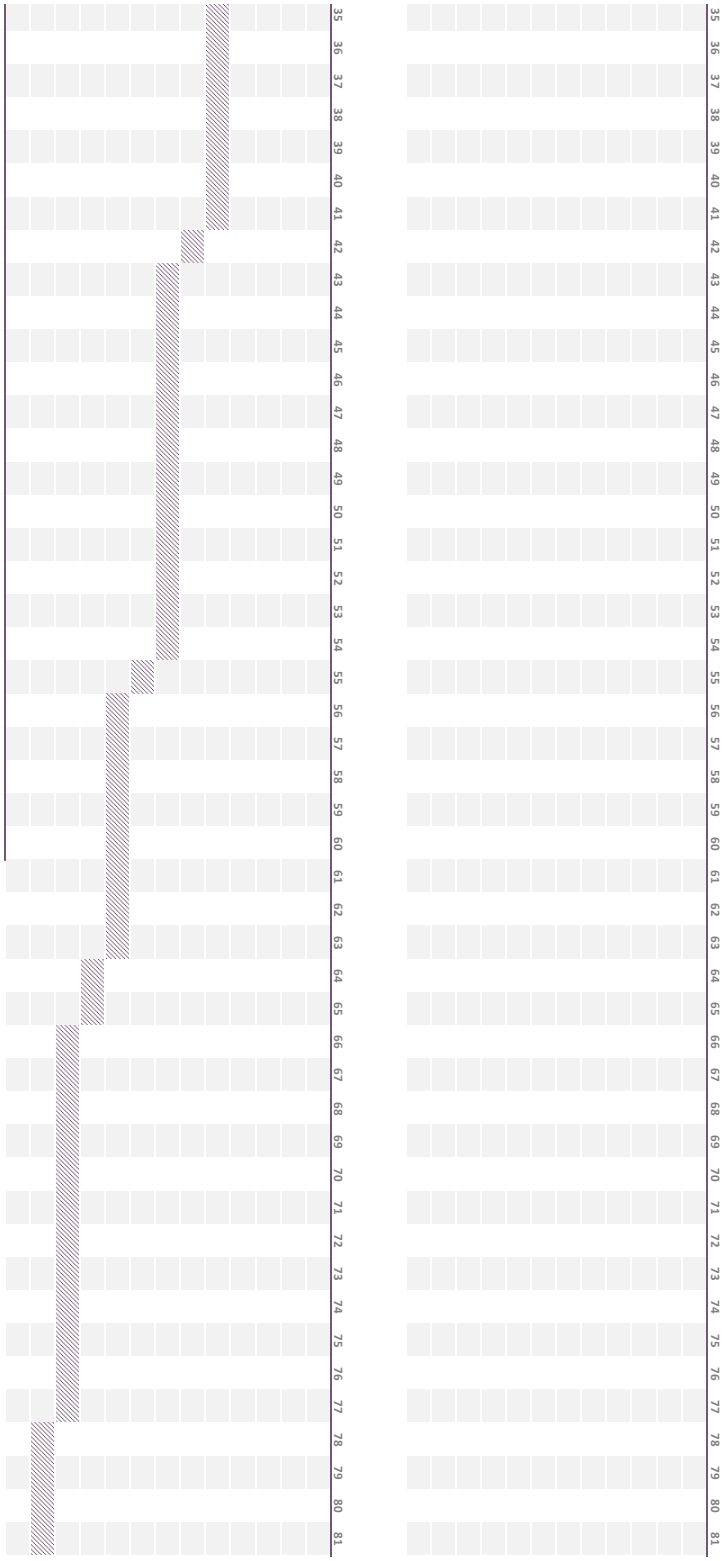
Ressource Priorité	Nom	Action corrective
6-10	Défaillance d'identification de la ressource matérielle (panneaux, signalisation) Défaillance de localisation de la ressource matérielle (panneaux, signalisation)	S'assurer de l'identification de la ressource matérielle type panneaux, signalisation dans le PCS en cas de nécessité. En temps normal, lors d'événement de sécurité civile, ce sont les services préfectoraux qui mettent en place le balisage.
6-8	Défaillance de disponibilité de la ressource matérielle Défaillance de joignabilité de la ressource matérielle	En temps normal, lors d'événement de sécurité civile, ce sont les services préfectoraux qui mettent en place le balisage. En cas d'indisponibilité, s'assurer que des moyens communaux puissent pallier au manque
6-6	Défaillance de disponibilité du personnel de décision	S'assurer que le personnel de décision pour le balisage puisse être disponible (délégation)
6-5	Défaillance de joignabilité du personnel de décision	S'assurer d'un moyen de communication redondant et/ou prioritaire
6-4	Défaillance de formation du personnel de décision	S'assurer de la formation du personnel à l'identification du balisage de l'itinéraire d'évacuation
5-5	Défaillance de disponibilité de la ressource matérielle (sirène, automate)	Un changement du dispositif est prévu, sa vétusté le rendant difficile à maintenir
5-4	Défaillance de maintenance de la ressource matérielle (sirène, automate)	Un changement du dispositif est prévu, sa vétusté le rendant difficile à maintenir

