

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DES INTERDÉPENDANCES POUR IDENTIFIER ET
ANTICIPER LES EFFETS DOMINO

RENAUD DE LA LANDE DE CALAN
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
AOÛT 2007

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DES INTERDÉPENDANCES POUR IDENTIFIER ET
ANTICIPER LES EFFETS DOMINO

présenté par : DE LA LANDE DE CALAN Renaud

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIÉRIE Martin, ing., Ph.D., président

M. ROBERT Benoît, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche

Mme GAGNON Valérie, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Un travail de recherche effectué dans le cadre d'une maîtrise présente un réel défi pour un étudiant. Je suis donc très content d'avoir pu le mener à terme. Ceci a été possible grâce à l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Je ne pourrais citer toutes les personnes qui sont intervenues de près ou de loin dans ma maîtrise recherche. Je vais donc simplement nommer certains d'entre eux et signifier aux autres, de façon générale, ma gratitude.

Je veux particulièrement remercier le Dr Benoît Robert qui a été mon directeur de recherche et qui m'a guidé tout au long de ma maîtrise. Je remercie ses associés de recherche M Luciano Morabito et Mlle Irene Cloutier qui m'ont soutenu et qui m'ont offert leurs conseils précieux. Je remercie M Frédéric Petit qui m'a de nombreuses fois sorti de situations difficiles grâce à ses recommandations.

Je souhaite, enfin, remercier les membres de mon jury de leurs temps précieux pour donner leur avis sur mon travail de recherche.

RÉSUMÉ

La vulnérabilité des sociétés modernes est en pleine augmentation du fait de sa dépendance, toujours plus grande, avec les réseaux de support à la vie (RSV). En effet, ces réseaux, qui fournissent les ressources vitales aux sociétés (eau potable, électricité, télécoms, etc.), sont fortement interdépendants les uns des autres. Ainsi, lorsqu'un RSV est défaillant, il affecte tous les autres RSV qui utilisent sa ressource. Nous avons alors une défaillance en cascade (effet domino) de réseau en réseau ce qui peut paralyser l'intégralité de l'environnement socioéconomique.

De manière à rendre nos sociétés moins vulnérables, les travaux de recherche présentés dans ce document proposent une méthodologie de modélisation des interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino. Grâce à cette méthodologie, nous allons donner aux responsables en sécurité civile les outils pour prévoir une future défaillance afin qu'ils puissent mettre en place des mesures de protection et éviter que le problème ne se propage.

La méthodologie propose de structurer les données des RSV de manière à ne garder que les informations interprétées pertinentes qui répondent à la problématique de protection face aux effets domino. Les RSV donnent, alors, les informations nécessaires à la mise en place d'une base de connaissances faisant le lien entre les ressources utilisées sur des secteurs et l'impact sur l'état du réseau utilisateur lorsque ces ressources ne sont plus disponibles. L'état du réseau détermine, ensuite, s'il est encore capable de réaliser sa mission (fournir une ressource). Nous pouvons donc connaître les conséquences de la perte d'une ressource utilisée à un endroit sur une ressource fournie à un endroit identique ou différent du premier. À partir de cette base de connaissances, la méthodologie indique une démarche permettant de modéliser les effets domino. D'autres

problématiques sont également abordées telles que le cumul des vulnérabilités, les ressources alternatives ou une meilleure anticipation des effets domino.

Les travaux de recherche permettent de répondre à la problématique de protection des RSV face aux effets domino tout en proposant une méthodologie simple, flexible, adaptable et dans le respect de la confidentialité. La structuration des données proposée permet une communication bilatérale entre les différents RSV.

Les résultats présentés dans ce document ont, enfin, eu l'appui de professionnels de la protection de RSV interdépendants. Dans un contexte d'action proactive, cette méthodologie est, effectivement, un bon outil pour un réseau d'alerte. Ce dernier rend compte d'une situation possible à venir face à laquelle il faut se protéger préventivement.

ABSTRACT

The vulnerability of modern societies is growing because of its dependence towards lifeline networks (LN). Indeed, these networks, which provide vital resources to the society (water, electricity, telecoms, etc.), are strongly interdependent. Thus, when a LN is weakening, it affects all the others LN which use its resource. There is a cascading failure (domino effects) from one network to another which can paralyze all the socioeconomic environment.

To make our societies less vulnerable, the research presented in this document proposes a methodology to model the interdependences between LN, in order to identify and anticipate domino effects. This methodology will give to public security managers tools to predict future failures. Thereafter, they will be able to set up protection measures for avoiding the propagation of these failures.

The methodology proposes to structure the LN's data in order to keep only the pertinent interpreted information related to the problematic of protection against domino effects. LN will share data that is necessary for setting up a knowledge base linking used resources on sectors and the impacts on the state of the networks when these resources are not available anymore. The LN state determines if the network is still able to realize its mission (provide a resource). It is then possible to identify the consequences on a provided resource on a sector due to the loss of a used resource on another sector identical or different from the first. From this knowledge base, the methodology gives the steps to model domino effects. Other problematics are also addressed such as the cumulative vulnerabilities, the alternatives resources or better domino effects anticipation.

This research answers the problematic of LN's protection against domino effects while proposing a methodology that is simple, flexible, adaptable and respectful towards the LN confidentiality. The data structure proposed allows a bilateral communication between the networks.

Finally, the results presented in this document received the support of interdependent LN protection professionals. In a proactive action context, this methodology represents a good early warning system, which allows to see in a foreseeable future possible situations for which it would be important to be preventively prepared.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xiv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1. Contexte.....	6
2.2. La problématique des réseaux de support à la vie	8
2.2.1. Infrastructures essentielles et réseaux de support à la vie	8
2.2.2. Interdépendances	9
2.2.3. Effets domino	11
2.2.4. La vulnérabilité	12
2.3. Approches actuelles	13
2.3.1. Méthodes de protection des réseaux de support à la vie.....	13
2.3.2. <i>Le Centre risque & performance</i>	21

CHAPITRE 3 : TRAVAIL DE RECHERCHE	25
3.1. Problématique	26
3.2. Sujet de recherche	27
3.3. Objectifs et hypothèses.....	28
3.3.1. Objectifs.....	28
3.3.2. Hypothèses.....	29
CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE.....	30
4.1. Identification.....	30
4.1.1. Ressources utilisées.....	30
4.1.2. Synthèse organisationnelle technique.....	33
4.2. Classification	35
4.2.1. État du RSV	35
4.2.2. Classification des Ru/Sal	37
4.2.3. Les ressources alternatives.....	42
4.3. Création de la base de connaissances.....	43
4.3.1. Résultats recherchés	45
4.3.2. Démarche à suivre	47
4.3.3. Implémentation de la base de connaissances	52
4.3.4. Exemple	53
4.4. Applications possibles.....	60
4.4.1. Modélisation des interdépendances.....	61
4.4.2. Anticipation des effets domino	73
4.4.3. Visualisation de l'accroissement de vulnérabilité.....	76
4.4.4. Ressources alternatives.....	81

CHAPITRE 5 : DISCUSSION	83
5.1. Résultats	84
5.2. Applications	87
5.3. Limites.....	89
CHAPITRE 6 : CONCLUSION.....	93
RÉFÉRENCES	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Utilisation des ressources	31
Tableau 4.2	Exemple d'une base de connaissances partielle	51
Tableau 4.3	Exemple d'une base de connaissances.....	53
Tableau 4.4	Base de connaissances partielle du RSV télécoms.....	56
Tableau 4.5	Base de connaissances du RSV télécoms	59
Tableau 4.6	Exemple d'une ligne de la base de connaissances.....	61
Tableau 4.7	Réseau de télécommunications	65
Tableau 4.8	Réseau d'électricité.....	66
Tableau 4.9	Réseau d'eau potable	66
Tableau 4.10	Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de E2.....	67
Tableau 4.11	Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de W3.....	68
Tableau 4.12	Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de T1.....	69
Tableau 4.13	Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de E1 et de W2.....	71
Tableau 4.14	Partie d'une base de connaissances illustrant l'anticipation des effets domino.....	74
Tableau 4.15	Partie d'une base de connaissances d'un réseau de télécoms	79

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Représentation d'interdépendances entre IE (Peerenboom, 2001).....	10
Figure 4.1	Mécanisme de dégradation.....	33
Figure 4.2	États des réseaux de support à la vie.....	36
Figure 4.3	État du RSV engendré par un Ru/Sal critique défaillant.....	39
Figure 4.4	État du RSV engendré par un Ru/Sal nécessaire défaillant.....	40
Figure 4.5	État du RSV engendré par un Ru/Sal supportif défaillant	41
Figure 4.6	Exemple de liens entre Ru/Sal et Rf/Sal	44
Figure 4.7	Démarche de création de la base de connaissances	48
Figure 4.8	Exemple d'une cartographie de Sal	49
Figure 4.9	Secteurs d'alimentation des RSV étudiés.....	54
Figure 4.10	Superposition des cartographies des RSV étudiés.....	55
Figure 4.11	Superposition des cartographies des BOI nécessaires à T1 avec les Sal du RSV électricité	57
Figure 4.12	Représentation graphique d'une ligne de la base de connaissances	61
Figure 4.13	Démarche de modélisation des interdépendances	64
Figure 4.14	Tableau de bord dû à la perte de E2.....	68
Figure 4.15	Tableau de bord dû à la perte de W3	69
Figure 4.16	Tableau de bord dû à la perte de T1.....	70
Figure 4.17	Tableau de bord dû à la perte de E1 et de W2.....	72
Figure 4.18	Anticipation des effets domino.....	75
Figure 4.19	Cumul des vulnérabilités.....	80

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BARPI : Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (France).

BOI : Besoin organisationnel interne.

CRP : *Centre risque & performance*.

IE : Infrastructure essentielle.

LN : Lifeline network.

NISAC : National infrastructure simulation and analysis center.

PCRII : Programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures.

Ra : Ressource alternative.

Ra/Sal : Couple ressource alternative – secteur d'alimentation.

Rf : Ressource fournie.

Rf/Sal : Couple ressource fournie – secteur d'alimentation.

RSV : Réseau de support à la vie.

Ru : Ressource utilisée.

Ru/Sal : Couple ressource utilisée - secteur d'alimentation.

Sal : Secteur d'alimentation.

SOT : Synthèse organisationnelle technique.

SP : Sécurité publique Canada.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Nous sommes, de nos jours, témoins d'une augmentation importante des catastrophes de causes naturelles ou anthropiques. Les conséquences sur la population, l'économie, les structures, etc. sont elles aussi en augmentation. Mais cet accroissement des catastrophes n'est pas sans causes. En effet, au fil des années, nous avons développé nos sociétés afin de les rendre toujours plus productives, efficaces, rentables, etc. Ce développement rapide a été au détriment d'une bonne protection, et nous sommes maintenant responsables de cette vulnérabilité accrue. C'est-à-dire que l'état, évolutif dans le temps, de nos sociétés et leur sensibilité face à des événements non souhaités (aléas) peuvent engendrer des conséquences, le plus souvent, néfastes. Beaucoup d'exemples récents démontrent bien cela. Le cyclone Katrina qui a frappé la Nouvelle-Orléans aux États-Unis est l'un de ceux qui illustrent le mieux cette vulnérabilité (Guihou et al., 2006).

La sensibilité de nos sociétés est due à de nombreuses choses et il paraît difficile de les rendre plus résilientes face aux catastrophes à venir. D'autant plus que dans le contexte mondial actuel, ces événements ont tendance à se manifester de plus en plus fréquemment. Cependant, si nous étudions attentivement les principales raisons de l'augmentation de la vulnérabilité de nos sociétés, nous pouvons en dégager quelques-unes. Parmi elles, nous retrouvons, de façon prédominante, les réseaux de support à la vie (RSV). Nos sociétés sont, effectivement, extrêmement dépendantes des RSV. Ils fournissent les ressources vitales telles que l'eau potable, l'électricité, les télécoms, etc. dont il est pratiquement impossible de se passer. De plus, ces réseaux sont interdépendants les uns des autres. Ils utilisent, chacun, les ressources que produisent les autres. Nous avons donc des relations clients-fournisseurs entre les RSV qui transmettent les défaillances de réseau en réseau. Ainsi, si un RSV n'est plus capable de fournir sa ressource, tous les autres vont être affectés immédiatement et risquent à leur

tour de ne plus être capable de réaliser leur mission (fournir leur ressource). La perte d'un RSV engendre, donc, des crises importantes comme nous l'avons vu en 1998 avec les pluies verglaçantes qui ont mis hors-service le réseau d'électricité ce qui paralysa le Québec et l'Ontario pendant plusieurs jours (Nicolet et al., 1999).

La protection des réseaux de support à la vie est, donc, très vite devenue primordiale. Chaque pays travaille à mieux identifier les faiblesses des RSV pour qu'ils puissent tenir lors de catastrophes et continuer à fournir les ressources vitales à nos sociétés. Au Canada des groupes de recherche ont, ainsi, été mandatés par Sécurité publique Canada (SP) en collaboration avec le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie. Un programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures (PCRII) a été formé pour l'occasion et les groupes de recherche présentent chaque année l'avancée de leurs travaux.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche présentés dans ce document. En effet, ces travaux ont été réalisés au sein du *Centre risque & performance* qui est un des groupes de recherches du PCRII. Nous visons, donc, à développer un moyen pour rendre nos sociétés moins vulnérables.

Lorsque nous étudions les vulnérabilités des RSV, nous constatons qu'il y a deux niveaux à prendre en compte. Il y a les vulnérabilités internes qui sont dues à des événements non souhaités internes au RSV, et les vulnérabilités externes qui sont, à l'opposé, dues à des événements non souhaités externes au RSV.

Les RSV travaillent depuis longtemps à se protéger face à des aléas internes qu'ils soient dus à l'humain ou à la technique. Ils ont mis en place de nombreux outils tels que les plans de mesures d'urgence ou les plans de continuité opérationnelle. Ceci assure une protection relativement bonne au niveau interne du RSV.

À l'externe, par contre, les RSV sont moins bien préparés. Il est, effectivement, souvent compliqué de pouvoir prévoir une catastrophe, qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique. Il est cependant possible d'en diminuer les conséquences en évitant que la défaillance d'un RSV se propage à d'autres RSV au travers des interdépendances (effets domino). C'est pourquoi cette problématique des interdépendances a été reprise par de nombreux programmes de recherche comme le PCR II.

Les travaux de recherche présentés dans ce document vont, donc, proposer un moyen de mieux protéger les RSV interdépendants face aux effets domino (défaillance d'un RSV engendrée par la défaillance d'un autre RSV). Pour ce faire, nous avons développé une méthodologie qui permet la modélisation des interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino. À partir des résultats donnés par cette méthodologie, il sera possible de prévoir les défaillances de RSV causées par les défaillances d'autres RSV, ce qui pourra amener à la perte de ressources.

Nous allons donc faire, dans une première partie, une revue de la littérature qui traite du sujet. Nous verrons tout d'abord le contexte plus précis dans lequel cette problématique s'inscrit. Nous identifierons ensuite la problématique des réseaux de support à la vie en définissant les RSV, les interdépendances et les effets domino, et en faisant ressortir la vulnérabilité induite. Nous étudierons, enfin, les approches actuelles pour protéger les RSV. Nous verrons, d'abord, les méthodes proposées un peu partout dans le monde, et, ensuite, nous présenterons les travaux du CRP qui serviront de base à la recherche présentée dans ce document.

La deuxième partie va présenter le travail de recherche. Ainsi, nous préciserons la problématique relevée de la revue de littérature. Nous définirons ensuite le sujet de recherche, et nous verrons, enfin, quels seront nos objectifs et sur quelles hypothèses

nous allons nous appuyer. Nous ferons aussi ressortir, dans cette partie, les bonnes idées présentes dans la littérature afin de pouvoir les intégrer dans la méthodologie.

La troisième partie présente la méthodologie développée pour modéliser les interdépendances afin d'identifier et d'anticiper les effets domino. Nous montrerons, tout d'abord, comment la méthodologie va permettre aux réseaux d'identifier les ressources qu'ils utilisent à différents endroits. Ensuite, nous verrons comment la méthodologie permet de classer ces ressources suivant les conséquences qu'engendrent leurs pertes. Cette classification sera possible en vérifiant des hypothèses rattachées à chaque catégorie de ressources. Nous verrons, alors, comment il sera possible de créer une base de connaissances qui regroupera l'ensemble des informations interprétées pertinentes permettant la modélisation des interdépendances. Nous présenterons, enfin, les applications possibles avec comme principale application la modélisation des interdépendances.

La dernière partie, précédant la conclusion, discutera des résultats obtenus. Nous verrons donc ce qui se dégage de ces résultats, quelles applications il sera possible d'envisager et quelles limites pousseront à la poursuite de travaux de recherche sur le sujet. Afin de donner un plus grand poids à nos travaux, nous intégrerons, dans cette partie, l'avis de professionnels de la protection des RSV interdépendants à qui une présentation des résultats a été faite.

Dans le cas d'un groupe de travail où les RSV collaborent afin d'éviter l'apparition d'effets domino, notre méthodologie permettra aux responsables en sécurité civile de pouvoir anticiper l'état des autres RSV, ainsi que la perte des ressources qu'ils fournissent. Ils pourront donc mettre en place des mesures de protection afin d'anticiper la perte d'une ressource qu'ils utilisent.

La méthodologie, permettant d'anticiper les effets domino entre RSV, relèvera de nombreux défis soulevés dans la littérature dont, entre autres, le maintien de la confidentialité des données.

Cette méthodologie pourra également donner lieu au développement d'un système expert pouvant prévoir l'état des RSV interdépendants.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Nous allons, dans cette première partie, étudier les travaux qui portent sur la protection de RSV interdépendants afin d'exposer l'étendue des connaissances actuelles. Cette revue de littérature est composée de trois parties. Nous commençons par étudier le contexte dans lequel la problématique prend place, les événements qui ont mis de l'avant la vulnérabilité de notre société. Ensuite, nous voyons la problématique qui en résulte en analysant comment les travaux définissent les infrastructures essentielles et les réseaux de support à la vie, les interdépendances et les effets domino. Nous explicitons, alors, la vulnérabilité qui en découle et dont il faut protéger la société. Enfin, nous étudions les approches préconisées dans la littérature en abordant, dans un premier temps, les méthodes de protection des infrastructures essentielles proposées par les différents groupes de recherches, et, dans un deuxième temps, en exposant l'approche du *Centre risque & performance* sur laquelle les travaux de recherche prennent appui.

2.1. Contexte

De nos jours, nos sociétés sont particulièrement vulnérables, c'est-à-dire leur état évolutif dans le temps, et leur sensibilité face à des événements non souhaités (naturels ou anthropiques) peuvent engendrer des conséquences. Ces quinze dernières années et plus particulièrement depuis les événements du 11 septembre 2001, la vulnérabilité de la société est devenue une réelle priorité, d'autant plus qu'elle ne cesse de s'accroître.

Avant de voir comment se définit cette vulnérabilité et d'analyser les causes de son accroissement, nous allons étudier quelques catastrophes afin de mieux comprendre ce à quoi nous sommes exposés de nos jours.