4-15	Défaillance de maintenance de la ressource matérielle (panneaux, marquage) Défaillance de localisation du personnel d'action	La ressource n'existe pas, prévoir des panneaux de signalisation du lieu de rassemblement La ressource n'existe pas, prévoir des panneaux de signalisation du lieu de rassemblement
4-13	Défaillance d'identification de la ressource matérielle (panneaux, marquage) Défaillance de localisation de la ressource matérielle (panneaux, marquage)	Prévoir un dispositif de signalisation des PR Prévoir un dispositif de signalisation des PR
4-11	Défaillance de formation du personnel de décision	S'assurer de la formation du personnel à la mise en place de la signalisation des PR
4-10	Défaillance de formation du personnel d'action	S'assurer de la formation du personnel à la mise en place de la signalisation des PR
4-10	Défaillance d'identification de la ressource matérielle (téléphone) Défaillance de localisation de la ressource matérielle (téléphone)	Il s'agit de moyens de communication, tout autre moyen peut servir à réaliser la fonction (téléphone portable, radio...) Il s'agit de moyens de communication, tout autre moyen peut servir à réaliser la fonction (téléphone portable, radio...)
4-8	Défaillance de disponibilité du personnel de décision	S'assurer que le personnel de décision pour le contact du transporteur puisse être disponible (délégation)
5	Défaillance de formation du personnel d'action	S'assurer de la formation du personnel de vérification aux PR

Aspect temporel

Les fonctions ont été caractérisées selon leur délai de réalisation. Un diagramme de Gantt au plus tôt et au plus tard a été réalisé, tous scénarios confondus. 1 unité de temps correspond à 5 minutes. Au plus tôt le processus d'évacuation est réalisé en 170 minutes, soit un peu moins de 3h. Au plus tard, en 400 minutes soit 4h45 environ. Un échec total de la fonction peut être constaté en cas de non succès du contact du transporteur, pour l'évacuation par des moyens communaux.





Bibliographie

[Adger, 2006] Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3): 268–281.

[Al-Humaidi et Hadipriono Tan, 2010] Al-Humaidi, H. M. et Hadipriono Tan, F. (2010). A fuzzy logic approach to model delays in construction projects using rotational fuzzy fault tree models. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(4):329–351.

[Alexander, 2002] Alexander, D. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Terra Publishing.

[Alexander, 2005] Alexander, D. (2005). Towards the development of a standard in emergency planning. *Disaster Prevention and Management*, 14(2):158–175.

[Barbarosoğlu et Arda, 2004] Barbarosoğlu, G. et Arda, Y. (2004). A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 55(1):43–53.

[BARPI, 2014] BARPI (2014). ARIA.

[Behn, 2003] Behn, R. D. (2003). Why Measure Performance ? Diff erent Purposes Require Diff erent Measures. *Public Administration Review*, 63(5):586–606.

[Birnbaum, 1968] Birnbaum, Z. (1968). On the importance of different components in a multicomponent system. Rapport technique, University of Washington, Washington.

[BRGM, 2014] BRGM (2014). InfoTerre.

[Calixto et Larouvere, 2010] Calixto, E. et Larouvere, E. L. (2010). The regional emergency plan requirement : Application of the best practices to the Brazilian case. *Safety Science*, 48(8):991–999.

[Chang *et al.*, 2014] Chang, F.-S., Wu, J.-S., Lee, C.-N. et Shen, H.-C. (2014). Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling. *Expert Systems with Applications*, 41(6):2947–2956.

[Cigler, 1988] Cigler, B. A. (1988). Emergency Management and Public Administration. *In* Charles, M. T. et Kim, J. C. K., éditeurs : *Crisis Management : A Casebook*, pages 5–22. Charles C. Thomas, Springfield, IL.

[Cutter, 1996] Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Human Geography*, 20(4):529–239.

[DDSC, 2009] DDSC (2009). Plan Communal de Sauvegarde - Guide pratique d 'élaboration. Rapport technique, Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles (DDSC), Asnières-sur-Seine - France.

[de Souza, 2000] de Souza, A. B. J. (2000). Emergency planning for hazardous industrial areas : a Brazilian case study. *Risk analysis*, 20(4):483–93.

[Dedieu, 2010] Dedieu, F. (2010). Alerts and catastrophes : The case of the 1999 storm in France, a treacherous risk. *Sociologie du Travail*, 52:21.

[Degg, 1992] Degg, M. (1992). Natural disasters : recent trends and future prospects. *Geography*, 77(3):198–209.

[Dombroski *et al.*, 2006] Dombroski, M., Fischhoff, B. et Fischbeck, P. (2006). Predicting emergency evacuation and sheltering behavior : a structured analytical approach. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 26(6):1675–88.

[DREAL Rhône-Alpes et DREAL du bassin Rhône Méditerranée, 2014] DREAL Rhône-Alpes et DREAL du bassin Rhône Méditerranée (2014). Situation hydrologique - Station : Alès - Cours d'eau : Gardon.

[Dugan et Doyle, 1997] Dugan, J. B. et Doyle, S. A. (1997). New Results in Fault-Tree Analysis. *In Annual Reliability and Maintainability Symposium*, page 19.

[Dutuit et Rauzy, 2001] Dutuit, Y. et Rauzy, A. (2001). Efficient algorithms to assess component and gate importance in fault tree analysis. 72:4–7.

[Fardis et Cornell, 1982] Fardis, M. N. et Cornell, C. (1982). Multistate reliability analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 71(3):329–336.

[FEMA, 2005] FEMA (2005). Katrina Peak Gust Map.

[FEMA, 2006a] FEMA (2006a). FEMA Recovery Policy - RP9523.9.

[FEMA, 2006b] FEMA (2006b). Principles of Emergency Management.

[Ferdous *et al.*, 2011] Ferdous, R., Khan, F., Sadiq, R., Amyotte, P. et Veitch, B. (2011). Fault and event tree analyses for process systems risk analysis : uncertainty handling formulations. *Risk Analysis*, 31(1):86–107.

[Fitzgerald, 1996] Fitzgerald, M. E. (1996). The Emergency Response Plan : Key to Compliance with the Emergency Response Provisions of the Hazardous Waste Operations and Emergency Response Standard (29 CFR 1910.120). *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 11(9):1154–1162.

[Flaus, 2008] Flaus, J.-M. (2008). A model-based approach for systematic risk analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, 222(1):79–93.

[Flaus, 2010] Flaus, J.-M. (2010). Modélisation de systèmes organisationnels pour l'analyse des défaillances : Application au plan communal de sauvegarde. *In 8ème Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation*, page 6, Hammamet - Tunisie.

[Flaus, 2011] Flaus, J.-M. (2011). A modelling framework for model based risk analysis. *In ESREL*, pages 1533–1540, Troyes - France.

[Ford et Schmidt, 2000] Ford, J. K. et Schmidt, a. M. (2000). Emergency response training : strategies for enhancing real-world performance. *Journal of hazardous materials*, 75(2-3):195–215.

[Frosdick, 1997] Frosdick, S. (1997). The Techniques of Risk Analysis are Insufficient in Themselves. *Disaster Prevention and Management*, 6(3):165–177.