Ainsi, nous apprenons, qu'en France, le Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (BARPI) a recensé cent quatorze cas d'accidents industriels déclenchés par un autre accident dans un établissement voisin (Hubin et Balouin, 2005). Ces accidents répertoriés proviennent de diverses industries telles que les industries pharmaceutiques, les installations chimiques ou encore les installations de fabrication de pâte à papier. Le document cite l'exemple de la raffinerie de Skikda en Algérie, le 19 janvier 2004, où l'explosion d'une chaudière a engendré d'autres explosions qui se sont étendues à plus de 10km de l'accident d'origine.

Ces cas d'accidents en chaîne sont de plus en plus fréquents. Nous retrouvons de nombreux exemples dans la littérature. En 1995, le tremblement de terre de Kobe a causé une perte d'eau, une perte de télécommunications et une perte du réseau routier, rendant la lutte contre les incendies impossible (Little, 2004). En 1996, la surcharge sur deux lignes électriques au nord-ouest des États-Unis a provoqué un « black-out » dans onze états de ce même pays et dans deux provinces au Canada (Amin, 2001). Cet accident se répétera, d'ailleurs, en 2003. En 1998, une tempête de verglas, qui a eu lieu du 5 au 9 janvier, a engendré de très grosses coupures de courant au Canada ce qui a paralysé une partie des provinces de l'Ontario et du Québec (Nicolet et al., 1999). En 1998, encore, la perte du satellite de télécommunications Galaxy 4 a eu des conséquences très étendues aux États-Unis telles que les défaillances de services financiers et de communications entre les acteurs d'urgences (Rinaldi et al., 2001). Le 11 septembre 2001, à la suite de l'attentat causant la chute des deux tours, la sécurité, la fiabilité, l'efficacité et la solidité des réseaux voisins, tel que le réseau de télécommunications, n'ont pas pu être conservés causant de grosses dégradations (Amin, 2002; Lewis 2006). Enfin la catastrophe plus récente de Katrina, en 2005, a une fois encore illustré la vulnérabilité de nos sociétés. Ainsi, le cyclone qui a frappé la côte du Golfe du Mexique a propagé les dégradations de réseaux vitaux en réseaux vitaux tels que le réseau électrique ou le réseau de télécommunications (Guihou et al., 2006).

Dans tous ces textes, les auteurs exposent cette vulnérabilité croissante de nos sociétés. La protection de ces dernières n'est désormais plus prise comme acquise, et la vulnérabilité créée au profit de la rentabilité doit maintenant être réduite. Les auteurs identifient toujours comme cause principale à cette vulnérabilité grandissante, les interdépendances entre les infrastructures essentielles. Cela cause, en effet, de nombreux effets domino qui propagent les dégradations de réseau en réseau.

Nous allons donc étudier, dans la partie suivante, ce que sont les infrastructures essentielles. Nous allons définir leurs interdépendances et étudier les effets domino.

2.2. La problématique des réseaux de support à la vie

2.2.1. Infrastructures essentielles et réseaux de support à la vie

La partie précédente met en cause les infrastructures essentielles (IE) comme l'une des principales raisons de la vulnérabilité de nos sociétés. Ces dernières sont, en effet, définies comme des systèmes, installations, réseaux et actifs dont dépendent la santé, la sûreté et le bien-être économique de la population, ou qui sont indispensables au fonctionnement efficace des gouvernements (TERMIUM, 2007). Cette définition, normalisée par Sécurité publique Canada (SP), montre l'importance de ces IE. Lee et al. (2004) décrivent les IE comme des éléments vitaux dont nous ne pouvons nous passer et dont l'incapacité à fonctionner ou la destruction aurait un impact très important. Nous remarquons donc leur caractère indispensable pour les sociétés.

Sécurité publique Canada classe les infrastructures essentielles en dix secteurs, soit l'énergie et les services publics, la technologie de l'information et des communications, les finances, les soins de santé, la nourriture, l'eau, les transports, la sécurité, le gouvernement, et la fabrication (SP, 2007). Ce terme regroupe, ainsi, de nombreux

secteurs qui sont très variés. Dans ce travail de recherche, nous avons voulu nous concentrer sur certaines de ces infrastructures essentielles. Nous avons, en effet, retenu les réseaux qui sont les plus interdépendants tels que les réseaux d'eau potable, les réseaux électriques ou encore les réseaux de télécommunications.

Ces réseaux sont appelés réseaux de support à la vie (RSV) afin de rappeler que ces derniers sont indispensables pour la santé, la sûreté, la sécurité et le bien-être économique de la population.

Cette différenciation est pertinente du fait de leurs fortes interdépendances avec les autres RSV. En effet, ils fournissent des biens et services, que nous appellerons ressources, qui sont utilisés par les autres RSV pour fournir, à leur tour, leurs ressources. Nous allons, dans la partie suivante, définir ce que sont les interdépendances.

2.2.2. Interdépendances

Les travaux de Rinaldi et al. (2001), repris par Peerenboom (2001), définissent une interdépendance comme une relation bidirectionnelle entre deux infrastructures essentielles dont l'état de l'une est influencé ou en corrélation avec l'état de l'autre. Ils classent ces interdépendances en quatre catégories. Les interdépendances physiques sont dues à l'utilisation par une IE de la ressource d'une autre IE. Les interdépendances cybernétiques sont causées par l'utilisation d'informations électroniques. Les interdépendances géographiques sont amenées par une proximité physique entre deux IE. Les interdépendances logiques sont dues à des liens financiers entre IE. Ceci montre la grande diversité d'interdépendances possibles entre les infrastructures essentielles et donc entre les réseaux de support à la vie.

Les travaux de recherche présentés dans ce document vont se concentrer sur un type d'interdépendances, les interdépendances physiques. En effet, nous avons pu voir, au travers des exemples précédents, que ce type d'interdépendances est le plus fréquent (exemple : tremblement de terre de Kobe en 1995, où la perte des ressources eau, télécommunications et routes, empêche la lutte contre les incendies). La protection face aux interdépendances physiques est donc primordiale.

La complexité des interdépendances entre infrastructures essentielles est montrée au travers de la Figure 2.1.

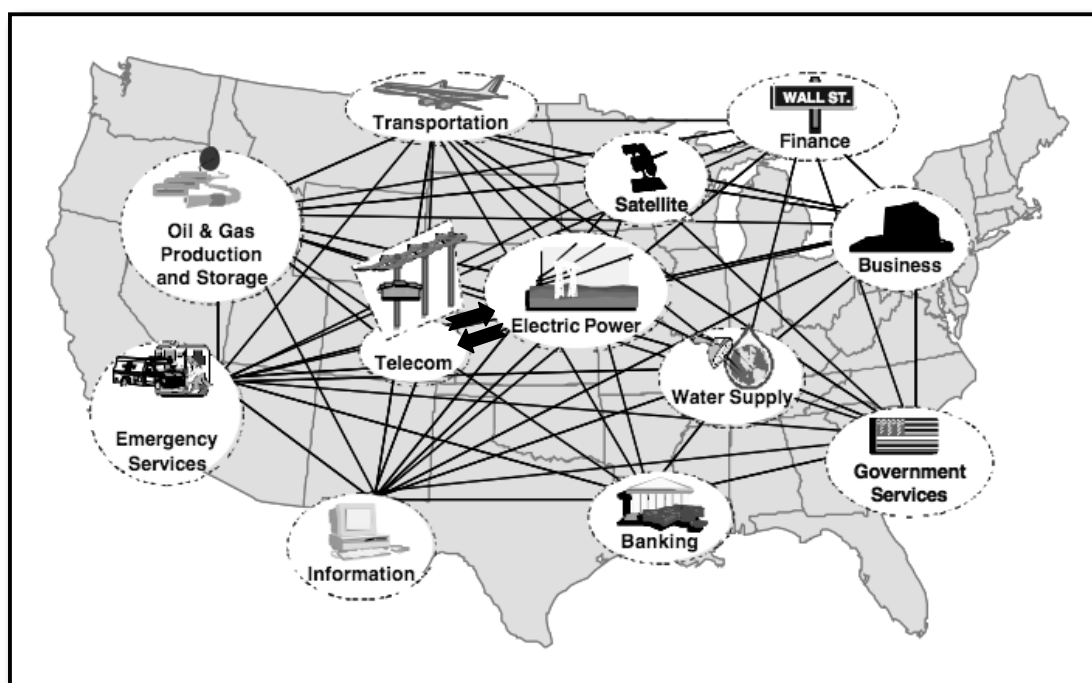


Figure 2.1 Représentation d'interdépendances entre IE (Peerenboom, 2001)

Sur la Figure 2.1, différentes IE sont représentées. Les liens d'interdépendances, qui les lient les unes aux autres, sont évoqués par des traits noirs. Cette figure montre bien que chaque IE a besoin des autres IE pour fonctionner. Ainsi, comme le mettent en évidence

les flèches, les réseaux d'électricité et des télécoms ne peuvent fonctionner l'un sans l'autre.

Cette représentation ne prend pas en compte la notion de temps qui est rattachée aux interdépendances. En effet, une IE ne sera probablement pas directement affecté lorsqu'une autre IE sera défaillante. La Figure 2.1 permet uniquement de montrer les liens existants.

L'identification, la compréhension et l'analyse des interdépendances entre les réseaux de support à la vie deviennent indispensables pour protéger nos sociétés. La mise en place de méthodologies prenant en compte les infrastructures essentielles interdépendantes afin de pouvoir prévoir des protections, des atténuations et des réponses est, donc, indispensable.

2.2.3. Effets domino

Nous avons vu dans les parties précédentes que les effets domino, dus aux interdépendances entre réseaux de support à la vie, causent un accroissement de la vulnérabilité de nos sociétés.

Pour les IE possédant des liens d'interdépendances physiques, les effets domino sont une suite d'événements en cascade où les conséquences d'un accident antérieur sont augmentées jusqu'à provoquer un accident majeur (Reniers et al., 2005).

Deux types d'effets domino sont identifiés : internes et externes. Les effets domino internes commencent dans le RSV alors que les effets domino externes débutent dans le voisinage. Reniers et al. (2005) nous indiquent que les effets domino internes sont

généralement pris en compte dans les mesures de sécurité des RSV. Les effets domino externes dus aux interdépendances entre RSV sont, par contre, rarement pris en considération. Il apparaît primordial, suite aux événements décrits dans les parties précédentes, de mettre en place des moyens de protection face à ces effets domino.

2.2.4. La vulnérabilité

Nous voyons, donc, la présence d'une réelle vulnérabilité de nos sociétés face à laquelle il est primordial de se protéger. Nous pouvons voir que ces vulnérabilités sont souvent dues aux RSV, surtout lorsqu'ils sont interdépendants.

Amin (2002) nous montre qu'il y a un réel accroissement de la vulnérabilité des réseaux électriques, des réseaux de télécommunications et des réseaux de transports. Or ces trois réseaux sont indispensables pour le bon fonctionnement de nos sociétés. Les interdépendances entre ces réseaux ne cessent d'augmenter ce qui rend plus grand les risques de dégradation en cascade. Amin (2002) préconise donc la mise en place immédiate de moyens de protection face aux effets domino.

Protéger les RSV face aux effets domino n'est pas chose aisée. En effet, la complexité de ces derniers, l'énormité de paramètres à prendre en compte, la diversité des intervenants, le nombre d'interactions possibles et l'incapacité des théories mathématiques conventionnelles à pouvoir résoudre le problème, montrent la grande difficulté de protéger les RSV (Amin, 2001).

De plus, les progrès technologiques, apportant un fort gain d'efficacité, créent de nouvelles vulnérabilités qui ne sont pas négligeables (Nozick et al., 2004). Les populations urbaines, en pleine expansion, rendent, elles aussi, les sociétés plus

vulnérables à des défaillances en cascades causées par des événements naturels, environnementaux et techniques (Lewis et Mioch, 2005). En effet, les villes s'agrandissent très rapidement et il est rare que quelqu'un prenne le temps de minimiser les risques de dégradations en cascade.

Nous pouvons ainsi identifier les nombreux défis qu'il faut relever afin de pouvoir donner une réponse adéquate pour la protection des RSV interdépendants. Il apparaît donc indispensable de mettre en place cette réponse pour protéger les RSV des risques de défaillances en cascades. Nous allons donc voir quelles solutions sont déjà disponibles dans la littérature.

2.3. Approches actuelles

2.3.1. Méthodes de protection des réseaux de support à la vie

Nous pouvons trouver plusieurs travaux qui proposent des solutions pour mieux protéger les RSV face aux effets domino. Cependant, il n'existe pas, à ce jour, de réponse efficace au problème. Nous allons donc, dans cette partie, étudier ces solutions afin de comprendre ce qui a été fait. Nous pourrons, alors, en tirer des conclusions pour que nos travaux de recherche s'appuient sur de bonnes bases.

Le National infrastructure simulation and analysis centre (NISAC) développe une méthode de simulation informatisée qui prédit, en temps réel, les conséquences suite à des événements non souhaités sur les RSV (Wimbish et Sterling, 2003). Pour ce faire, ils identifient les « nœuds critiques », et quantifient les conséquences physiques et économiques que peuvent engendrer des événements non souhaités sur les RSV. Cependant, cette méthode présente deux inconvénients majeurs. D'une part, elle demande l'utilisation d'ordinateurs très puissants pouvant supporter la simulation.

D'autre part, elle est basée sur une approche par scénarios ce qui ne permet pas de considérer l'ensemble des événements pouvant conduire à la défaillance d'un RSV par l'intermédiaire d'effets domino. Le NISAC développe aussi des études basées sur les conséquences en complément des travaux cités ci-dessus. Cependant, là encore, les études utilisent des scénarios ce qui peut tendre à sous-estimer les enchaînements d'événements pouvant conduire à la défaillance d'un RSV. De plus, nous pouvons discuter le bien fondée d'études basées sur le coût des défaillances. En effet, cette approche coûts-bénéfices sera toujours difficile à justifier après un sinistre causé par un événement non pris en compte.

Le Département du Homeland Security aux Etats-Unis donne un plan de protection des RSV face à des attaques terroristes (U.S. Department of Homeland Security, 2003). Une hiérarchisation des RSV est faite afin de concentrer les efforts sur les plus importants. Les RSV et leurs liens d'interdépendances sont, ensuite, modélisés pour pouvoir simuler des effets domino. Cette modélisation demandera, là aussi, des ordinateurs très puissants pour fonctionner. Nous n'avons, à ce jour, pas trouvé de résultats concrets aux travaux faits par le département du Homeland Security pour la protection des RSV face aux effets domino.

Dobson et al. (2004) proposent de représenter le modèle de défaillance en cascade par un arbre dont chaque branche est associée à une probabilité. Pour limiter le nombre de cas possible et ainsi réduire le nombre de branches, les auteurs proposent d'utiliser les formules de distribution de Poisson. Cette approche doit permettre de trouver les chemins les plus critiques et, ainsi, de pouvoir concentrer les efforts à la réduction des probabilités d'apparition. Cependant, cette approche simplifie énormément la problématique ce qui amène à se demander si elle peut donner des résultats tangibles. D'autre part, l'approche est basée sur les probabilités ce qui cause une négligence d'événements à fortes conséquences et faibles probabilités. En effet, une telle approche

pondère les conséquences par les probabilités. Ainsi, si nous avons un risque d'événements pouvant causer de très lourdes conséquences mais que leurs probabilités d'apparition sont très faibles, ces événements ne seront pas pris en compte et aucune protection ne sera développée à leur rencontre.

Brown et al. (2004) développent une méthodologie qui permet de comparer les vulnérabilités, les menaces, les changements, les protections et les règles des RSV interdépendants. Avec l'aide d'un questionnaire et d'un modèle conceptuel, ils déduisent les vulnérabilités et les conséquences possibles. Il est alors possible de mettre en place les mesures de protection adéquates. Un processus d'itération est alors lancé pour prendre en compte ces changements. Cette méthode a la faiblesse d'être longue car il faut à chaque changement recommencer la démarche afin de réévaluer la vulnérabilité du RSV.

Lee et al. (2004) proposent une méthodologie pour prévoir la vulnérabilité des RSV au travers d'une structure hiérarchique. Pour ce faire, ils représentent l'état initial avec les liens d'interdépendances. Ils identifient les interdépendances, les classent, et suivant le groupe auquel chacune appartient, ils déterminent la vulnérabilité des RSV. Cette méthode a le défaut de nécessiter les prestations d'un ingénieur système qui possède une connaissance parfaite des RSV interdépendants.

Nozick et al. (2004) développent un outil mathématique pour représenter les RSV interconnectés. Une suite d'algorithmes permet d'estimer la performance des RSV et d'optimiser les investissements pour l'amélioration de cette performance. Cependant, les auteurs éprouvent de grosses difficultés à obtenir les données pour mettre en place l'outil. D'autre part, il reste beaucoup de progrès à faire avant que l'outil puisse être opérationnel.

Duenas-Osorio et al. (2004) mettent en place des modèles théoriques qui visent à représenter les RSV et leurs interdépendances. Ils étudient, ensuite, les effets d'un désastre naturel ou délibéré. Pour ce faire, ils étudient la résilience et la fragmentation du RSV à l'aide de courbes de fragilités. Ces dernières donnent des probabilités conditionnelles qu'une utilisation d'un élément crée une défaillance. C'est une expression mathématique qui transcrit la probabilité conditionnelle d'atteindre ou de dépasser un état de défaillance pour une utilisation particulière. Ils obtiennent alors la vulnérabilité du RSV. Cependant, ces travaux doivent passer d'un stade théorique à un stade pratique, et l'utilisation des courbes de fragilités implique l'emploi de probabilités qui, comme vu précédemment, causent une négligence d'événements à fortes conséquences et faibles probabilités.

Simpson et al. (2005) misent, eux aussi, sur les courbes de fragilités. Ils les combinent avec des modèles d'impacts régionaux et socio-économiques pour connaître les conséquences d'événements non souhaités sur des RSV. Les liens les plus faibles entre les RSV sont alors identifiés et des mesures de protection peuvent être mises en place. Là encore, l'utilisation des courbes de fragilités implique l'utilisation de probabilités qui tendent à négliger les événements à fortes conséquences et faibles probabilités.

Reniers et al. (2005) combinent différentes méthodes d'analyse de risques et d'aide à la décision. En effet, ils utilisent l'identification des risques de Hazop, l'analyse What-If et les matrices de risques. Ils reprennent ainsi les meilleures idées de chacune des méthodes. Cependant, la méthodologie devient compliquée avec l'incrémentation des acteurs, cela peut prendre beaucoup de temps et il est nécessaire d'avoir une équipe très qualifiée qui maîtrise les trois méthodes d'analyse de risques.

Koubatis et Schonberger (2005) proposent une méthode pour répondre à la complexité des RSV interdépendants. Pour cela, ils commencent par une vue globale des RSV

permettant de mettre en relief les interdépendances. Ensuite, ils identifient les bons et les mauvais liens. Ils finissent en mettant en évidence les vulnérabilités des RSV où les mesures de protection doivent être concentrées. La méthode ne donne pas de solutions quant aux moyens de prévenir les effets domino, mais permet de mettre en avant les vulnérabilités à approfondir.