[Fujino et Hadipriono, 1986] Fujino, T. et Hadipriono, F. C. (1986). New Gate Operation of Fuzzy Fault Tree Analysis. pages 1246–1251.

[Furuta et Shiraishi, 1984a] Furuta, H. et Shiraishi, N. (1984a). Fuzzy Importance in Fault-Tree Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 12:205–213.

[Furuta et Shiraishi, 1984b] Furuta, H. et Shiraishi, N. (1984b). Fuzzy importance in fault tree analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 12(3):205–213.

[Fussell, 1975] Fussell, J. (1975). How to Hand-Calculate System Reliability and Safety Characteristics. *IEEE Transactions on Reliability*, 24(3):169–174.

[Georgiadoua *et al.*, 2007] Georgiadoua, P. S., Papazogloub, I. A., Kiranoudisc, C. T. et Markatosc, N. C. (2007). Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites. *Reliability Engineering and System Safety*, 92:1388–1402.

[Girard *et al.*, 2013] Girard, C., David, P., Piatyszek, E. et Flaus, J.-M. (2013). Emergency Plans Modeling : Toward An Assessment Tool. *In European Safety and Reliability Conference 2013 (ESREL 2013) September 29th - October 2nd*, page 8, Amsterdam - The Netherdlands.

[Girard *et al.*, 2014] Girard, C., David, P., Piatyszek, E. et Flaus, J.-M. (2014). Performance Evaluation of Emergency Response Plans Using A Multi- State System Approach (Accepted Paper). *In European Safety and Reliability Conference 2014 (ESREL 2014) September 14-18th*, page 8.

[Glassey et Chappelet, 2002] Glassey, O. et Chappelet, J.-l. (2002). Comparaison de trois techniques de modélisation de processus : ADONIS, OSSAD et UML.

[Grafmeyer et Authier, 2011] Grafmeyer, Y. et Authier, J.-Y. (2011). *Sociologie urbaine*. 3e éd édition.

[Graves *et al.*, 2007] Graves, T., Hamada, M., Klamann, R., Koehler, a. et Martz, H. (2007). A fully Bayesian approach for combining multi-level information in multi-state fault tree quantification. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(10):1476–1483.

[Guanquan et Jinhui, 2012] Guanquan, C. et Jinhui, W. (2012). Study on probability distribution of fire scenarios in risk assessment to emergency evacuation. *Reliability Engineering and System Safety*, 99:24–32.

[Guihou *et al.*, 2006] Guihou, X., Lagadec, P. et Lagadec, E. (2006). Les Crises Hors Cadres et les Grands Réseaux Vitaux - Mission de retour d ' expérience.

[Henstra, 2010] Henstra, D. (2010). Evaluating Local Government Emergency Management Programs : What Framework Should Public Managers Adopt ? *Public Administration Review*, (April):236–246.

[INSEE, 2009a] INSEE (2009a). Statistiques communales : Commune à l'étude.

[INSEE, 2009b] INSEE (2009b). Statistiques régionales : Rhône-Alpes.

[INSEE, 2014] INSEE (2014). Cours de l'Euro par rapport au Dollar US - Moyenne mensuelle.

[International Organization for Standardization, 2008] International Organization for Standardization (2008). ISO 9001 :2008.

[IRMa, 2008] IRMa (2008). Guide d 'évaluation de la démarche Plan Communal de Sauvegarde « Grille d 'audit » et spécifications techniques. Rapport technique, IRMa, Grenoble.

[IRMa, 2010] IRMa (2010). Carte des risques technologiques en Rhône-Alpes.

[IRMa, 2011] IRMa (2011). Carte des risques naturels en Rhône-Alpes.

[IRSN, 2000] IRSN (2000). Rapport sur l'inondation du site du Blayais survenue le 27 décembre 1999. Rapport technique.

[ISDR, 2005] ISDR (2005). Hyogo Declaration. Rapport technique January, Uited Nations (UN), Kobe - Japan.

[Ishida, 2002] Ishida, T. (2002). Q : a scenario description language for interactive agents. *Computer*, 35(11):42–47.

[ISO, 2012a] ISO (2012a). ISO/IEC 19505-1. Rapport technique April.

[ISO, 2012b] ISO (2012b). ISO/IEC 19505-2. Rapport technique April.

[Jackson, 2008] Jackson, B. A. (2008). The Problem of Measuring Emergency Preparedness – The Need for Assessing "Response Reliability" as Part of Homeland Security Planning. Rapport technique, Rand Corporation.

[Jacob-Cano *et al.*, 2011a] Jacob-Cano, J.-R., Piatyszek, E. et Flaus, J.-M. (2011a). Development of a method for evaluating Local Emergency Operation Plan's performances by organizational system modeling. *In TIEMS*, Nîmes - France.

[Jacob-Cano *et al.*, 2011b] Jacob-Cano, J.-R., Piatyszek, E. et Flaus, J.-M. (2011b). Elaboration d'une méthode d'évaluation de performances d'un Plan de Gestion Locale d'Urgences par modélisation de systèmes organisationnels : application au Plan Communal de Sauvegarde (PCS). *In Georisque*, page 12, Montpelliers - France.

[Jain et McLean, 2003] Jain, S. et McLean, C. (2003). A framework for modeling and simulation for emergency response. *Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pages 1068–1076.

[Jennex, 2007] Jennex, M. E. (2007). Modeling Emergency Response Systems. pages 1–8.

[Kanno et Furuta, 2006] Kanno, T. et Furuta, K. (2006). Resilience of Emergency Response Systems. *In 2nd Symposium on Resilience Engineering*, Juan-Les-Pins, France.

[Karagiannis, 2010] Karagiannis, G.-M. (2010). *Méthodologie pour l'analyse de la robustesse des plans de secours industriels.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Saint Etiennes.

[Karagiannis *et al.*, 2010] Karagiannis, G.-M., Piatyszek, E. et Flaus, J.-M. (2010). Industrial emergency planning modeling : a first step toward a robustness analysis tool. *Journal of hazardous materials*, 181:324–34.

[Kim *et al.*, 1996] Kim, C. E., Ju, Y. J. et Gens, M. (1996). Multilevel Fault Tree Analysis Using Fuzzy Numbers. *Computers & Operations Research*, 23(7):695–703.

[Kolen *et al.*, 2012] Kolen, B., Kok, M., Helsloot, I. et Maaskant, B. (2012). EvacuAid : A Probabilistic Model to Determine the Expected Loss of Life for Different Mass Evacuation Strategies During Flood Threats. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis.*

[Kreps, 1991] Kreps, G. A. (1991). Organizing for Emergency Management. *In* Drabek, T. E. et Hoetmer, G. J., éditeurs : *Emergency Management : Principles and Practice for Local Government*, pages 30–53. International City Management Association, Washington, DC.

[Lachtar et Garbolino, 2011] Lachtar, D. et Garbolino, E. (2011). Performance evaluation of organizational crisis cell : Methodological proposal at communal level. *In ESREL 2011*, pages 165–172, Troyes - France.

[Lachtar et Garbolino, 2012] Lachtar, D. et Garbolino, E. (2012). Performance Assessment of Crisis Management Plans with the Contribution of multi-agent Systems. *In CISAP5 5th*, volume 26, pages 477–482, Milan -Italy.

[Lagadec, 2007] Lagadec, P. (2007). *Katrina : Examen des rapports d'enquête.* Ecole Polytechnique – Centre National de la Recherche Scientifique.

[Larken *et al.*, 2001] Larken, J., Shannon, H., Strutt, J. et Jones, B. (2001). *Performance indicators for the assessment of emergency preparedness in major accident hazards.* U.K. Health and Safety Institute.

[Levitin *et al.*, 2003] Levitin, G., Podofillini, L. et Zio, E. (2003). Generalised importance measures for multi-state elements based on performance level restrictions. *Reliability Engineering & System Safety*, 82(3):287–298.

[Lewis et Mioch, 2005] Lewis, D. et Mioch, J. (2005). Urban Vulnerability and Good Governance. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 13(2):50–53.

[Li *et al.*, 2012a] Li, A. C., Nozick, L., Xu, N. et Davidson, R. (2012a). Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 48(4):715–729.