Lewis (2006) propose de répondre aux questions : « quoi protéger ? » et « comment ? ». Pour ce faire, il faut trouver les éléments les plus critiques de chaque RSV et les protéger. L'auteur dit que ces éléments ne sont pas très nombreux et qu'il est impératif de tous les trouver. Lewis propose des principes pour guider une bonne stratégie nationale de protection des RSV. Il réduit, pour cela, la complexité des RSV en les ramenant à des nœuds, connectés les uns aux autres par des liens. Puis, il met en place des arbres de causes afin d'évaluer la vulnérabilité et les actions à entreprendre pour la réduire. La méthode proposée s'applique de façon indépendante à chaque RSV. Il n'y a, donc, pas un travail commun.

Nous voyons la diversité de travaux présents sur la scène mondiale. Nous allons maintenant voir les derniers résultats présentés au Canada par certains des groupes de recherche mandatés par le PCRII pour travailler sur les interdépendances et les effets domino.

Marti (2007) propose de simuler les interdépendances entre RSV pour permettre une bonne coordination de la planification des mesures d'urgences. Il obtient une représentation graphique des RSV et des liens d'interdépendances qui les relient. L'outil de simulation est actuellement testé sur le campus de l'Université de Colombie-Britannique. L'outil semble requérir une quantité d'informations très importante à traiter. Nous pouvons, donc, nous demander les limites lors de l'application sur une plus grande zone d'étude. En effet, la représentation systématique de tous les liens

d'interdépendances exigera des outils informatiques extrêmement puissants lorsque le nombre de RSV, pris en compte, augmentera.

Cheng (2007) présente un système d'information géographique prenant en compte les interdépendances entre les réseaux de support à la vie. Une application sur les inondations est déjà faite. Cependant, les travaux ne permettent pas, présentement, de répondre à la problématique de protection des RSV.

Zhang (2007) indique qu'il va développer un modèle d'aide à la décision capable d'identifier toutes les vulnérabilités des RSV. Pour cela, il compte simuler les réseaux de RSV, mais ne présente pas pour le moment de résultats concrets.

D'autres groupes de recherche sont aussi mandatés par le PCRII, mais, outre le *Centre risque & performance* dont les travaux seront exposés dans la partie suivante, ils ne présentent pas de résultats convaincants.

Nous remarquons que les travaux actuels ne donnent pas une réponse adéquate pour la protection des réseaux de support à la vie face aux effets domino. De nombreuses façons pour protéger les RSV ont été envisagées :

- L'utilisation des probabilités;
- L'utilisation des méthodes classiques d'analyse de risques;
- La modélisation complète des RSV et de leurs liens d'interdépendances;
- L'utilisation de méthodes basées sur les scénarios;
- Le traitement indépendant des RSV;
- L'utilisation de méthodes basées sur un processus d'itération;
- L'utilisation d'algorithmes.

Nous pouvons donc voir que beaucoup de solutions ont été envisagées pour répondre à la problématique des interdépendances et des effets domino, mais qu'aucune ne la résout. Il sera donc important de chercher une nouvelle façon de traiter le problème.

Néanmoins, de nombreuses bonnes idées ressortent de la littérature. Nous allons donc voir, à présent, quelles sont ces idées, et comment nous pouvons les intégrer afin de nous appuyer sur les recherches déjà réalisées.

Wimbish et Sterling (2003) mettent en évidence l'importance d'avoir des outils qui permettent à tous les acteurs de coopérer et de se comprendre les uns les autres. Ils mettent de l'avant l'importance d'avoir des données réelles pour mettre en place une démarche efficace. C'est pourquoi la clef du succès réside dans la collecte, l'identification, la validation et la mise en forme des données provenant des différents acteurs. Cet échange de données se doit d'être sécuritaire et dans le respect de la confidentialité. Enfin, ils affirment que tous modèles développés doivent s'adapter à toutes les possibilités envisageables.

Rinaldi (2004) nous indique qu'il existe plusieurs modèles pour développer, opérer et gérer un RSV. Cependant, il précise le manque de maturité des modèles sur les interdépendances. Ceci confirme bien la nécessité de travaux de recherche dans ce domaine. L'auteur précise que pour relever ce défi, il est nécessaire de mettre en place un système de mesure pour représenter l'état des RSV.

Comfort et al. (2004) précisent l'importance de la participation de tous les acteurs. Il faut, en effet, que les organisations soient volontairement impliquées pour travailler sur la protection de leur RSV. Elles doivent toutes avoir le même but et doivent travailler au partage d'une base de données. Ils préconisent, pour cela, la mise en place d'un système sociotechnique où les organisations travaillent ensemble pour le même but. Il faut aussi

créer une base de données assez flexible pour pouvoir intégrer les informations de toutes les organisations et assez ordonnée pour s'assurer que les bonnes informations arrivent aux bonnes personnes sous le bon format.

Koubatis et Schonberger (2005) préconisent la simplicité de la méthode. En effet, plusieurs travaux existent, mais ils sont tous trop complexes. Il faut, maintenant, proposer aux RSV une méthodologie simple qu'ils puissent utiliser facilement et rapidement.

Medd et Marvin (2005) nous disent de développer des stratégies qui s'adaptent aux différentes crises. Ces stratégies doivent prendre en compte la composante spatiale des problèmes étudiés, et doivent impliquer tous les intervenants de tous les niveaux dans la phase de préparation.

Hills (2005) montre l'absence de travaux qui prend en compte le cumul de vulnérabilité. Il affirme pourtant l'importance de ce cumul qui peut créer un accroissement de la vulnérabilité. Il préconise, ainsi, de lui porter une attention particulière.

Peerenboom (2007) confirme l'absence de solutions adéquates au problème des interdépendances. Il affirme, aussi, l'importance d'une démarche multidisciplinaire pour relever le défi de protection des RSV face aux effets domino.

Zhang (2007) indique l'importance de mettre en place un langage de communication commun facilitant les échanges d'informations et de données. Il faut, en effet, que les différents acteurs puissent se comprendre entre eux et qu'ils puissent s'échanger des données pertinentes sans difficulté.

Au travers de la littérature, nous pouvons, donc, voir que beaucoup de solutions ont été envisagées. Cependant, aucune n'a pour le moment réussi à résoudre la problématique

de protection des RSV face aux effets domino. De bonnes idées ont été dégagées et il est important, dans nos travaux de recherche, de s'en servir :

- Développer un système de communications entre les RSV qui soit sécuritaire, confidentiel et adaptable;
- Mettre en place un système de mesure pour représenter l'état des RSV;
- Créer une banque de données flexible et ordonnée;
- Favoriser la coopération entre les RSV;
- Mettre en place une méthode simple;
- Prendre en compte la composante spatiale;
- Prendre en compte le cumul de vulnérabilité;
- Mettre en place un langage de communication entre les RSV.

Nous allons maintenant exposer ce que propose le *Centre risque & performance* (CRP). En effet, ma maîtrise recherche, effectuée à l'École Polytechnique de Montréal, prend appui sur les travaux de recherche du CRP. Nous allons donc étudier les réalisations présentes.

2.3.2. Le *Centre risque & performance*

Les travaux du *Centre risque & performance* (CRP) se basent sur une approche par conséquences. En effet, les approches traditionnelles, basées sur des scénarios, ne permettent pas de prendre en compte tous les événements possibles (Robert et al., 2003). De plus cette approche est particulièrement à propos pour les pays développés possédant des RSV complexes. L'approche donne une image concrète du risque potentiel permettant la mise en place de mesures d'atténuation efficaces pour la population.

Les travaux proposent de caractériser les réseaux de support à la vie en fonction de l'importance et de l'efficacité de leur mission (fonction pour laquelle le RSV est conçu), de leurs opérations (actions directes ou indirectes sur l'ensemble ou des parties du réseau afin de réaliser les missions) et de leurs infrastructures (installations nécessaires à la réalisation des opérations) (Petit et al., 2004). Ainsi, il est possible de déterminer la vulnérabilité globale des RSV et de remonter de la défaillance d'une mission pour obtenir les causes en passant par les opérations et les infrastructures. Pour déterminer la vulnérabilité, ce n'est plus la question « et si ? » qui est posée, mais « pourquoi ? ». Nous ne partons, donc, plus d'un nombre fini de causes, mais d'un ensemble de conséquences que nous voulons éviter.

Le CRP propose une démarche de prévention, appliquée aux interdépendances et aux effets domino qui met l'accent sur l'anticipation des conséquences néfastes et la communication entre les RSV au travers d'un espace de coopération (espace entre les acteurs où un processus de communication bilatéral basé sur la transmission d'informations pertinentes et réalistes est mis en place pour se comprendre) (Robert, 2005). Pour ce faire, tous les RSV doivent adopter un comportement proactif face aux défaillances causées par des interdépendances. Le CRP indique qu'il faut identifier les liens entre les entités de l'espace de coopération afin d'obtenir, en continu, l'état des ressources (eau, gaz, électricité, etc.). La défaillance des RSV est, alors, définie comme une altération des ressources fournies. Enfin, le CRP préconise le développement d'un code de langage similaire, technique et ciblé.

Le CRP insiste sur l'importance d'avoir des outils qui interprètent l'information (Robert et al., 2006). Ces outils permettent de gagner un temps précieux lors de l'intervention car ils répondent immédiatement à une problématique précise.

Différents outils sont développés par le *Centre risque & performance* pour permettre la mise en place d'une méthodologie systématique d'évaluation des interdépendances anticipant l'apparition d'effets domino (Morabito, 2006). Les matrices d'interdépendances permettent d'ordonner les données des RSV sur leurs liens d'interdépendances avec les autres RSV. Les courbes de conséquences permettent d'obtenir les conséquences engendrées par un état (ex : la défaillance d'un RSV) et ceci sans prendre en compte les causes de l'état. Ces courbes associent, d'autre part, la notion de temps aux liens d'interdépendances. Les conséquences évoluent, effectivement, en fonction du temps.

Le CRP propose, aussi, une cartographie dite souple qui regroupe des informations interprétées et non géoréférencées (Beney et al., 2007). En effet, l'obtention d'informations géoréférencées est particulièrement difficile du fait, entre autre, de la confidentialité. Le CRP propose, donc, de découper la zone d'étude en secteurs où les RSV peuvent localiser leurs infrastructures importantes et ceci sans donner leurs positions exactes. Cette localisation se fait en répondant à une problématique particulière. Nous obtenons donc des informations interprétées au travers d'une cartographie souple.

Enfin, le CRP a développé un partenariat avec différents RSV permettant une application concrète des résultats de recherche (Robert, 2007). Ainsi, Hydro-Québec, Bell Canada, la Ville de Montréal, la Ville de Québec, GazMétro et le ministère du Transport du Québec sont les RSV partenaires du CRP et partagent leurs données avec ce dernier.

Nous pouvons faire ressortir quatre notions fortes à partir desquelles le CRP cherche à protéger les RSV interdépendants :

- L'approche par conséquences;

- L'espace de coopération;
- L'association du temps aux interdépendances;
- La cartographie souple.

C'est donc fort des travaux du *Centre risque & performance* et des résultats tirés de la littérature, que mes recherches sont effectuées. Nous allons, ainsi, reprendre les points forts qui ressortent des travaux et éviter les approches proposées qui, jusqu'alors, ne permettent pas de répondre entièrement à la problématique des interdépendances et des effets domino. D'autre part, mes travaux de recherche sont à tout moment confrontés à la réalité des RSV grâce aux partenariats étroits que le CRP a développés.

CHAPITRE 3 : TRAVAIL DE RECHERCHE

Nous tirons de la littérature différentes solutions de protection des RSV face aux effets domino. À ce jour, aucune d'entre elles ne donne de réponses concrètes à la problématique. Cependant, nous pouvons en tirer des idées intéressantes que nous allons réutiliser dans nos recherches.

Ainsi, la simplicité, la flexibilité et l'adaptabilité sont les trois points principaux de la méthodologie présentée dans ce document. En effet, les solutions complexes faisant appel à de lourdes simulations ou de puissants algorithmes ne réussissent pas à résoudre le problème.

Nous allons donc chercher à développer une méthodologie simple qui ne considérera que les informations pertinentes ce qui permettra de mettre de côté les autres afin d'alléger le modèle. Cette simplicité est d'autant plus importante que les partenaires du CRP souhaitent pouvoir implanter rapidement une méthode de modélisation des interdépendances pour prévenir des effets domino.

Ces travaux de recherche s'appuient sur ceux du CRP. Nous utilisons, donc, l'approche par conséquences développée par ce dernier. Ainsi, les résultats présentés dans ce document ont été obtenus en identifiant les conséquences de la défaillance d'un RSV et en remontant jusqu'aux causes. Nous avons, alors, pu modéliser les liens d'interdépendances qui transféraient la défaillance de RSV en RSV, ce qui nous a permis d'anticiper les effets domino qui en découlaient.

Nous avons accès à des données réelles ce qui permet de confronter les résultats à la réalité. Ceci est particulièrement important car nous nous rendons très souvent compte

que le passage de la théorie à la pratique engendre souvent des échecs. Ces données permettent donc de s'assurer de l'applicabilité de la méthodologie même si les cas réels réservent encore leur surprise dans la pratique.

3.1. Problématique

La problématique apparaît comme évidente à ce stade du document. Il faut, effectivement, trouver un moyen, une solution, une méthodologie pour protéger les réseaux de support à la vie interdépendants face aux effets domino. Cela permettra de rendre nos sociétés moins vulnérables et plus enclines à surmonter les catastrophes naturelles ou anthropiques.

Pour répondre à notre problématique, nous devons relever plusieurs défis. En effet, dans cette méthodologie, il est primordial de faire en sorte que tous les RSV se comprennent. Pour ce faire, ils devront posséder un langage commun. D'autre part, comme nous l'avons vu précédemment, la simplicité, la flexibilité et l'adaptabilité doivent être partie intégrante de la méthodologie.

Ensuite, la méthodologie doit prendre en compte la notion spatiale des RSV. Dans les travaux actuels, nous trouvons l'identification des interdépendances d'un côté et la localisation géographique de l'autre. La méthodologie présentée dans ce document va devoir conjuguer les deux. En effet, il paraît pertinent d'étudier l'état d'un RSV dans une zone géographique lorsque les ressources des autres RSV ne sont plus disponibles dans cette même zone.

Nous devons aussi nous assurer de préserver la confidentialité des informations appartenant aux RSV. En effet, que ce soit dû à leur caractère stratégique ou que ce soit

dû à leur sensibilité face à des actes de malveillance, les informations des RSV doivent absolument rester, au maximum, à l'interne. La méthodologie développée dans ces travaux doit impérativement prendre cela en considération.

Enfin, nous devons mettre en place des principes permettant de développer de nouveaux outils qui donne une réponse à la problématique tout en simplifiant les outils plus anciens développés par le CRP tels que les matrices d'interdépendances. Ces outils ont été particulièrement utiles pour mieux comprendre les interdépendances entre RSV; cependant, ils ne répondent plus au besoin présent de confidentialité des données des RSV.

3.2. Sujet de recherche

Le sujet découlant de cette problématique est la « modélisation des interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino ». Il s'agit donc de trouver une solution permettant de mettre en évidence les liens d'interdépendances entre les réseaux de support à la vie afin de pouvoir connaître à l'avance les effets domino qui pourront être engendrés.

Dans ces travaux de recherche, cette solution passe par la mise en place d'une méthodologie. Cette méthodologie va relever tous les défis mis de l'avant dans la partie précédente. Cela est, en effet, impératif car ils représentent la clef à une solution viable et applicable dans la réalité.

Le but est d'obtenir une méthodologie permettant de rassembler les informations pertinentes pour l'utilisation future d'outils permettant d'anticiper les effets domino. Ces outils ne seront pas développés dans nos travaux de recherches, mais les principes

permettant de les mettre en place seront donnés. Il sera alors possible, en définissant une situation d'étude, de connaître les liens d'interdépendances risquant de transférer une dégradation de RSV en RSV. Il ne restera plus qu'à protéger les RSV contre les effets domino identifiés.

3.3. Objectifs et hypothèses

3.3.1. Objectifs

Le but de ce projet de recherche est de **proposer une méthodologie permettant de modéliser les interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino.**

Pour atteindre cet objectif général, cette recherche a trois objectifs spécifiques :

Objectif 1 : Établir les principes d'une base de connaissances permettant le regroupement des informations pertinentes dans le respect de la confidentialité. Il sera nécessaire de faire ressortir les informations permettant l'identification des liens d'interdépendances.

Objectif 2 : Développer les principes de modélisation des liens d'interdépendances grâce aux informations de la base de connaissances. Cette modélisation prendra en considération la composante spatiale des RSV.

Objectif 3 : Mettre en place les principes d'identification et d'anticipation des effets domino découlant des liens d'interdépendances modélisés. La démarche se doit d'être simple, flexible et adaptable afin de permettre son implantation dans les différents réseaux.

3.3.2. Hypothèses

Cette recherche s'appuie sur deux hypothèses de travail :

Hypothèse 1 : l'approche par conséquences développée par le *Centre risque & performance* permet de répondre à la problématique des interdépendances entre les réseaux de support à la vie.

Hypothèse 2 : la modélisation des liens d'interdépendances permet d'identifier et d'anticiper les effets domino entre les différents intervenants d'un même espace de coopération.

Nous allons, maintenant, présenter les résultats des travaux de recherches effectués dans le cadre de la maîtrise recherche. Nous avons développé une méthodologie permettant de modéliser les interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino. Les parties suivantes décrivent la démarche à suivre pour parvenir aux résultats voulus.

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE

Cette méthodologie se décompose en quatre sous parties : l'identification, la classification, la création de la base de connaissances et les applications possibles. Les deux premières donnent les démarches pour rassembler les informations nécessaires à la base de connaissances. La troisième permet de créer cette base de connaissances, alors que la dernière, propose les applications qui peuvent être faites de cette base de connaissances.

4.1. Identification

4.1.1. Ressources utilisées

Dans un premier temps, il faut identifier les ressources utilisées par les différents RSV afin que chacun puisse définir ses besoins. Il faut, dans le même temps, identifier les différentes zones où ces ressources sont fournies par les RSV fournisseurs.

▪ Identification des ressources en fonction des utilisations faites par les autres RSV

Chaque RSV fournit une ressource qui sera utilisée par d'autres RSV. Suivant le type d'utilisation qui en est faite, une ressource peut avoir différentes caractéristiques.

Nous posons, ici, comme hypothèse que toute ressource utilisée doit être associée à un type d'utilisation. Ainsi, nous associerons à chaque ressource utilisée un type d'utilisation auquel se rattachent des unités ou des valeurs d'utilisations.

Nous pouvons dégager un tableau des principales utilisations possibles pour les ressources eau, gaz, électricité, télécoms et routes (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Utilisation des ressources

Ressource	Utilisation possible
Eau	Consommation
	Hygiène
	Protection contre les incendies
	Climatisation
	Chauffage
	Entretien
	Refroidissement d'équipements
	Fonctionnement de machinerie (force motrice)
Gaz	Chauffage
	Fonctionnement de machinerie
Électricité	Consommation (chauffage, éclairage, etc.)
	Fonctionnement d'équipements
Télécoms	Communication
	Transmission de données opérationnelle
Routes	Déplacement

Pour chaque utilisation de ces ressources, nous avons des caractéristiques différentes. Ainsi, l'eau aura, dans certains cas, des caractéristiques de potabilité et, dans d'autres cas, des valeurs de pression. Le gaz aura différentes valeurs de volume suivant l'utilisation qui en est faite. L'électricité sera fournie à différentes puissances suivant l'utilisateur. Les télécoms auront différentes valeurs de transfert d'informations. Enfin, les routes auront, elles aussi, différentes valeurs d'état suivant l'utilisation qui en est faite.