[Li *et al.*, 2012b] Li, J., Lee, S. M. Y. et Liu, W. (2012b). Emergency response plans optimization for unexpected environmental pollution incidents using an open space emergency evacuation model. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(3):213–220.

[Lisnianski et Levitin, 2003] Lisnianski, A. et Levitin, G. (2003). *Multi-State System Reliability*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore.

[Lissandre, 1990] Lissandre, M. (1990). *Maitriser SADT*. Armand Colin Editeu.

[Madni et Jackson, 2009] Madni, A. et Jackson, S. (2009). Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Systems Journal*, 3(2):181–191.

[Maria, 1997] Maria, A. (1997). Introduction to Modeling and Simulation. *In* Andradóttti, S., Healy, K. J., Withers, D. H. et Nelson, B. L., éditeurs : *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, page 7.

[Mayer, 2005] Mayer, H. (2005). *First Responder Readiness : A systems approach to readiness assessment using model based vulnerability analysis techniques*. Thèse de doctorat, U.S. Naval Postgraduate School.

[Mcmanus *et al.*, 2007] Mcmanus, S., Seville, E., Vargo, J. et Brunsdon, D. (2007). Facilitated Process for improving organizational resilience. *ASCE*, pages 1–18.

[MEDDE, 2010] MEDDE (2010). Risques naturels - L'exposition en France.

[MEEDDM, 2008] MEEDDM (2008). Les événements naturels dommageables en France et dans le monde en 2007. Rapport technique.

[Météo-France, 1999a] Météo-France (1999a). Tempête Lothar.

[Météo-France, 1999b] Météo-France (1999b). Tempête Martin.

[Météo-France, 2002] Météo-France (2002). Bilan de l'année 2002.

[Météo-France, 2014] Météo-France (2014). Météo Alès.

[Moraes de Araújo, 2004] Moraes de Araújo, G. (2004). *Elementos do Sistema de Gestão de segurança meio ambiente e saúde ocupacional*. Gerenciamento Verde Consultoria, Rio de Janeiro.

[NASA, 2005] NASA (2005). Hurricane Katrina (12L) approaching the Gulf Coast.

[Newkirk, 2001] Newkirk, R. T. (2001). The Increasing Cost of Disasters in Developed Countries : A Challenge to Local Planning and Government. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 9(3):159–170.

[Pan et Yun, 1997] Pan, H. et Yun, W. (1997). Fault tree analysis with fuzzy gates. *Computers & Industrial Engineering*, 33(3-4):569–572.

[Patton et Flin, 1999] Patton, D. et Flin, R. (1999). Disaster Stress : An Emergency Management Perspective. *Disaster Prevention and Management*, 8(4):261–267.

[Perry et Lindell, 2003] Perry, R. W. et Lindell, M. K. (2003). Preparedness for Emergency Response : Guide- lines for the Emergency Planning Process. *Disasters*, 27(4):336–350.

[Piatyszek et Karagiannis, 2012] Piatyszek, E. et Karagiannis, G. M. (2012). A model-based approach for a systematic risk analysis of local flood emergency operation plans : a first step toward a decision support system. *Natural Hazards*, 61(3):1443–1462.

[Prefeture du Gard, 2011] Prefeture du Gard (2011). Liste des Arrêtés Préfectoraux d'Etat de Catastrophe Naturelle.

[Prim.net, 2009] Prim.net (2009). Dénitions du Risque Majeur.

[Prim.net, 2010] Prim.net (2010). PPR.

[Prim.net, 2011] Prim.net (2011). Ma commune face aux risques - Commune à l'étude.

[Prim.net, 2014] Prim.net (2014). Ma commune face aux risques.

[Ramabrahmam *et al.*, 1996] Ramabrahmam, B. V., Sreenivasulu, B. et Mallikarjunan, M. M. (1996). Model on-site emergency plan . Case study : toxic gas release from an ammonia storage terminal. 9(4):259–265.

[Ramirez-Marquez et Coit, 2007] Ramirez-Marquez, J. E. et Coit, D. W. (2007). Multi-state component criticality analysis for reliability improvement in multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(12):1608–1619.

[Ramsay, 1999] Ramsay, C. G. (1999). Protecting your business : from emergency planning to crisis management. *Journal of Hazardous Materials*, 65(1-2):131–149.

[Région Rône-Alpes, 2013] Région Rône-Alpes (2013). Carte de la zone de défense Sud-Est.

[République Française, 1996] République Française (1996). Loi 96-142 1996-02-21 du 21 février 1996 relative à la partie Législative du code général des collectivités territoriales.

[République Française, 2004] République Française (2004). Loi n° 2004-811 du 13 août 2004 dite modernisation de la sécurité civile.

[République Française, 2005] République Française (2005). Décret n°2005-1156 du 13 septembre 2005 relatif au plan communal de sauvegarde et pris pour application de l'article 13 de la loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile.

[Risk Management Solutions, 2000] Risk Management Solutions (2000). Les tempêtes Lothar et Martin. Rapport technique.

[Robert *et al.*, 2013] Robert, B., Morabito, L. et Debernard, C. (2013). Simulation and anticipation of domino effects among critical infrastructures.

[Senat.fr, 2002] Senat.fr (2002). Projet de loi relatif à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

[Siebeneck et Cova, 2012] Siebeneck, L. K. et Cova, T. J. (2012). Spatial and temporal variation in evacuee risk perception throughout the evacuation and return-entry process. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 32(9):1468–80.

[Simon, 1976] Simon, H. A. (1976). How Complex are Complex Systems ? *In Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, pages 507–522.

[Stébé et Marchal, 2012] Stébé, J.-M. et Marchal, H. (2012). *La sociologie urbaine.* P.U.F., 2e éd. édition.

[Suh, 2001] Suh, N. (2001). *Axiomatic Design : Advances and Applications.* Oxford University Press.

[Suresh *et al.*, 1996] Suresh, P., Babar, A. et Venkat Raj, V. (1996). Uncertainty in fault tree analysis : A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 83:135–141.

[Tanaka *et al.*, 1983] Tanaka, H., Fan, L. T., Lai, F. S. et Toguchi, K. (1983). Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability. *IEEE Transactions on Reliability*, R-32(5):453–457.

[Tseng *et al.*, 2008] Tseng, J., Kuo, C., Liu, M. et Shu, C. (2008). Emergency response plan for boiler explosion with toxic chemical releases at Nan-Kung industrial park in central Taiwan. *Process Safety and Environmental Protection*, 86(6):415–420.

[Turoff, 2002] Turoff, M. (2002). Past and Future Emergency Response Information Systems. *Communications of the ACM*, 45(4):29–32.

[Tyagi *et al.*, 2010] Tyagi, S., Pandey, D. et Tyagi, R. (2010). Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(5):276–283.

[United Nations, 2011] United Nations (2011). General assembly AG/11047 from 28/01/2011. Rapport technique, Organisation des Nations Unies, New York - USA.

[United Nations Development Programme, 2014] United Nations Development Programme (2014). *Human Development Report 2014*.

[United States Census Bureau, 2005] United States Census Bureau (2005). Population Estimates.

[U.S. Department of the Army, 1997] U.S. Department of the Army (1997). Staff Organization and Operations, FM 101-5. Rapport technique.

[Vesely *et al.*, 1981] Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H. et Haasl, D. F. (1981). *Fault Tree Handbook*. U.S. Nuclear Regulatory Comission.

[Ville de Metz, 2007] Ville de Metz (2007). Plan Communal de Sauvegarde. Rapport technique, Ville de Metz, Metz.

[Ville de Nancy, 2009] Ville de Nancy (2009). Plan Communal de Sauvegarde. Rapport technique, Ville de Nancy, Nancy.

[Ville de Saint-Agnan, 2009] Ville de Saint-Agnan (2009). Plan Communal de Sauvegarde. Rapport technique, Ville de Saint-Agnan, Saint-Agnan.

[Ville de Sinsat, 2004] Ville de Sinsat (2004). Plan Communal de Sauvegarde. Rapport technique, Ville de Sinsat, Sinsat.

[Waugh et Hy, 1990] Waugh, W. L. et Hy, R. J. (1990). *Handbook of Emergency Management : Programs and Policies Dealing with Major Hazards and Disasters*. Greenwood Publishing Group.