Exemple : une eau non potable pourrait être adéquate pour le service des incendies (bonne pression), même en étant impropre à la consommation.

▪ Identification des secteurs où les ressources sont fournies

Une fois l'identification faite des différentes ressources nécessaires aux RSV, ces derniers doivent leur associer des secteurs.

Les ressources sont utilisées sur les secteurs où les autres RSV les fournissent. Ainsi, nous allons, dans cette partie, demander aux RSV de déterminer les secteurs où ils fournissent leurs ressources.

Notre hypothèse, dans cette partie, est qu'une ressource fournie est toujours rattachée à un secteur de fourniture, le secteur d'alimentation (Sal).

Ces Sal doivent être identifiés par le RSV qui fournit la ressource. Cette sectorisation est un découpage de la zone d'étude (zone considérée dans le cadre d'une étude donnée).

Pour la plupart des RSV, ces secteurs sont déjà connus sous le nom de secteur d'alimentation (Sal). Ceux qui ne les ont pas encore définis, devront caractériser des Sal où la perte d'un élément important du RSV (ex : un équipement majeur) affecte le Sal dans son intégralité.

Exemple : dans le cas d'un réseau de télécommunications, nous pourrions avoir un secteur d'alimentation pour chaque partie de la zone d'étude desservie par un central téléphonique.

Dans la suite du document, nous parlerons de couples ressource utilisée – secteur d'alimentation (Ru/Sal) et de couples ressource fournie – secteur d'alimentation (Rf/Sal). En effet, les Ru sont utilisées sur des Sal et les Rf sont fournies, elles aussi, sur

des Sal. Ainsi, les Ru et les Rf sont indissociables des secteurs d'alimentation où elles sont, respectivement, utilisées et fournies.

4.1.2. Synthèse organisationnelle technique

Afin de construire la base de connaissances, les RSV doivent fournir des informations interprétées sur leur réseau. Pour ce faire, ils vont devoir opérer une synthèse organisationnelle technique (SOT), c'est-à-dire traduire le mécanisme de défaillance de leur réseau, qui a lieu à l'interne, lorsqu'un Ru/Sal n'est plus disponible (Figure 4.1). Ils vont devoir indiquer comment cette perte affecte leur réseau.

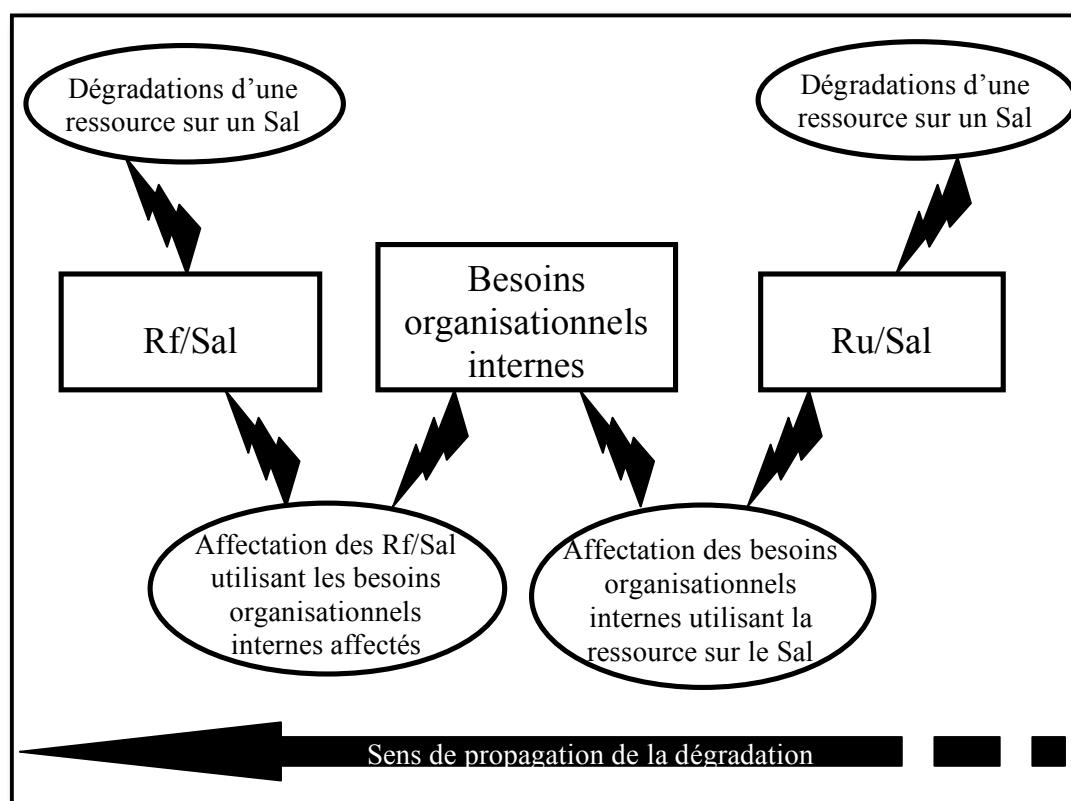


Figure 4.1 Mécanisme de dégradation

Ru/Sal : c'est le couple ressource utilisée – secteur d'alimentation. La disponibilité des différents Ru/Sal assure le fonctionnement des besoins organisationnels internes. En effet, ils fournissent ce que les besoins organisationnels internes nécessitent pour être opérationnels (exemple : eau, gaz, électricité, etc.).

Besoins organisationnels internes (BOI) : ils permettent au RSV de fournir sa ressource fournie sur ses différents secteurs d'alimentation. Ils assurent le fonctionnement du RSV (exemple : équipements, infrastructures, etc.). Ces besoins organisationnels peuvent être ponctuels (un centre opérationnel) ou étendus (un réseau filaire). Ils peuvent ou non appartenir à la zone d'étude.

Rf/Sal : c'est le couple ressource fournie – secteur d'alimentation. La fourniture des Rf/Sal est la mission du RSV (fonction pour laquelle le RSV est conçu).

Nous posons comme hypothèse, dans cette partie, que l'état du RSV est intimement relié à sa capacité à fournir ses Rf/Sal. Ainsi, un RSV dans un mauvais état ne sera plus en mesure de fournir ses Rf/Sal. Donner l'état du RSV revient, donc, à indiquer si les Rf/Sal sont bien fournis.

Le but de la SOT est, alors, de connaître l'état du RSV étudié. Cet état est dépendant de l'état des besoins organisationnels internes qui sont eux-mêmes dépendants de l'état des Ru/Sal. Lorsqu'un Ru/Sal est dégradé, il affecte directement les BOI des RSV qui l'utilisent. Les BOI affectent à leur tour l'état du RSV. Et, par hypothèse, le mauvais état du RSV implique une dégradation des Rf/Sal (Figure 4.1).

La SOT a pour but d'intégrer ce mécanisme de dégradation qui a lieu à l'interne du réseau afin d'obtenir une information interprétée donnant directement l'état du RSV en fonction de l'état des Ru/Sal. Ainsi, lors d'un cas d'étude où nous chercherons l'impact

d'un Ru/Sal défaillant, les RSV touchés nous donneront, directement, les conséquences sur leur fonctionnement.

Grâce à la SOT, le RSV va fournir une information interprétée nécessaire à la modélisation des interdépendances. Nous ne souhaitons pas collecter les caractéristiques internes de chaque réseau. Nous voulons simplement connaître comment un Ru/Sal défaillant va avoir un impact sur l'état du réseau et sur la fourniture du Rf/Sal.

4.2. Classification

4.2.1. État du RSV

Dans la partie précédente, ainsi que dans la revue de littérature, nous pouvons relever le besoin de mettre en place un système de mesure pour représenter l'état des RSV. En effet, nous posons comme hypothèse qu'un Ru/Sal est soit disponible soit non disponible. L'état des Ru/Sal est donc binaire. Cependant, ce n'est pas le cas des RSV qui peuvent se retrouver dans différents états. À terme, l'état du RSV permettra aux responsables en sécurité civile d'anticiper une possible dégradation d'un RSV pouvant affecter les autres RSV interdépendants.

Pour chaque Ru/Sal, le RSV doit déterminer l'impact de la perte de ce Ru/Sal sur son fonctionnement. Pour ce faire, nous définissons quatre états dans lesquels le RSV peut se retrouver. Ces états sont représentés par des couleurs (vert, jaune, orange et rouge). Dans le document noir et blanc, ces couleurs iront respectivement du blanc au noir (Figure 4.2).

Le RSV peut entrer dans chacun de ces états suivant la situation engendrée par la perte d'un Ru/Sal.

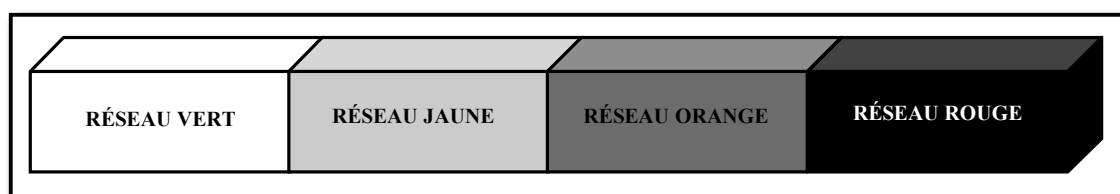


Figure 4.2 États des réseaux de support à la vie pour fournir un Rf/Sal

Chacun des états indique de quelle façon le RSV est dégradé.

Réseau vert : c'est l'état de référence. Le réseau fonctionne tout à fait correctement et le Rf/Sal étudié est bien fourni.

Réseau jaune : le réseau subit un impact, mais ne risque pas de perdre, dans un futur proche, le Rf/Sal étudié. L'impact a été pallié, et la solution, pour y pallier, est durable. Le maintien du RSV opérationnel est possible.

Réseau orange : le réseau subit un impact et risque de perdre, dans un futur proche, le Rf/Sal étudié. L'impact a été pallié, mais la solution, pour y pallier, n'est pas durable. Le RSV risque de ne pas pouvoir maintenir son état opérationnel.

Réseau rouge : le réseau subit un impact et il n'est plus en mesure de fournir le Rf/Sal étudié. Le RSV est arrivé dans un état tel qu'il n'est plus capable de fournir le Rf/Sal dans les conditions nécessaires au bon fonctionnement des autres RSV.

Ces états sont choisis afin de faire un parallèle avec les états d'alertes en mesures d'urgence. En effet, nous retrouvons les 4 mêmes couleurs d'états (vert, jaune, orange et rouge). Elles ne signifient pas exactement les mêmes choses, cependant, elles sont assez proches de celles de notre méthodologie. Ainsi, en mesures d'urgence, nous avons l'état

vert de référence où tout va bien. L'état jaune représente l'état de veille où les intervenants commencent à échanger des informations et sont vigilants à une possible dégradation de l'état. L'état orange représente l'état d'alerte où des mesures de protection sont mises en places et où le transfert d'informations est plus important. Enfin, l'état rouge représente l'état d'intervention où les mesures de protection planifiées sont mises en œuvre.

4.2.2. Classification des Ru/Sal

Un Ru/Sal défaillant peut avoir différents types d'impacts sur le RSV. Ce dernier pourra, effectivement, être plus ou moins affecté par la perte de ce Ru/Sal.

Cette partie va permettre de mettre en place trois catégories dans lesquelles le RSV doit classer les Ru/Sal qu'il utilise. Ces catégories sont les Ru/Sal critiques, nécessaires et supportifs.

À partir de cette classification, nous aurons toutes les informations nécessaires pour modéliser les interdépendances et nous pourrons définir les principes soutenant les outils de protection des RSV interdépendants face aux effets domino.

Des hypothèses vont permettre aux différents responsables de réseaux de classer les Ru/Sal dans les trois catégories.

Nous avons, dans un premier temps, des hypothèses que chacun des Ru/Sal doit vérifier :

- Une ressource n'appartient qu'à une catégorie (critique, nécessaire ou supportif);

- La classification dépend d'une situation étudiée. Nous devons déterminer un cas d'étude qui fixe des conditions telles que la période de l'année, la température, etc.

Nous avons ensuite des hypothèses propres à chaque groupe. Le RSV doit déterminer, pour chacun des Ru/Sal qu'il utilise, de quel groupe le Ru/Sal vérifie les hypothèses.

Ces dernières amènent une notion de durée qu'il faut préciser. En effet, suivant la catégorie à laquelle appartient le Ru/Sal, l'état du RSV va, ou non, évoluer en fonction du temps. Ainsi, nous aurons, pour les Ru/Sal critiques et nécessaires, à définir des durées, ou marges de manœuvre, avant que l'état évolue. Cette marge de manœuvre représente le temps dont dispose le RSV avant que son état bascule et que la fourniture du Rf/Sal ne soit plus possible.

- **Ru/Sal critique**

Hypothèses :

- Le Ru/Sal critique engendre, à lui seul, un fort impact sur l'état du RSV;
- Le Ru/Sal critique met directement le RSV en état orange pour une certaine durée;
- Le Ru/Sal critique finira par mettre le RSV en état rouge et, donc, par engendrer la perte du Rf/Sal.

La perte du Ru/Sal critique va engendrer une forte dégradation du réseau utilisateur et va, dans un futur proche, engendrer la perte du Rf/Sal. Il est donc impératif de le mettre en évidence afin de pouvoir éviter un tel cas. Les conséquences de la perte de ces Ru/Sal sont telles, que l'état du réseau passe directement en orange pendant la période où il

arrive à pallier au manque. Ces Ru/Sal critiques sont peu nombreux et leur identification est primordiale (Figure 4.3).



Figure 4.3 État du RSV engendré par un Ru/Sal critique défaillant

Exemple : Réseau de télécoms (dans ce bref exemple les Sal ne sont pas indiqués).

L'eau pour le refroidissement d'équipement est une ressource utilisée critique. En effet, nous aurons une dégradation immédiate du RSV si l'eau n'est plus fournie sur les secteurs d'alimentation où se situent les centraux téléphoniques. De plus, la ressource télécoms ne pourra plus être fournie dans un laps de temps court. L'état du réseau va donc varier de orange à rouge.

- **Ru/Sal nécessaire**

Hypothèses :

- Le Ru/Sal nécessaire engendre, à lui seul, un impact moyen sur l'état du RSV;
- Le Ru/Sal nécessaire met directement le RSV en état jaune pour une certaine durée;
- Le Ru/Sal nécessaire fait, ensuite, passer le RSV en état orange pour une autre période;

- Le Ru/Sal nécessaire finira par mettre le RSV en état rouge et, donc, par engendrer la perte du Rf/Sal étudié. Cet état du RSV peut arriver après une longue période.

Le Ru/Sal nécessaire aura un impact croissant sur le RSV. Son identification reste importante. En effet, dans un premier temps, le RSV subira un impact assez faible (état jaune). Cependant, après une période plus ou moins longue, l'état du RSV deviendra plus dégradé (état orange); pour enfin, arriver à un état rouge. Ce dernier état pourra apparaître après une longue période (Figure 4.4).

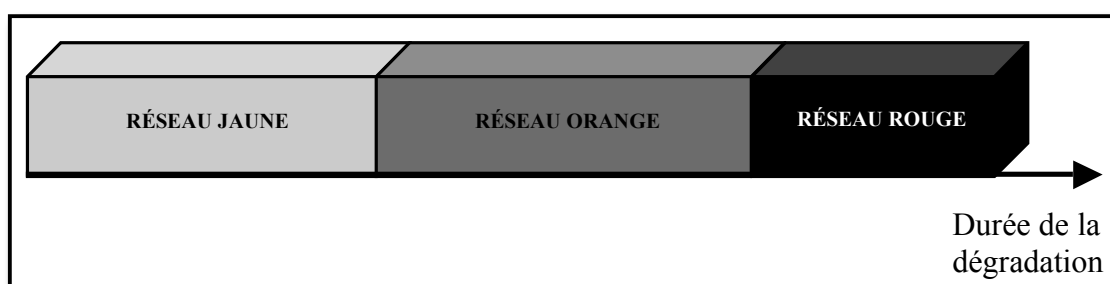


Figure 4.4 État du RSV engendré par un Ru/Sal nécessaire défaillant

Exemple : Réseau de télécoms (dans ce bref exemple les Sal ne sont pas indiqués). L'électricité pour le fonctionnement d'équipements est une ressource utilisée nécessaire. En effet, la perte de cette ressource pourra, dans un premier temps, être bien maîtrisée par l'utilisation de batteries. Passé une certaine période, les batteries ne seront plus en mesure de fournir l'énergie suffisante, et il faudra utiliser des génératrices. Enfin, il se peut que l'essence vienne à manquer, le RSV passe, alors, en rouge et il n'est plus capable de fournir sa ressource.

- **Ru/Sal supportif**

Hypothèses :

- Le Ru/Sal supportif engendre, à lui seul, un impact faible sur l'état du RSV;
- Le Ru/Sal supportif met directement le RSV en état jaune;
- Le Ru/Sal supportif n'engendra pas une dégradation plus importante du RSV que l'état jaune. L'état n'évoluera pas dans le temps.

Le Ru/Sal supportif n'engendrera pas une forte dégradation du RSV. L'identification de ce couple est moins déterminante que pour les deux autres types (nécessaire et critique). La perte d'un Ru/Sal supportif mettra le RSV dans un état faiblement dégradé (état jaune) et ce pour toute la durée où le Ru/Sal n'est plus accessible (Figure 4.5).

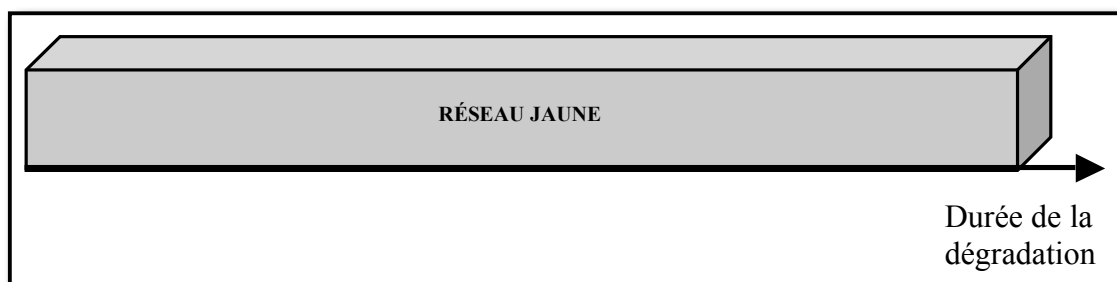


Figure 4.5 État du RSV engendré par un Ru/Sal supportif défaillant

Exemple : Réseau de télécoms (dans ce bref exemple les Sal ne sont pas indiqués).

L'électricité pour le chauffage est une ressource utilisée supportive. En effet, la perte de cette ressource n'aura qu'un impact faible sur le RSV. Cet état n'évoluera pas dans le temps et restera identique (état jaune). Le RSV pourra continuer à fonctionner sans problème.

Nous obtenons, donc, une classification des Ru/Sal en trois catégories. Ceci va permettre, dans la partie suivante, la construction d'une base de connaissances qui regroupera toutes les informations interprétées des RSV sous un format identique.

4.2.3. Les ressources alternatives

Nous remarquons dans la partie précédente que durant les états jaune et orange, le RSV trouve généralement un moyen pour pallier le manque de Ru/Sal.

Ce moyen peut être une compensation à l'interne du RSV ou l'utilisation de ressources alternatives (Ra) extérieures au RSV. Une ressource alternative est une ressource qui permet de compenser la perte d'une ressource utilisée (exemple : en situation de panne électrique, l'essence est utilisée pour fournir du courant au travers des génératrices). La Ra est elle aussi couplée à un Sal. Nous obtenons donc un couple ressource alternative – secteur d'alimentation (Ra/Sal).

Dans le cas où le RSV choisit de se servir de Ra/Sal pour pallier la perte d'un Ru/Sal, il est important d'identifier et de qualifier cette nouvelle utilisation. En effet, il faut s'assurer que ce Ra/Sal soit bien disponible durant la période où le RSV en a besoin. Ainsi, pour un Ru/Sal, le RSV devra, dans un premier temps, le classer en fonction de l'impact qu'il peut causer s'il est défaillant. Dans un deuxième temps, le RSV devra déterminer si un Ra/Sal est nécessaire, en cas de défaillance du Ru/Sal, et, si c'est le cas, caractériser ce besoin.

Nous obtiendrons donc d'un côté la classification du Ru/Sal, et, parallèlement, les besoins en Ra/Sal si le Ru/Sal devient défaillant. Nous verrons dans la partie 4.4. comment nous utiliserons cette information.

4.3. Création de la base de connaissances

À partir des parties précédentes, les différents RSV vont devoir fournir les informations interprétées pour la création de la base de connaissances. Cette base de connaissances est le regroupement des informations pertinentes et interprétées des RSV. Ces informations, répondant à la même problématique, seront, donc, compatibles.

Le but de cette base de connaissances est de faire le lien entre les Ru/Sal et les Rf/Sal. En effet, comme le montre la Figure 4.6, chaque RSV utilise des Ru/Sal pour réaliser sa mission sur différents Sal. La base de connaissance va donc répertorier ces liens. Les Ru/Sal et Rf/Sal sont représentés, sur la Figure 4.6, par une lettre définissant la Ru et un chiffre définissant le Sal (exemple : Ru/Sal \rightarrow E2, Ru \rightarrow E, Sal \rightarrow 2).

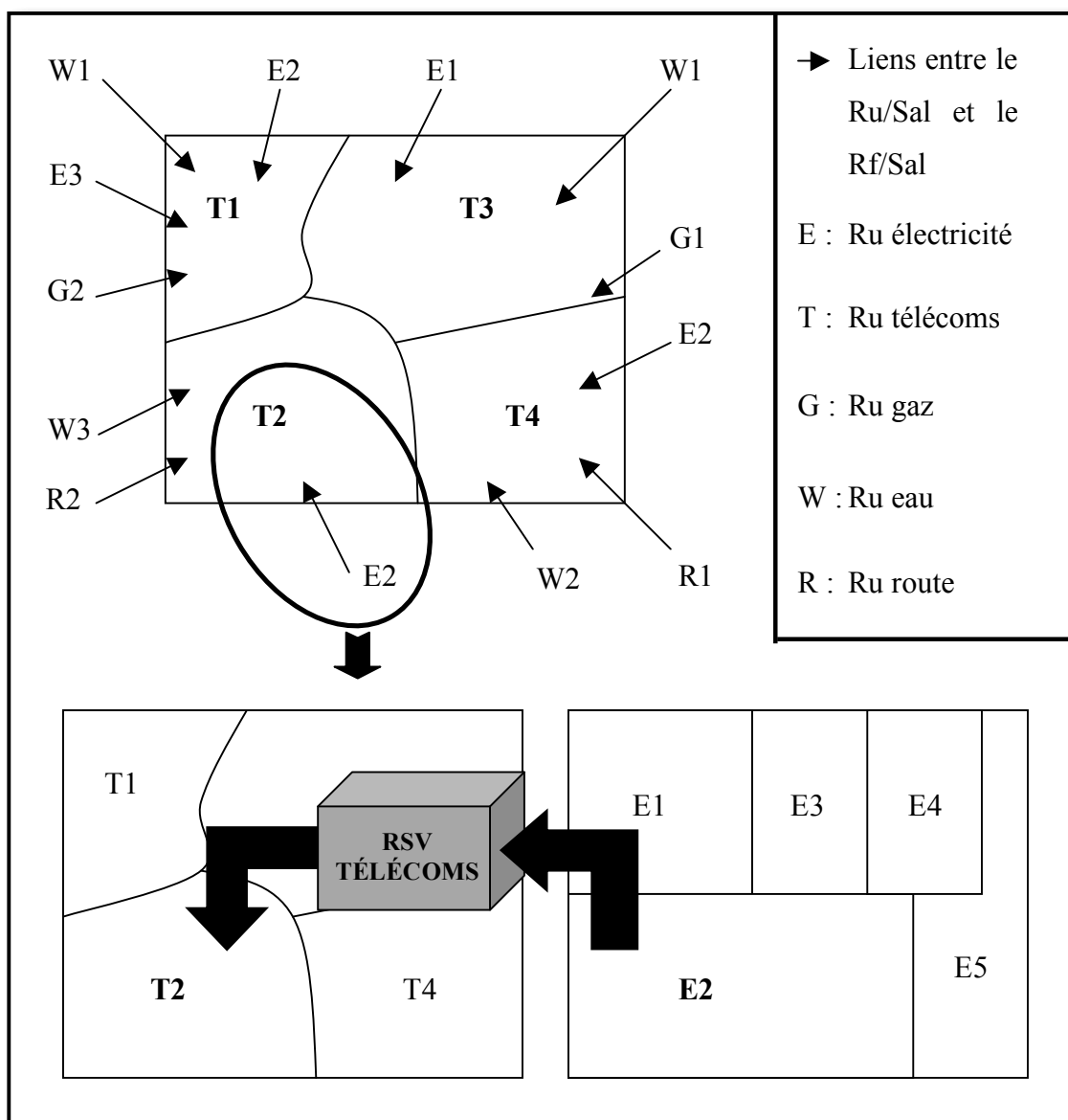


Figure 4.6 Exemple de liens entre Ru/Sal et Rf/Sal

Sur la Figure 4.6, la zone d'étude est divisée par le RSV de télécoms en 4 Sal. Nous pouvons voir que les quatre Rf/Sal du RSV de télécoms (T1, T2, T3 et T4) utilisent différent Ru/Sal provenant des autres RSV. Ceci met en évidence les liens entre les Ru/Sal et les Rf/Sal. Ces liens sont d'ailleurs explicités dans la partie inférieure de la

Figure 4.6 où l'un d'eux est précisé. Nous pouvons, ainsi, observer l'utilisation de E2 par le RSV télécoms pour fournir T2.

La base de connaissances est, donc, composée de la liste des Ru/Sal utilisés par chaque RSV pour fournir ses Rf/Sal. Elle contient aussi la classification des Ru/Sal qui représente les conséquences de la perte de ces Ru/Sal sur l'état du RSV. Pour ce faire, les Ru/Sal doivent être classés en trois catégories (critique, nécessaire et supportif) par les responsables de réseaux afin de faire correspondre le mieux possible, à leur réseau, la base de connaissances.

Ensuite, une fois les Ru/Sal classés selon les trois catégories, il faut déterminer les durées, ou marges de manœuvre, associées:

- Une durée pour les Ru/Sal critiques (durée de l'état orange).
- Deux durée pour les Ru/Sal nécessaires (durée des états jaune et orange).
- Pas de durée pour les Ru/Sal supportifs.

Nous allons voir dans cette partie quels résultats nous recherchons, quelle est la démarche à suivre et quelles informations viendront implémenter la base de connaissances. Afin d'illustrer cette partie, nous allons présenter, à la fin, un court exemple.

4.3.1. Résultats recherchés

Le but recherché est de construire une base de connaissances qui va rassembler toutes les informations nécessaires à la modélisation des interdépendances. Ces informations seront interprétées ce qui permet de garder uniquement les données pertinentes qui répondent à la problématique posée. D'autre part, ces informations respecteront la

confidentialité qui est particulièrement importante pour les RSV compte-tenu de leur caractère critique.

Nous allons pouvoir, grâce à cette base de connaissances, faire ressortir les impacts, ou conséquences, engendrés par la perte de Ru/Sal. Ceci va nous permettre de mettre en place des principes qui vont, dans un premier temps, aider à la modélisation des interdépendances et à l'anticipation des effets domino qui en résultent. Dans un deuxième temps, ces principes vont nous permettre de visualiser l'accroissement de vulnérabilité d'un RSV face à la dégradation de multiples Ru/Sal. Enfin, dans un troisième temps, les principes vont faire ressortir la problématique des Ra/Sal.

Pour cela, la base de connaissances doit nous donner l'impact de la perte des Ru/Sal sur les Rf/Sal. À partir de ces informations, il sera possible d'utiliser les principes mentionnés ci-dessus pour créer des outils de protection face aux effets domino.

Pour préserver la confidentialité mentionnée ci-dessus et pour éviter une mauvaise interprétation des informations des RSV, ce sont les responsables des réseaux qui vont donner les informations. En effet, la constitution interne des RSV ne sera pas partagée avec l'espace de coopération qui n'aura, donc, pas à interpréter ces informations ce qui pourrait causer des erreurs de jugement ou de compréhension.

Nous allons voir, maintenant, la démarche à suivre pour créer cette base de connaissances.

4.3.2. Démarche à suivre

Afin de créer la base de connaissances, les responsables des réseaux vont devoir fournir des informations interprétées qui permettront de construire la base de connaissances. Pour cela, ils devront s'appuyer sur les parties précédentes afin de fournir ces informations. Les responsables en sécurité civile connaîtront ainsi avec précision les conséquences de la perte des Ru/Sal sur l'état des RSV.

Pour ce faire, trois étapes (composées de deux sous étapes), décrites ci-dessous, sont nécessaires (Figure 4.7) :

- Étape 1.1. : les responsables de RSV doivent mettre en place les cartographies représentant les Sal de leur réseau.

Étape 1.2. : les responsables de RSV transmettent la cartographie des Sal de leur réseau aux autres RSV.

- Étape 2.1. : les responsables de RSV doivent effectuer une synthèse organisationnelle technique de leur réseau.

Étape 2.2. : les responsables de RSV doivent identifier les Ru/Sal qu'ils utilisent; ceci grâce aux cartographies des Sal des autres RSV.

- Étape 3.1. : les responsables de RSV doivent caractériser la criticité du besoin Ru/Sal pour fournir leurs Rf/Sal.

Étape 3.2. : les responsables de RSV doivent associer les marges de manœuvre rattachées aux impacts dus à la perte de Ru/Sal..

Il en ressort les informations pour implémenter la base de connaissances.

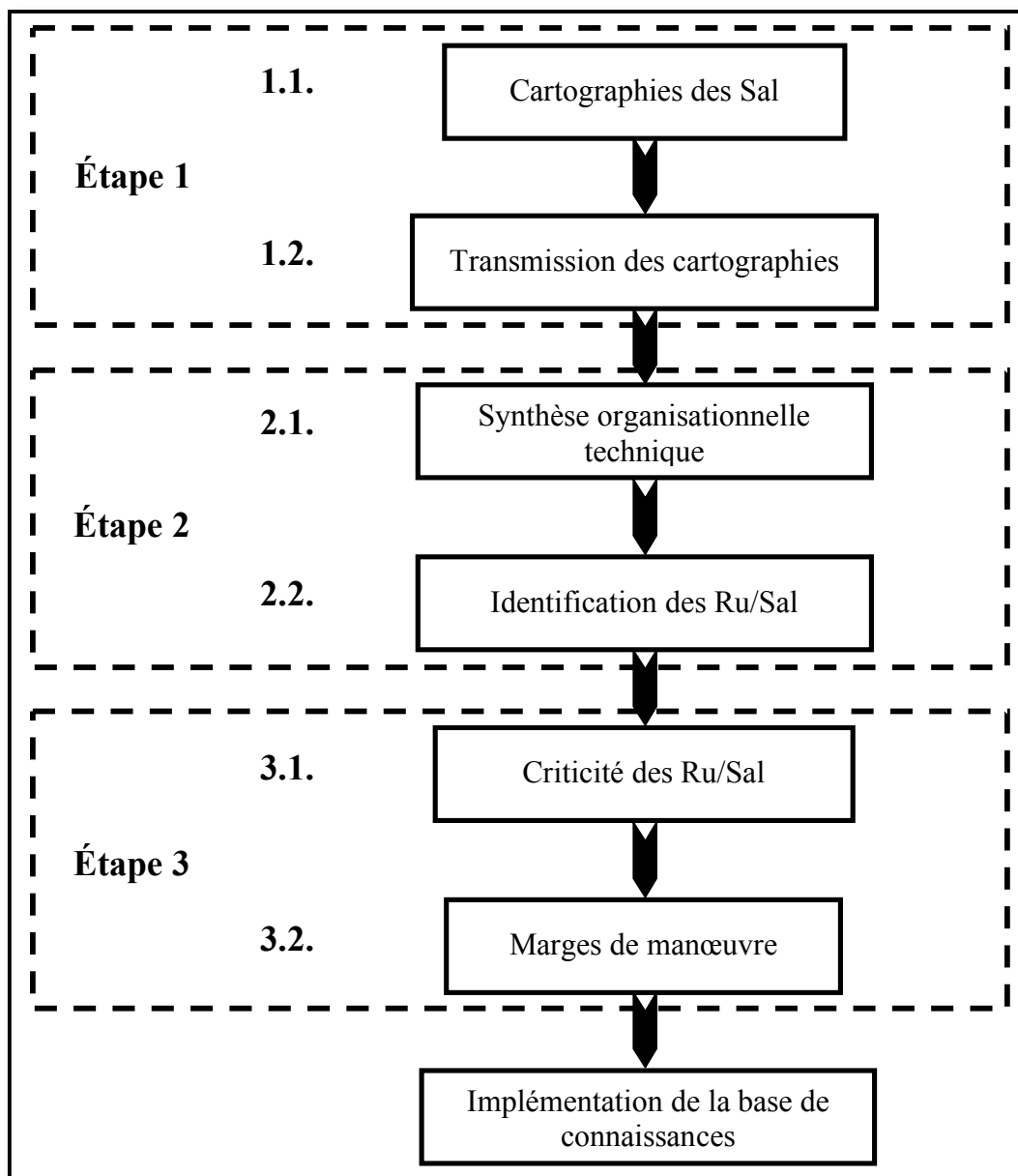


Figure 4.7 Démarche de création de la base de connaissances

▪ **Étape 1 : Mise en place et transmission des cartographies des Sal**

Lors de l'**étape 1.1., cartographies des Sal**, il faut que chaque RSV fournisse une cartographie avec ses secteurs d'alimentation. À partir de celles-ci les autres RSV pourront identifier quels Ru/Sal ils utilisent. Elles vont, donc, permettre aux RSV de donner les Ru/Sal nécessaires à leur fonctionnement, et ce, sans donner une information géoréférencée de leurs besoins organisationnels internes.

Le type de résultat recherché est représenté en Figure 4.8.

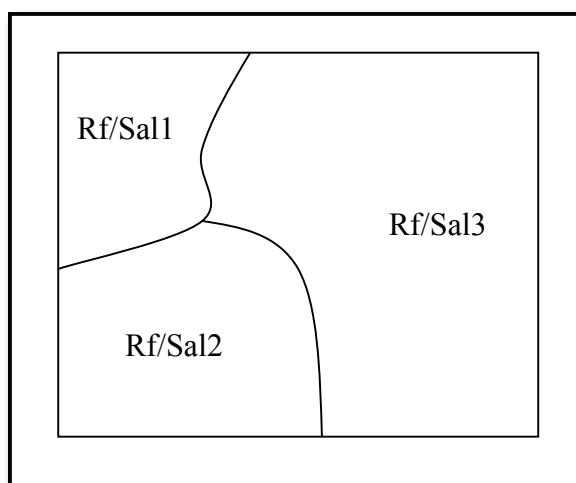


Figure 4.8 Exemple d'une cartographie de Sal

Le rectangle représente la zone d'étude et les Sal1, Sal2 et Sal3 sont les trois secteurs d'alimentation, séparant la zone d'étude, où le RSV étudié fournit sa Rf.

L'**étape 1.2., transmission des cartographies**, a pour but de transférer ces cartographies à tous les RSV. Chaque RSV transmettra, ainsi, sa cartographie aux autres RSV afin qu'ils puissent identifier leurs besoins en Ru/Sal.

▪ **Étape 2 : les ressources utilisées sur les secteurs d'alimentation**

Dans l'étape **2.1., synthèse organisationnelle technique**, lorsque les RSV reçoivent les cartographies représentant les secteurs d'alimentation des autres RSV, les responsables doivent effectuer la SOT de leur réseau.

Dans l'étape **2.2., identification des Ru/Sal**, à partir des cartographies des Sal des autres RSV et de sa SOT, le responsable de réseau doit identifier quelles sont les Ru qu'il utilise et à quels endroits : quels sont les Ru/Sal dont il a besoin.

Pour obtenir ce résultat, il pourra superposer les cartographies des autres RSV avec les siennes afin d'identifier ses Rf/Sal affectés par la perte de Ru/Sal. Deux types de superpositions sont envisageables. La superposition des cartographies des Sal permet d'étudier le taux de recouvrement d'un secteur d'alimentation du RSV par les Ru/Sal des autres RSV. La superposition des cartographies des Sal des autres RSV avec la cartographie des BOI du RSV permet, quant à elle, de repérer des BOI excentrés nécessaires à des Rf/Sal.

D'autre part, les RSV doivent associer aux Ru/Sal un type d'utilisation de la Ru. Ainsi, les membres de l'espace de coopérations doivent se réunir pour définir les différents types d'utilisation. Ils devront, donc, compléter ou ajuster le Tableau 4.1 vu précédemment afin qu'il corresponde aux types d'utilisations des Ru/Sal des RSV de l'espace de coopération. Ensuite, les RSV pourront définir pour chaque Ru/Sal qu'ils utilisent, le type d'utilisation qui en est fait. Le Tableau 4.1 sera dynamique et évoluera avec l'entrée de nouveaux types d'utilisations.

Un exemple du résultat recherché est présenté dans le Tableau 4.2. Ici, on s'intéresse à l'utilisation de l'électricité (E), de l'eau (W) et des routes (R) par le Sal 2 du RSV

télécoms (T). Les Sal, représentés par des chiffres, dépendent du RSV auquel ils sont rattachés. Ainsi, le Sal 2 des télécoms (T2) est différent du Sal 2 de l'électricité (E2).

Tableau 4.2 Exemple d'une base de connaissances partielle

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru
T2	E2	Fonctionnement d'équipement
	W3	Consommation
	R2	Déplacement

La deuxième ligne du Tableau 4.2 nous indique que le Sal 2 du RSV télécoms sera affecté par la perte de la Ru électricité sur le Sal 2. Nous savons aussi l'utilisation qui est faite de E2. Ainsi, il faudra vérifier que E2 ne soit plus opérationnelle pour le fonctionnement d'équipement afin de le déclarer hors-service pour T2.