[Wholey et Hatry, 1992] Wholey, J. S. et Hatry, H. P. (1992). The Case for Performance Monitoring. *Public Administration Review*, 52(6):604–610.

[Wybo et Kowalski, 1998] Wybo, J. L. et Kowalski, K. M. (1998). Command centers and emergency management support. *Safety Science*, 30(1-2):131–138.

[Yu *et al.*, 2012] Yu, M., Lejarraga, T. et Gonzalez, C. (2012). Context-specific, scenario-based risk scales. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 32(12):2166–81.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2014 EMSE 0763

Clément GIRARD

FAILURE DIAGNOSIS OF LOCAL EMERGENCY RESPONSE PLANS FOR EMERGENCY MANAGEMENT

Speciality: Environmental Science and Engineering

Keywords: Local Emergency Response Plans, *a priori* Assessment, Modeling, Fault-Tree, Multi-States

Abstract:

The increase in frequency and intensity of major disasters make a consensus. In France, the state imposes to local administrations to be prepared to face such events by describing their local organizations in a Local Emergency Response Plan (LERP). However, there are no existing tools for decision-makers at this authority scale to a priori assess functioning capacity of the organization described in their plans. This research work proposes an *a priori* assessment method of Local Emergency Response Plans, to allow local authorities to identify organizational vulnerabilities of their plans, and thus giving to them an aid to decision-making. This assessment method is laid on an established formalism of modelling methods. This allows, in one hand, to catch the complexity of elements' stakes in emergency management and in another hand to lay assessment mechanisms for this one. These mechanisms are supported by Fault-Tree formalism. However, this is restricting because the failure of modelled elements can only be assessed on two discrete levels: complete functioning or complete dysfunctioning. This is why this work aims to build an assessment method based on Multi-Level Fault-Tree. This means that new gates have to be described according to the assessed object (LERP). Furthermore, modelled elements have to be improved to take into account Multi-Level considerations in the chosen modelling method. According to that, a questionnaire has been developed to collect information from local authorities about failure states of modelled elements. The results of this assessment are presented in a dashboard format. The purpose is first, to guide local authorities by having a quick overview of the overall organization system represented in the LERP. Secondly, it helps them to plan the vulnerabilities reductions in a management program.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2014 EMSE 0763

Clément Girard

DIAGNOSTIC DES DYSFONCTIONNEMENTS DES PLANS DE SECOURS POUR LA GESTION DES RISQUES MAJEURS

Spécialité: Sciences et Génie de l'Environnement

Mots clefs : Plans de Gestion Locale d'Urgence, Évaluation *a priori*, Modélisation, Arbres de défaillance, Système Multi-États

Résumé :

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de grande ampleur est unanime. En France, l'État impose à l'échelle communale, de se préparer à de tels événements en établissant un Plan Communal de Sauvegarde. Cependant les instances décisionnaires à ce niveau ne disposent pas d'outils leurs permettant au préalable de connaitre la capacité de fonctionnement de leur organisation. Ces travaux de recherche proposent une méthode d'évaluation a priori de l'organisation locale d'urgence pour permettre aux instances décisionnaires, d'identifier des points vulnérables dans leur organisation et ainsi leur fournir une aide à la décision. Cette méthode d'évaluation repose sur le formalisme d'une méthode de modélisation établie, permettant d'une part d'appréhender la complexité des éléments mis en jeux dans l'organisation de gestion d'événements et d'autre part sert de base pour les mécanismes d'évaluation. Ces derniers sont quant à eux supportés par le formalisme des arbres de défaillance. Cependant, ce formalisme est limitant, car il ne propose qu'une évaluation de la défaillance à deux états discrets (complètement nulle ou complètement avérée). C'est pourquoi, ces travaux se sont intéressés à la conception d'une méthode d'évaluation à base d'arbre de défaillance multi-états. Cela se traduit par une nouvelle définition des événements et des portes pour les arbres utilisés dans la méthode de modélisation retenue. Un questionnaire a été créé pour collecter auprès des gestionnaires, les informations sur les états de défaillance. Les résultats de l'évaluation sont présentés sous forme de tableaux de bord et permettent ainsi de guider le choix des actions d'amélioration.