Les responsables devront prendre en considération une situation donnée (période de l'année, condition météorologique, etc.). Ils devront donner des informations interprétées répondant à une problématique particulière. Une colonne pourra être rajoutée à la base de connaissances afin de définir la situation considérée. Par soucis de simplification, nous ne rajouterons pas cette colonne dans la suite du document.

▪ **Étape 3 : les impacts dus à la perte des Ru/Sal**

Dans l'étape 3.1., **criticité des Ru/Sal**, les responsables des réseaux doivent identifier quels impacts la perte de chaque Ru/Sal engendre sur l'état de leur réseau. Ainsi, pour chaque Ru/Sal, les responsables devront donner, en fonction du type d'impact, la catégorie à laquelle le Ru/Sal appartient (critique, nécessaire ou supportif). À chacune de ces catégories est associée des caractéristiques que les responsables de réseaux doivent

retrouver dans les Ru/Sal. Les responsables devront, donc, s'appuyer sur les définitions des catégories vues préalablement.

Dans l'étape **3.2., marges de manoeuvre**, suivant la catégorie des Ru/Sal, les responsables de réseaux associeront la ou les durées nécessaires. En effet, à chaque catégorie de Ru/Sal (critique, nécessaire et supportif) est associée respectivement une, deux et aucune durées appelées marges de manoeuvre. Ces marges de manoeuvre permettent de connaître le temps disponible avant que la perte d'un Ru/Sal affecte plus l'état du RSV.

Cette dernière étape permet d'achever la collecte d'informations pour l'implémentation de la base de connaissances. La partie suivante nous montre le résultat obtenu.

4.3.3. Implémentation de la base de connaissances

Tous les Ru/Sal sont, alors, répertoriés dans la base de connaissances. Les responsables leur associent le type d'utilisation, la catégorie à laquelle chacun appartient (critique, nécessaire ou supportif), ainsi que la marge de manoeuvre qui s'y rattache. Nous obtenons ainsi une base de connaissances regroupant toute l'information nécessaire pour la modélisation des interdépendances.

Cette base de connaissances est sous la forme d'un tableau (Tableau 4.3). Nous approfondissons, ici, l'utilisation de l'électricité (E), de l'eau (W) et des routes (R) par le Sal 2 du RSV télécoms (T).

Tableau 4.3 Exemple d'une base de connaissances

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T2	E2	Fonctionnement d'équipement	Critique	5h
	W3	Consommation	Nécessaire	6h 8h
	R2	Déplacement	Supportif	/

La deuxième ligne du Tableau 4.3 renseigne, maintenant, sur la classification du Ru/Sal E2 : critique. Ainsi, si l'électricité n'est plus disponible sur le Sal 2 (si E2 est hors-service pour le fonctionnement d'équipement), l'état du RSV télécoms sur le Sal 2 passera immédiatement en orange pour une durée de 5h avant de passer en rouge. L'état rouge indiquant que le T2 sera, à son tour, hors-service.

Nous rappelons, là encore, que le Sal 2 du RSV télécoms est différent du Sal 2 du RSV électricité.

4.3.4. Exemple

Afin de mieux comprendre le travail pour obtenir la base de connaissances, nous allons voir dans cette partie un court exemple basé sur un réseau de télécoms utilisateur d'électricité.

- **Étape 1**

Les responsables des RSV de télécommunications et d'électricité donnent les cartographies représentant les secteurs d'alimentation de leur réseau (Figure 4.9).

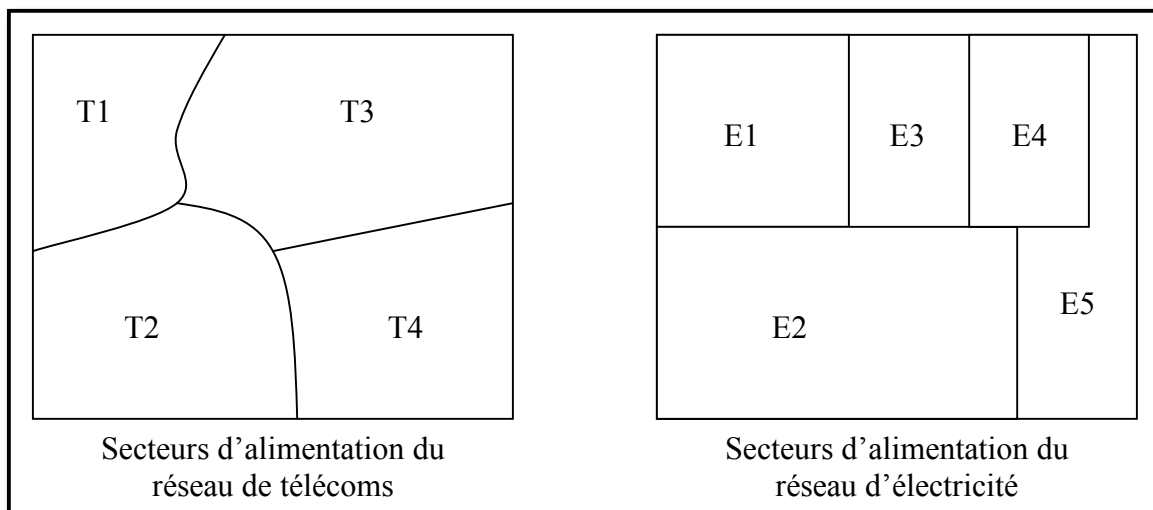


Figure 4.9 Secteurs d'alimentation des RSV étudiés

Les deux grands rectangles représentent la zone d'étude qui est divisée en secteurs d'alimentation. Les « T » suivis d'un chiffre sont les Rf/Sal du réseau de télécoms et les « E » suivis d'un chiffre sont les Rf/Sal du réseau d'électricité.

▪ Étape 2

Le réseau de télécoms étant le RSV utilisateur dans cet exemple, c'est à lui d'effectuer une SOT de son réseau afin d'identifier ses Ru/Sal.

Ainsi, le responsable du réseau de télécoms détermine pour chaque Rf/Sal du RSV électricité, si c'est un Ru/Sal qu'il utilise. Si c'est le cas, il identifie quels sont ses Rf/Sal (T1, T2, T3 ou T4) qui pourront subir un impact lors de la perte de ces Ru/Sal (E1, E2, E3, E4 et E5).

Les membres de l'espace de coopération se sont rassemblés et ont déterminé deux types d'utilisation pour l'électricité : l'électricité pour le fonctionnement d'équipement et l'électricité pour la consommation. Les Ru/Sal (E1, E2, E3, E4 et E5) sont, alors, rattachée, à chaque fois qu'ils sont utilisés, à un type d'utilisation.

Le responsable du RSV utilisateur peut effectuer, pour aider à l'identification des Ru/Sal, une superposition de cartographies, telle que celle des Sal présentée en Figure 4.10.

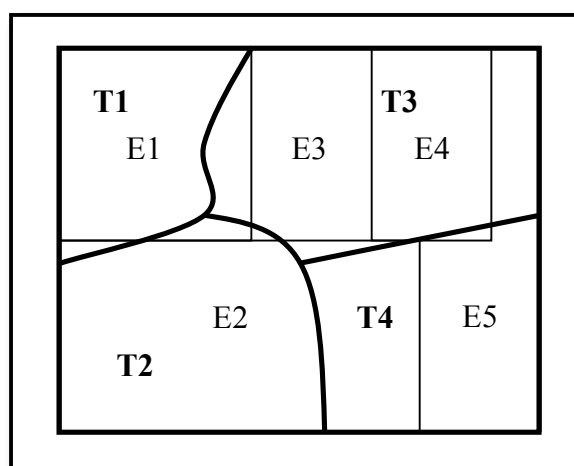


Figure 4.10 Superposition des cartographies des RSV étudiés

Nous voyons par cette superposition que le Rf/Sal T2 est couvert par les Ru/Sal E1, E2 et E3. Ainsi, il est fort probable que la perte de l'électricité sur l'un de ces secteurs (1, 2 et 3) affecte le RSV télécoms sur le Sal 2.

Il serait pertinent de faire une superposition de la cartographie des Sal du RSV électricité avec la cartographie des BOI du RSV télécoms. Ainsi, ce dernier pourra identifier les BOI affectés par la perte des Ru/Sal E1, E2, E3, E4 et E5. Grâce à la SOT faite

précédemment, le RSV télécoms pourra, donc, en déduire quel Rf/Sal T1, T2, T3 ou T4 sera affecté par la perte d'un de ces BOI.

Il en ressort, dans cet exemple, les besoins exprimés dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Base de connaissances partielle du RSV télécoms

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru
T1	E1	Fonctionnement d'équipement
	E3	Consommation
	E5	Consommation
T2	E1	Fonctionnement d'équipement
	E2	Fonctionnement d'équipement
	E3	Fonctionnement d'équipement
T3	E1	Consommation
	E2	Consommation
	E3	Consommation
	E4	Fonctionnement d'équipement
	E5	Fonctionnement d'équipement
T4	E2	Consommation
	E4	Consommation
	E5	Fonctionnement d'équipement

La deuxième ligne du Tableau 4.4 nous indique que le Sal 1 du RSV télécoms sera affecté par la perte du Ru/Sal E1. Nous connaissons aussi l'utilisation qui est faite de E1. Ainsi, il faudra vérifier que E1 est hors-service pour le fonctionnement d'équipement afin de déclarer l'électricité comme non disponible sur son Sal 1.

Nous pouvons observer dans le Tableau 4.4 trois résultats qui méritent d'être précisés. En effet, malgré une superposition de E2 et T1 (Figure 4.10), il n'y a pas d'utilisation de E2 par T1. Dans cet exemple, ceci s'explique par l'absence complète de BOI du réseau de télécoms, sur le Sal 2 du RSV électricité, pour fournir T1.

D'autre part, nous remarquons que le RSV télécoms utilise E3 et E5 pour fournir T1. Or, la superposition des secteurs d'alimentation ne nous montre pas de partie commune entre ces Sal. Dans cet exemple, cela s'explique par la présence de BOI du réseau de télécoms qui utilisent E3 et E5 et qui sont nécessaires pour fournir T1.

Cela démontre bien l'importance d'effectuer une superposition des cartographies des Sal des autres RSV avec la cartographie des BOI (équipement, infrastructures, etc.) du RSV étudié. Le RSV aura, ainsi, la certitude de prendre en compte tous ses BOI.

Dans cet exemple, nous obtenons une superposition de cartographies telle que présentée en Figure 4.11.

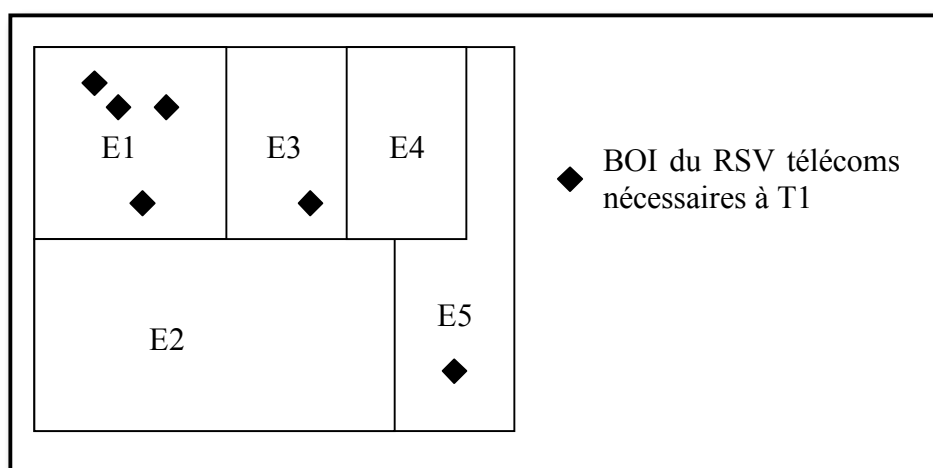


Figure 4.11 Superposition des cartographies des BOI nécessaires à T1 avec les Sal du RSV électricité

▪ Étape 3

Dans cette dernière étape, le responsable du RSV télécoms doit déterminer les impacts engendrés par la perte de chaque Ru/Sal. En effet, il doit classer les Ru/Sal en critiques, nécessaires et supportifs, et leur associer des marges de manœuvre. Suivant la catégorie, nous connaissons l'impact engendré par la perte du Ru/Sal.

Pour déterminer cela, le responsable de réseau doit s'appuyer sur les parties précédentes afin de bien comprendre les différentes catégories de Ru/Sal.

Nous allons, ainsi, obtenir toutes les informations nécessaires à la base de connaissances qui va, ensuite, nous permettre de modéliser les interdépendances et d'anticiper les effets domino. Il sera alors possible d'énoncer les principes sous-tendant les outils tels que le tableau de bord évolutif qui montre l'état des RSV sur les secteurs d'alimentation lorsqu'ils subissent des impacts dus à la perte de Ru/Sal.

Le résultat de cette étape est le Tableau 4.5 qui constitue une partie de la base de connaissances. En effet, il restera à déterminer la partie de la base de connaissance où le RSV électricité est utilisateur.

Tableau 4.5 Base de connaissances du RSV télécoms

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T1	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	4h 10h
	E3	Consommation	Supportif	/
	E5	Consommation	Supportif	/
T2	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	7h 5h
	E2	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	2h 8h
	E3	Fonctionnement d'équipement	Critique	6h
T3	E1	Consommation	Supportif	/
	E2	Consommation	Supportif	/
	E3	Consommation	Supportif	/
	E4	Fonctionnement d'équipement	Critique	4h
	E5	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	9h 6h
T4	E2	Consommation	Supportif	/
	E4	Consommation	Supportif	/
	E5	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	4h 10h

Si nous analysons la deuxième ligne du Tableau 4.5, nous remarquons, maintenant, que E1 appartient à la catégorie nécessaire pour T1. Ainsi, si E1 est hors-service, l'état du RSV télécoms sur son Sal 1 va passer immédiatement au jaune pour une durée de 4h, puis devenir orange pour une durée de 10h, avant de devenir rouge. L'état rouge indiquant que T1 est hors-service.

4.4. Applications possibles

Nous allons maintenant voir quelles sont les applications possibles de la base de connaissances développées avec cette méthodologie.

À partir de ce regroupement d'informations interprétées des différents RSV, nous allons présenter les principes qui permettront la mise en place d'outils de protection des RSV interdépendants face aux effets dominos. Pour cela, les deux premières parties vont nous aider à modéliser les interdépendances et anticiper les effets domino qui en résultent. La troisième partie, va nous permettre de visualiser l'accroissement de vulnérabilité d'un RSV face à la dégradation de Ru/Sal multiples. Il est, effectivement, pertinent de se demander s'il y aura un accroissement de vulnérabilité du RSV lorsque plus d'un Ru/Sal est hors-service. Enfin, la dernière partie va faire ressortir la problématique des ressources alternatives.

Dans un contexte de protection face aux effets domino, chacune de ces applications pourra être utilisée pour mettre en place des outils pour une phase de planification ou pour une modélisation en temps réel. Dans le premier cas, une situation sera posée et nous étudierons les conséquences qui en découlent. Dans le second cas, nous utiliserons les données qui apparaissent en temps réel. Ces outils devront être développés dans de futurs travaux.

Afin de fournir une interface graphique, nous allons associer aux Ru/Sal dégradés les couleurs correspondant aux catégories auxquelles ils appartiennent (critique, nécessaire ou supportif). Les marges de manœuvre associées aux Ru/Sal dans la base de connaissances permettront de fixer l'échelle de temps. Ainsi, lorsqu'un Ru/Sal est dégradé, le RSV qui l'utilise pour fournir un Rf/Sal se verra affecté d'une couleur

indiquant son état de fonctionnement. Les responsables en sécurité civile auront, ainsi, un tableau de bord leur permettant d'anticiper les effets domino.

Un exemple est présenté dans le Tableau 4.6, avec E1 qui n'est plus disponible.

Tableau 4.6 Exemple d'une ligne de la base de connaissances

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T1	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	4h 10h

La Figure 4.12 montre l'état du RSV télécoms sur le Sal 1 en fonction du temps.

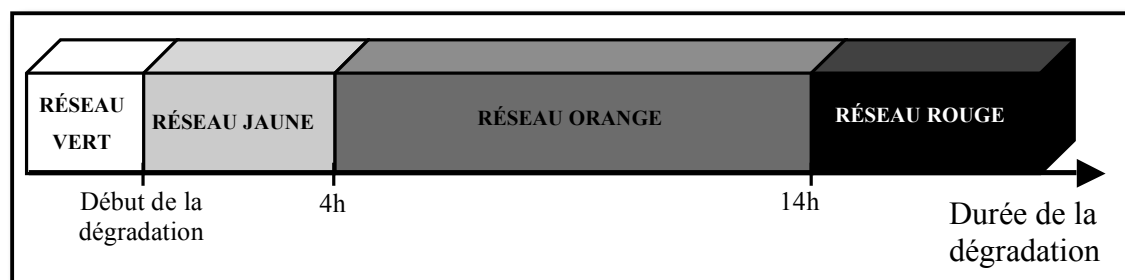


Figure 4.12 Représentation graphique d'une ligne de la base de connaissances

4.4.1. Modélisation des interdépendances

Cette partie doit nous aider à modéliser les interdépendances ce qui permettra de visualiser les effets domino qui en résultent. Nous allons donc voir comment, à partir de notre base de connaissances, il est possible de mettre en place cette modélisation.

La base de connaissances fait ressortir les impacts, dus à la perte de Ru/Sal, sur l'état du réseau. À partir de ces données, il est donc possible de connaître le lien entre les Ru/Sal et l'état des RSV et ce, avec une base de connaissances composée d'un minimum d'informations.

Dans cette partie, nous modélisons les interdépendances qui interviennent à la suite d'une dégradation d'un Ru/Sal. Nous cherchons donc à savoir, lorsqu'un Ru/Sal est hors-service, qui il va affecter, c'est-à-dire quels liens d'interdépendances vont faire que cette dégradation va être transmise à un autre RSV utilisateur de ce Ru/Sal. Nous cherchons, d'autre part, à savoir quelle est la marge de manœuvre à notre disposition avant que le RSV utilisateur ne soit affecté. Enfin, nous voulons connaître les dégradations en cascades qui vont en découler, c'est-à-dire quel RSV sera affecté par le RSV affecté par la première dégradation.

Nous pourrions, ainsi, connaître les RSV qui risquent de subir des impacts si le problème persiste. Il sera possible de les prévenir pour qu'ils puissent mettre en place les mesures nécessaires afin de se protéger de la perte de Ru/Sal à venir.

Nous allons maintenant voir comment cette modélisation va être possible. La base de connaissances fait ressortir les impacts des Ru/Sal sur l'état des RSV. Grâce à cela, il est très simple de connaître les RSV touchés par la perte d'un Ru/Sal. Il suffit, en effet, de chercher dans la base de connaissances les Rf/Sal qui ont besoin du Ru/Sal pour être fournis. Nous obtenons alors une liste de Rf/Sal, le type d'impact suivant la catégorie à laquelle appartient le Ru/Sal (critique, nécessaire ou supportif), et les marges de manœuvres associées.

Nous pouvons, ensuite, voir quels Rf/Sal vont entraîner des effets domino. Pour cela, il suffit de sélectionner tous les Rf/Sal qui passeront en rouge lors de la durée de l'étude.

En effet, cela indique qu'ils seront à leur tour hors-service et qu'ils affecteront d'autres RSV. La modélisation peut, alors, continuer avec la recherche des nouveaux Rf/Sal affectés par les nouveaux Ru/Sal sélectionnés (Rf/Sal mis hors-service par la première dégradation).

La modélisation s'arrête, selon le choix des utilisateurs, lorsque la durée d'étude préalablement établie arrive à sa fin (par exemple, 12h si nous voulons étudier les effets domino à court terme ou 72h si nous voulons les étudier à moyen terme) ou lorsque la situation revient à la normale. Nous aurons, donc, une modélisation des effets domino à court, moyen ou long terme.

La Figure 4.13 montre la démarche permettant cette modélisation des interdépendances.

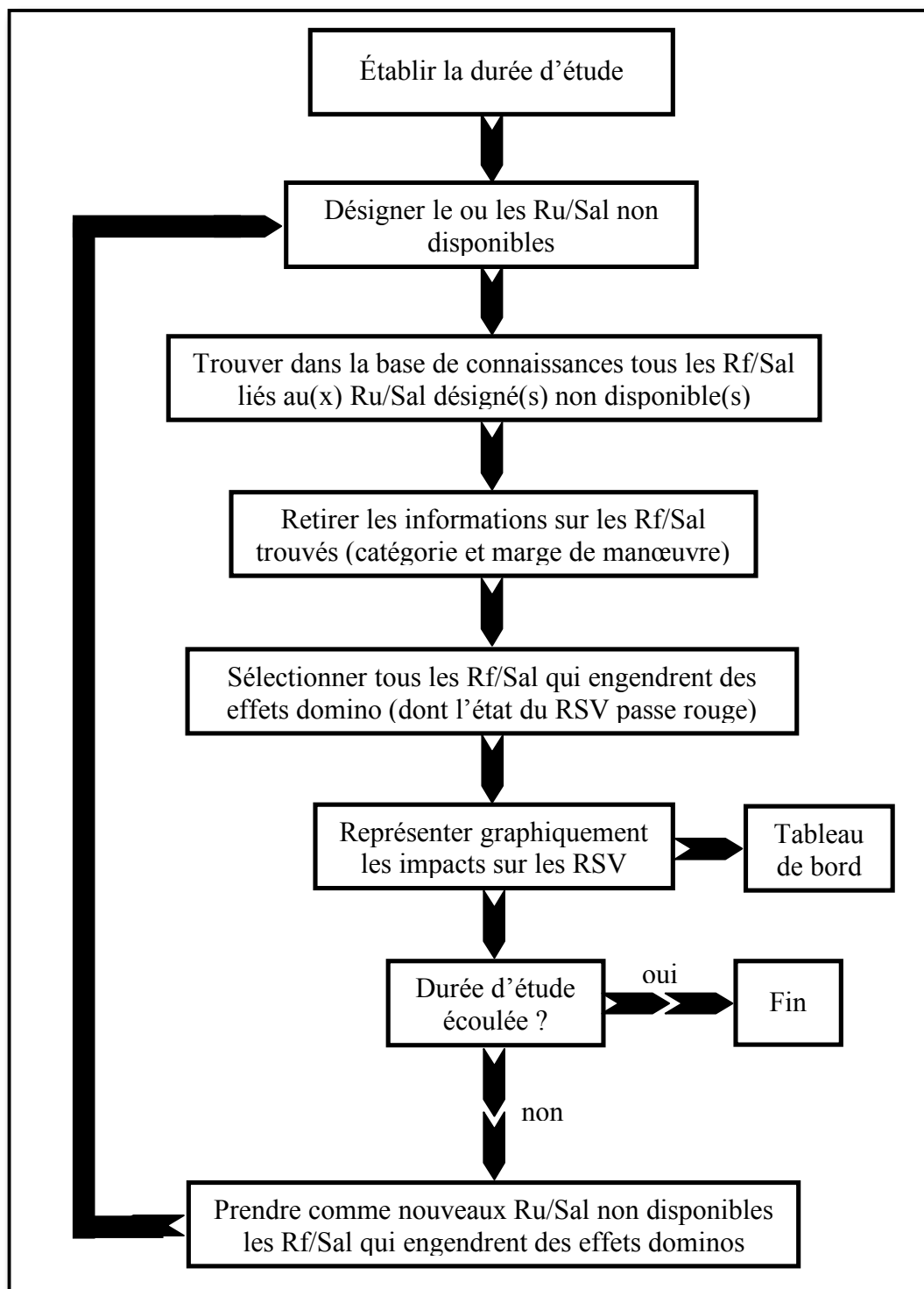


Figure 4.13 Démarche de modélisation des interdépendances

Nous allons maintenant voir comment cette modélisation se met en place dans la pratique. Pour ce faire, nous allons présenter un exemple avec trois réseaux (RSV de télécoms, RSV d'électricité et RSV d'eau potable). Les tableaux composant la base de connaissances des trois RSV sont représentés dans Tableaux 4.7, 4.8 et 4.9.

Cet exemple montre comment la base de connaissances pourra être utilisée. Les données utilisées dans cet exemple sont issues du partenariat que le CRP a avec divers RSV. Par conséquent, les résultats de cette modélisation ne sont pas issus d'un cas pratique.

Tableau 4.7 Réseau de télécommunications

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T1	E3	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	6h 6h
	W3	Refroidissement d'équipement	Critique	4h
T2	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	7h 5h
	W3	Consommation	Supportif	/
T3	E2	Consommation	Supportif	/
	W2	Refroidissement d'équipement	Critique	13h

Tableau 4.8 Réseau d'électricité

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
E1	T1	Transmission de données opérationnelles	Nécessaire	4h 10h
	W2	Consommation	Supportif	/
E2	T1	Communication	Supportif	/
	W1	Consommation	Supportif	/
E3	T2	Communication	Supportif	/
	W3	Consommation	Supportif	/
E4	T2	Communication	Supportif	/
	T3	Communication	Supportif	/
	W2	Refroidissement d'équipement	Nécessaire	6h 5h

Tableau 4.9 Réseau d'eau potable

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
W1	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	4h 8h
	E3	Consommation	Supportif	/
W2	T1	Transmission de données opérationnelles	Nécessaire	7h 8h
	T3	Communication	Supportif	/
W3	E2	Fonctionnement d'équipement	Critique	7h
	T1	Communication	Supportif	/

Comme dans les parties précédentes, les Ru/Sal et Rf/Sal sont représentés par une lettre désignant la ressource et un chiffre désignant le Sal. Ainsi, le « E » correspond à l'électricité, le « T » correspond aux télécoms et le « W » correspond à l'eau potable.

Nous allons, dans un premier temps, définir un Ru/Sal comme défaillant afin de pouvoir modéliser les interdépendances. Nous choisissons, arbitrairement, de chercher les effets domino qui apparaissent dans un délai de 36h. Le Ru/Sal initialement défaillant est E2. C'est donc l'électricité sur son Sal 2.

Dans cet exemple, nous ne prendrons pas en considération le type d'utilisation. Pour intégrer ce dernier, nous devrions vérifier, à chaque fois qu'un Ru/Sal est hors-service, s'il l'est pour un type d'utilisation ou pour tous.

D'après la base de connaissances, nous avons deux Rf/Sal (T3 et W3) qui utilisent ce Ru/Sal. Le Tableau 4.10 fait ressortir ces informations.

Tableau 4.10 Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de E2

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T3	E2	Consommation	Supportif	/
W3		Fonctionnement d'équipement	Critique	7h

Les RSV de télécoms et d'eau potable vont donc subir un impact. Grâce à la base de connaissances, nous savons que la perte d'électricité sur son Sal 2 n'aura pas un impact suffisant sur T3 pour engendrer des effets domino (vu que l'état rouge ne sera pas atteint pour un Ru/Sal supportif). Nous savons, par contre, que cette dégradation va engendrer une perte d'eau potable sur son Sal 3 dans 8h.

Cette information peut être présentée au travers d'une interface graphique (Figure 4.14) qui peut servir de tableau de bord.

Durée	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Rf/Sal																		
E2	RÉSEAU ROUGE																	
W3																		

Figure 4.14 Tableau de bord dû à la perte de E2

Nous avons désormais une nouvelle donnée, la ressource eau potable ne sera plus disponible dans 8h sur le Sal 3.

D'après la base de connaissances, nous avons trois Rf/Sal (T1, T2 et E3) qui utilisent ce Ru/Sal W3 (Tableau 4.11).

Tableau 4.11 Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de W3

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T1	W3	Refroidissement d'équipement	Critique	4h
T2		Consommation	Supportif	/
E3		Consommation	Supportif	/

Les RSV de télécoms, et d'électricité vont donc subir un impact. Grâce à la base de connaissances, nous savons que cette dégradation va engendrer des effets domino seulement sur T1. Nous aurons, donc, une perte de télécoms sur son Sal 1 5h après la perte de W3.

Le tableau de bord, mis à jour, est représenté en Figure 4.15.

Durée	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
E2	RÉSEAU ROUGE																	
W3		RÉSEAU ORANGE							RÉSEAU ROUGE									
T1	RÉSEAU VERT							RÉSEAU ORANGE			RÉSEAU ROUGE							

Figure 4.15 Tableau de bord dû à la perte de W3

Nous avons désormais une nouvelle donnée, la ressource télécoms ne sera plus disponible dans 12h sur son Sal 1.

D'après la base de connaissances, nous avons quatre Rf/Sal (E1, E2, W2 et W3) qui utilisent ce Ru/Sal T1 (Tableau 4.12).

Tableau 4.12 Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de T1

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
E1	T1	Transmission de données opérationnelles	Nécessaire	4h 10h
E2		Communication	Supportif	/
W2		Transmission de données opérationnelles	Nécessaire	7h 8h
W3		Communication	Supportif	/

Les RSV d'eau potable et d'électricité vont donc subir un impact. Grâce à la base de connaissances, nous savons que cette dégradation va engendrer des effets domino seulement sur E1 et W2. Nous aurons, donc, une perte d'électricité sur son Sal 1 et une

perte d'eau potable sur son Sal 2, respectivement, 15h et 16h après la perte de T1 (Figure 4.16).

Durée Rf/Sal	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	25h	26h	27h	28h
E2	RÉSEAU ROUGE																											
W3	RÉSEAU ORANGE							RÉSEAU ROUGE																				
T1	RÉSEAU VERT								RÉSEAU ORANGE		RÉSEAU ROUGE																	
E1	RÉSEAU VERT											RÉSEAU JAUNE		RÉSEAU ORANGE		RÉSEAU ROUGE												
W2	RÉSEAU VERT											RÉSEAU JAUNE						RÉSEAU ORANGE						RÉSEAU ROUGE				

Figure 4.16 Tableau de bord dû à la perte de T1

Nous avons désormais une nouvelle donnée, la ressource électricité ne sera plus disponible dans 26h sur son Sal 1 et la ressource eau potable ne sera plus disponible dans 27h sur son Sal 2.

D'après la base de connaissances, nous avons cinq Rf/Sal (W1, T2, T3, E1 et E4) qui utilisent ces Ru/Sal E1 et W2 (Tableau 4.13).

Tableau 4.13 Partie de la base de connaissances illustrant les conséquences dues à la perte de E1 et de W2

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
W1	E1	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	4h 8h
T2		Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	7h 5h
T3	W2	Refroidissement d'équipement	Critique	13h
E1		Consommation	Supportif	/
E4		Refroidissement d'équipement	Nécessaire	6h 5h

Tous les RSV vont donc subir un impact. Grâce à la base de connaissances, nous savons que cette dégradation va engendrer des effets domino sur W1, T2, T3 et E4. Nous aurons, donc, une perte d'eau potable sur son Sal 1, une perte de télécoms sur ses Sal 2 et 3, et une perte d'électricité sur son Sal 4, respectivement, 13h, 13h, 14h et 12h après la perte de E1 et W2 (Figure 4.17).

Durée Rf/Sal	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	25h	26h	27h	28h	29h	30h	31h	32h	33h	34h	35h	36h	
	E2	RÉSEAU ROUGE																																			
W3	RÉSEAU ORANGE							RÉSEAU ROUGE																													
T1	RÉSEAU VERT							RÉSEAU ORANGE			RÉSEAU ROUGE																										
E1	RÉSEAU VERT										RÉSEAU JAUNE			RÉSEAU ORANGE										RÉSEAU ROUGE													
W2	RÉSEAU VERT										RÉSEAU JAUNE							RÉSEAU ORANGE							RÉSEAU ROUGE												
W1	RÉSEAU VERT																									RÉSEAU JAUNE			RÉSEAU ORANGE								
T2	RÉSEAU VERT																									RÉSEAU JAUNE							RÉSEAU ORANGE				
T3	RÉSEAU VERT																									RÉSEAU ORANGE											
E4	RÉSEAU VERT																									RÉSEAU JAUNE							RÉSEAU ORANGE				

Figure 4.17 Tableau de bord dû à la perte de E1 et de W2

Aucun des RSV nouvellement affectés passe en rouge avant la fin de la durée d'étude de 36h. Nous arrêtons donc là notre exemple. Les RSV seront avertis et pourront mettre en place les mesures nécessaires pour minimiser les impacts.

Nous pouvons voir, au travers de ce court exemple, que la modélisation des interdépendances est relativement simple. La méthode est identique pour de multiples RSV interdépendants. Ceci permet donc, par l'intermédiaire d'une base de connaissances pertinente, de modéliser efficacement les liens d'interdépendances et de visualiser les effets domino qui en découlent.

Nous pourrions voir à associer cette base de connaissances à un outil informatique en créant, par exemple, une base de donnée Access. En effet, cela permettra de faire ressortir les informations recherchées plus rapidement au travers de requêtes. Une courte programmation pourra permettre la mise en place d'un outil qui automatisera la démarche. Il suffira alors de rentrer un Ru/Sal dégradé pour obtenir directement, sur un

tableau de bord, les RSV affectés par les effets domino et ceci avec les marges de manoeuvre associées.

4.4.2. Anticipation des effets domino

Cette méthodologie a pour but d'aider les acteurs de l'espace de coopération à maîtriser les effets domino en commençant par la modélisation des interdépendances qui véhiculent les dégradations d'un RSV à l'autre. Pour cela, elle étudie l'impact, sur les RSV, de la perte de Ru/Sal qu'ils utilisent sur la zone d'étude. Il est alors possible de prévenir les RSV de l'espace de coopération d'un état à venir afin qu'ils puissent anticiper de nouvelles dégradations.

Il est pertinent de pousser plus loin cette anticipation. Ainsi, lorsqu'un RSV entre dans un état dégradé qui pourrait à terme engendrer de lourds impacts sur d'autres RSV, il est primordial de prévenir les réseaux qui risquent d'être affectés afin qu'ils puissent anticiper cette affectation et prendre les mesures adéquates.

Plus concrètement, si un RSV utilise un Ru/Sal et qu'il l'a caractérisé comme Ru/Sal de catégorie critique ou nécessaire, il faut avertir le RSV utilisateur lorsque le RSV fournisseur passe en état jaune ou orange. En effet, l'état rouge, où le Ru/Sal ne sera plus disponible, risque d'arriver prochainement. Le RSV utilisateur, outre mettre en place des mesures préventives de protection, pourra, à son tour, placer son RSV dans un certain état d'alerte (jaune ou orange) afin que les RSV qui utilisent ses Rf/Sal puissent être prévenus de cette nouvelle vulnérabilité.

Nous aurons donc une meilleure maîtrise des effets domino, et il sera possible de prévoir une dégradation importante longtemps avant que celle-ci n'apparaisse.

Nous pouvons voir sur la Figure 4.18 l'illustration de l'anticipation des effets domino. En effet, nous avons T3 qui est utilisé pour fournir E4 qui est utilisé pour fournir W1 (Tableau 4.14). Ainsi, lorsque T3 devient défaillant nous pouvons anticiper que W1 va devenir défaillant. Sur la Figure 4.18, nous posons le Ru/Sal T3 comme non disponible. Nous avons, donc, E4 qui passe en état jaune pour une durée de 6h, puis devient orange pour 10h et finit par passer au rouge.

Deux cas sont, alors, présentés. Le premier cas montre la modélisation classique où W1 ne passe en orange que lorsque E4 est en rouge. Le deuxième cas, quant à lui, prend en compte l'anticipation des effets domino et W1 passe en jaune à partir du moment où l'état du RSV électricité passe en orange sur son Sal 4. En effet, dans cet exemple, le RSV eau potable a déterminé qu'il passait en jaune, préventivement, seulement lorsqu'un de ses Ru/Sal était en orange et que ce Ru/Sal était catégorisé comme critique ou nécessaire.

Tableau 4.14 Partie d'une base de connaissances illustrant l'anticipation des effets domino

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
E4	T3	Fonctionnement d'équipement	Nécessaire	6h 10h
W1	E4	Refroidissement d'équipement	Critique	7h

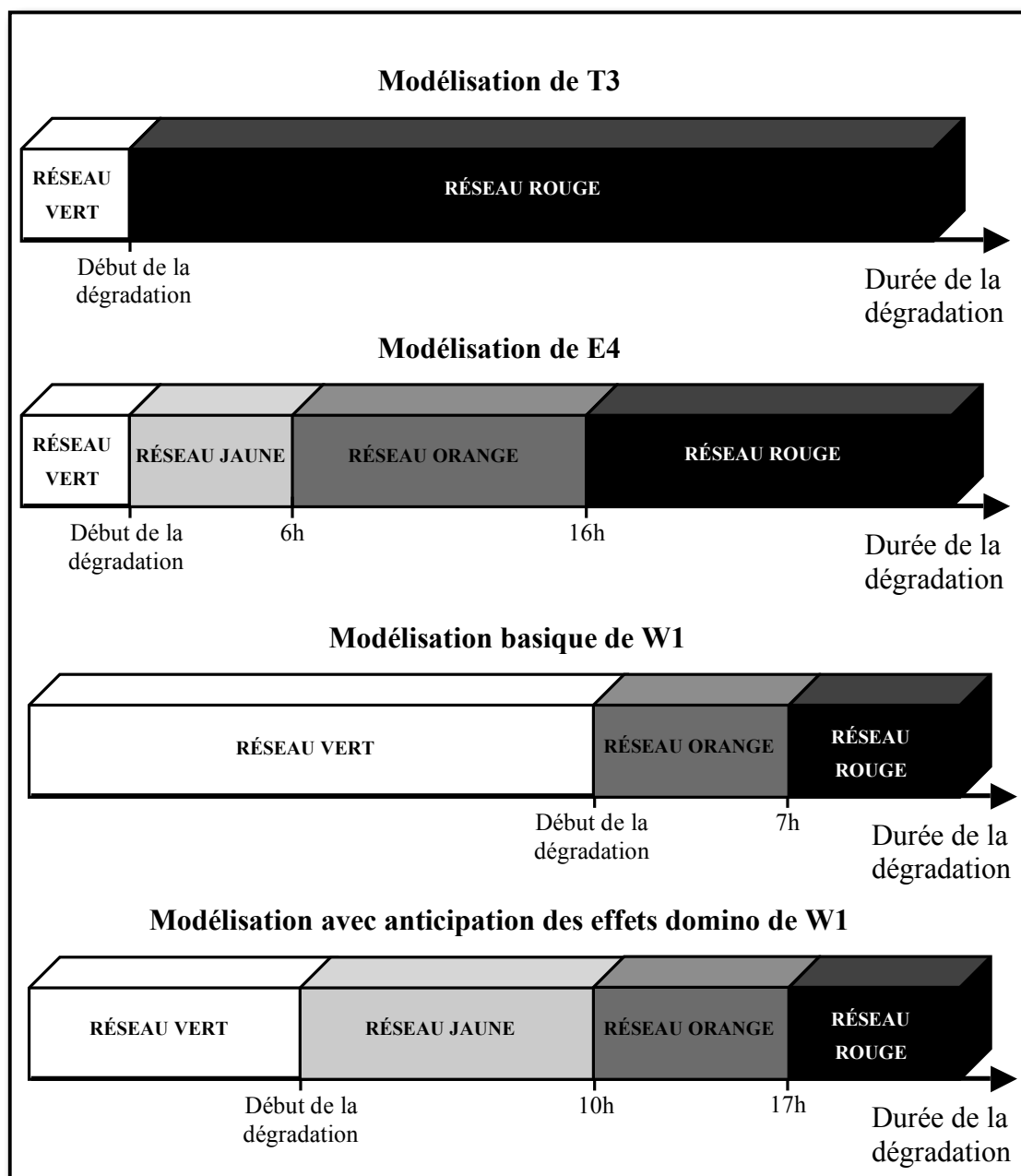


Figure 4.18 Anticipation des effets domino

4.4.3. Visualisation de l'accroissement de vulnérabilité

Nous avons pu voir dans la littérature qu'un accroissement de vulnérabilité d'un RSV face à la dégradation de Ru/Sal multiples était envisageable. Cette partie définit donc une manière de prendre en compte cet accroissement en cumulant les impacts engendrés par la dégradation de divers Ru/Sal. Nous proposons, ici, des principes permettant ce cumul. Ils sont fonction des catégories auxquelles les Ru/Sal appartiennent (critique, nécessaire ou supportif).

Nous avons pu voir précédemment qu'à partir du moment où un Ru/Sal n'est plus disponible le RSV utilisateur est affecté. Il s'agit, donc, de savoir quelle est la marge de manœuvre à sa disposition avant d'atteindre l'état rouge où ce RSV est tellement affecté que son Rf/Sal n'est, à son tour, plus disponible.

Cette marge de manœuvre peut évoluer en fonction du temps et de la situation. Ainsi, si un nouveau Ru/Sal n'est plus disponible à un moment donné, la marge de manœuvre pourra s'en voir réduite. De même, si un Ru/Sal est de nouveau disponible plus tard, la marge de manœuvre pourra être rallongée.

C'est donc par une combinaison des impacts sur le RSV que cette partie aidera à obtenir l'état global du réseau (état engendré par la perte de plusieurs Ru/Sal). Nous allons, pour cela, donner des principes rattachés aux catégories critique, nécessaire et supportif.

Nous avons, dans un premier temps, des principes qui s'appliquent à chacun des Ru/Sal. Tout d'abord, seuls les Ru/Sal dégradés doivent être pris en compte pour la détermination de l'état du RSV. Ensuite, l'état initial du RSV doit être égal au plus mauvais état engendré par les Ru/Sal dégradés tous confondus. C'est-à-dire que nous devons prendre comme état initial le plus mauvais état engendré par la combinaison des

Ru/Sal dégradés. Enfin, si nous atteignons l'état rouge, nous devons nous arrêter. En effet, le Rf/Sal est alors hors-service.

Nous avons ensuite des principes propres à chaque catégorie. Le RSV doit appliquer, pour chacun des Ru/Sal qu'il utilise, les principes qui s'y rattachent. Ces principes donnent une orientation afin de connaître l'accroissement de vulnérabilité causé par la combinaison de Ru/Sal dégradés.

▪ **Ru/Sal critique**

Le Ru/Sal critique est primordial pour le RSV comme nous l'avons vu dans la partie 4.2.2. Ainsi, si plus d'un Ru/Sal critique est défaillant, le RSV risque de subir une plus grande dégradation.

Nous posons, ici, comme hypothèse que le cumul de Ru/Sal critiques défaillants augmente la vulnérabilité du RSV. Afin, d'avoir un modèle qui représente au mieux la dégradation des RSV étudiés, les RSV devront déterminer, par eux même, à partir de combien de Ru/Sal critiques défaillants il y a un accroissement de la vulnérabilité.

Nous pouvons tout de même dire qu'il paraît fort probable que si une grande proportion de Ru/Sal critiques est dégradée, il y aura certainement un fort accroissement de la vulnérabilité du RSV. De la même façon, pour une proportion moins grande, il y aura un accroissement moins grand.

Cet accroissement de la vulnérabilité se traduira par une réduction, plus ou moins importante, de la marge de manœuvre.

- **Ru/Sal nécessaire**

Le Ru/Sal nécessaire est, quant à lui, important pour le RSV. Ainsi, si nous avons un cumul de Ru/Sal nécessaires défaillants, le RSV risque de subir une dégradation plus forte.

Nous posons, ici, la même hypothèse que pour un Ru/Sal critique : le cumul de Ru/Sal nécessaires défaillants augmente la vulnérabilité du RSV. Là encore, les RSV devront déterminer, par eux même, à partir de combien de Ru/Sal nécessaires défaillants il y a un accroissement de la vulnérabilité.

Dans ce cas, une grande proportion de Ru/Sal nécessaires dégradés causera certainement un accroissement moyen de la vulnérabilité du RSV qui se traduira par une réduction de la marge de manœuvre.

- **Ru/Sal supportif**

Le Ru/Sal supportif est peu important pour le RSV. Ainsi, pour plus d'un Ru/Sal supportif défaillant, le RSV ne risque pas de subir une plus grande dégradation. Cependant, si un très grand pourcentage de Ru/Sal supportifs sont défaillants, il pourra y avoir une augmentation de la dégradation.

L'hypothèse, cette fois-ci, sera une augmentation de la dégradation pour un cumul d'un très grand pourcentage de Ru/Sal supportifs défaillants. Ce sera toujours le rôle des RSV de déterminer à partir de combien de Ru/Sal supportifs défaillants il y a un accroissement de la vulnérabilité.

Pour les Ru/Sal supportifs, il faudra très probablement, une très grande proportion dégradée pour avoir un faible accroissement de la vulnérabilité.

Nous allons voir dans un court exemple théorique comment ce cumul s'opère. Ainsi, pour deux Ru/Sal, tous deux critiques pour un réseau de télécommunications, nous obtenons la partie de la base de connaissances représentée dans le Tableau 4.15.

Tableau 4.15 Partie d'une base de connaissances d'un réseau de télécoms

Rf/Sal	Ru/Sal	Utilisation de la Ru	Classification	Durées
T4	E3	Fonctionnement d'équipement	Critique	6h
	W2	Refroidissement d'équipement	Critique	7h

Nous savons donc que le Rf/Sal (T4) ne sera plus disponible dans 7h dû à la perte de E3. Cette marge de manœuvre est réduite par le cumul d'un deuxième Ru/Sal critique défaillant (W2). En effet, pour cet exemple, le RSV de télécoms a défini que le cumul de deux Ru/Sal critiques défaillants réduisait de moitié la marge de manœuvre la plus petite. Nous obtenons donc une marge de manœuvre de 3h avant que les télécoms ne soit plus fournie sur leur Sal 4 (Figure 4.19).

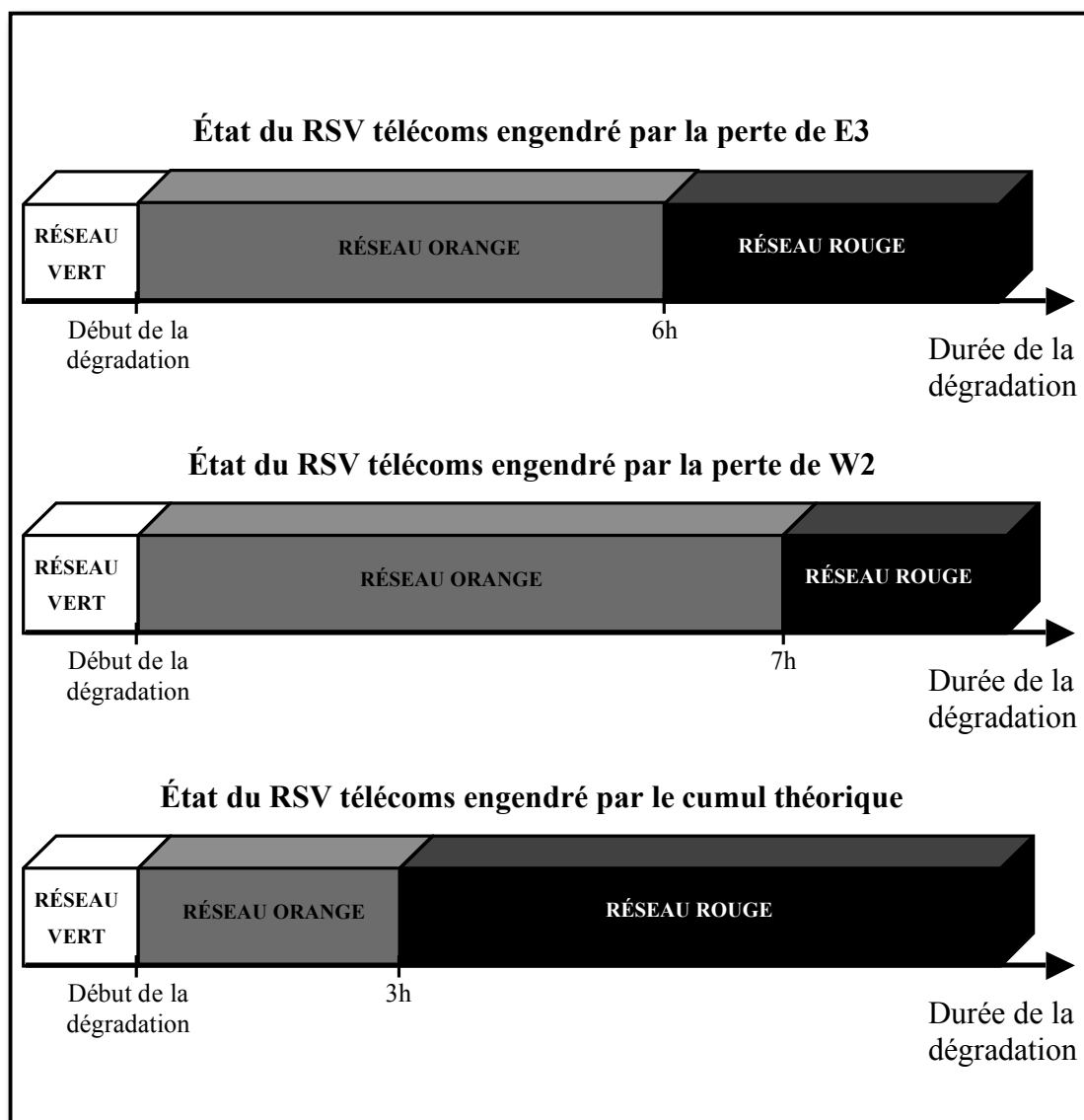


Figure 4.19 Cumul des vulnérabilités

Ces principes devront être validés et ajustés afin de correspondre aux mieux à la réalité des RSV étudiés.

Cette combinaison des impacts, engendrée par les Ru/Sal défaillants, pourra être particulièrement pertinente dans un outil cherchant à aider à la détermination des conséquences de la perte de Ru/Sal multiples dans un espace de coopération composé de RSV interdépendants. Il est donc fortement préconisé de poursuivre des travaux sur cette cause d'accroissement de vulnérabilité.

D'autres principes de combinaison de défaillances, engendrées par la perte de Ru/Sal multiples, sont possibles. Nous verrons, ainsi, dans la partie CHAPITRE 5 :. une autre façon d'effectuer ce cumul de vulnérabilité.

4.4.4. Ressources alternatives

Nous avons vu dans la méthodologie (partie 4.2.3.) qu'il était important de faire ressortir les besoins en ressources alternatives lorsque des Ru/Sal sont défaillants et que les RSV pallient ce manque grâce aux Ra/Sal.

Il est donc pertinent de mettre en évidence les besoins en Ra/Sal à chaque fois qu'ils sont utilisés. Nous pourrions ainsi cumuler les besoins de plusieurs RSV pour un même Ra/Sal sur la zone d'étude. Nous vérifierons, alors, la disponibilité d'une telle demande.

Nous pourrions étudier la disponibilité dans le temps des Ra/Sal afin de savoir si les besoins des RSV, affectés par la perte d'un ou plusieurs Ru/Sal, peuvent être délivrés. Dans le cas où la disponibilité de Ra/Sal serait insuffisante compte-tenu des besoins, les RSV concernés pourront être prévenus afin qu'il puisse s'y préparer. D'autre part, la base de connaissances pourra être mise à jour et les marges de manœuvre des RSV qui comptaient utiliser un Ra/Sal s'avérant en quantité non suffisante, pourront être réduites.

La problématique des ressources alternatives apparaît comme primordiale dans la protection des RSV face aux effets domino. Ce travail de recherche ne nous a pas permis de développer plus la solution à cette problématique. Cependant, nous venons de voir les orientations qui permettront de guider de futures recherches. Il sera donc nécessaire de poursuivre les travaux à ce niveau.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION

La méthodologie développée présente de nombreuses possibilités comme nous avons pu le voir précédemment. En effet, elle nous indique comment construire la base de connaissances qui permet par la suite de modéliser les interdépendances, d'identifier et d'anticiper les effets domino. Cela nous donne une solution tangible à la problématique de protection des réseaux de support à la vie face aux effets domino.

D'autre part, la base de connaissances couplée à une interface graphique, devrait permettre de répondre à d'autres problématiques telles qu'une meilleure anticipation des effets domino, la prise en compte du cumul des vulnérabilités ou encore des Ra/Sal.

Pour arriver à ce résultat, nous avons dû passer outre de nombreuses difficultés causées par la complexité des RSV interdépendants. Effectivement, lorsque l'on souhaite créer une méthodologie applicable rapidement, il n'est pas toujours facile de composer avec tous les paramètres reliés aux RSV interdépendants. Ainsi, nous avons dû faire quelques compromis pour obtenir une méthodologie simple.

Nous allons, donc, dans un premier temps, étudier les résultats obtenus. Nous exposerons, ensuite, les applications possibles dans l'immédiat ou dans un future proche avec l'aide de travaux complémentaires. Enfin, nous allons identifier les limites de nos travaux de recherches.

5.1. Résultats

La méthodologie se décompose en deux volets principaux : la création de la base de connaissances et les applications possibles de cette dernière.

La base de connaissances s'appuie sur un ensemble de concepts exposés au début de ce document. Nous avons, ainsi, présenté les couples ressource utilisée – secteur d'alimentation (Ru/Sal) et les couples ressource fournie – secteur d'alimentation (Rf/Sal), la synthèse organisationnelle technique (SOT), l'état des RSV et la classification des Ru/Sal. À partir de ces concepts, nous avons mis en place une démarche permettant de rassembler les informations interprétées pertinentes. Ces informations peuvent ensuite être groupées dans un tableau qui est notre base de connaissances. Il est, enfin, possible d'associer une interface graphique à cette dernière.

Une fois la base de connaissances construite, nous donnons différentes applications possibles; la principale étant la modélisation des interdépendances pour identifier et anticiper les effets domino. Ainsi, nous sommes capables de déterminer les conséquences dues à la perte d'un Ru/Sal à court, moyen ou long terme.

Ces travaux de recherches répondent, donc, à la problématique de protection des RSV interdépendants face aux effets domino pour rendre nos sociétés moins vulnérables.

D'autre part, nous avons identifié en début, dans la littérature, de bonnes idées que nous pensions importantes d'intégrer dans nos travaux de recherche :

- Développer un système de communications entre les RSV qui soit sécuritaire, confidentiel et adaptable;
- Mettre en place un système de mesure pour représenter l'état des RSV;
- Créer une banque de données flexible et ordonnée;

- Favoriser la coopération entre les RSV;
- Mettre en place une méthode simple;
- Prendre en compte la composante spatiale;
- Prendre en compte le cumul de vulnérabilité;
- Mettre en place un langage de communication entre les RSV.

De ces idées découlaient différents défis qu'il était important de relever. Nous allons donc voir ce qu'offre la méthodologie proposée.

Dans un premier temps, il fallait faire en sorte que tous les RSV se comprennent. Nous devons donc proposer un langage commun. La base de connaissances est ce langage commun. En effet, elle permet aux RSV d'identifier les liens d'interdépendances qu'ils ont entre eux. Les réseaux communiquent, alors, ces liens au travers de la base de connaissances de manière à ce que tous les RSV concernés puissent en être conscient. Il y a donc belle et bien une communication entre les RSV et tout le monde est capable de comprendre les informations interprétées amenées. De plus, pour que tous les RSV évaluent l'état de leur réseau de la même façon, un système de mesure pour représenter l'état des RSV a été mis en place (partie 4.2.1.).

Ensuite, nous devons nous assurer de la simplicité, de la flexibilité et de l'adaptabilité de la méthodologie. Là encore, les travaux présentés relèvent le défi. L'ajout de RSV ne demande pas une remise en question de toutes les informations déjà répertoriées. Il suffit d'ajouter les données supplémentaires ce qui assure une grande flexibilité de la base de connaissances face à l'ajout de nouveaux partenaires. La simplicité de la méthode a été démontrée au travers des exemples présentés dans ce document. N'importe quel organisme peut gérer la base de connaissances et donner les conséquences dues à la perte d'un Ru/Sal. Enfin, cette méthodologie peut s'adapter à n'importe quel RSV

interdépendant (réseau électrique, réseau d'eau potable, réseau de télécoms, hôpitaux, banques, etc.) ce qui nous assure bien de son adaptabilité.

La méthodologie se devait de prendre en compte la notion spatiale des RSV interdépendants. Il fallait, en effet, conjuguer l'identification des interdépendances avec la localisation géographique des liens. En introduisant les Ru/Sal et les Rf/Sal, nous avons rendu indissociables les liens d'interdépendances avec leur notion spatiale. Nous connaissons, maintenant, l'état d'un RSV dans une zone géographique lorsque les ressources des autres RSV ne sont plus disponibles dans une zone géographique identique ou différente de la première.

La préservation de la confidentialité des informations appartenant aux RSV était un des points capitaux liés à notre problématique. Il est primordial de laisser les informations à l'interne des RSV. La base de connaissances relève le défi en ne conservant que des informations interprétées. Nous n'avons aucune information sur la composition interne des réseaux. Seuls les liens d'interdépendances sont partagés avec l'espace de coopération. Les cartographies des infrastructures géoréférencées d'un réseau ne sont, donc, plus nécessaires.

Nous devons, enfin, mettre en place des concepts permettant de développer de nouveaux outils qui répondent à la problématique des RSV interdépendants et ceci tout en simplifiant les outils plus anciens développés par le CRP. En effet, les matrices d'interdépendances répertoriant la composition interne des RSV étaient devenues trop complexes et ne permettaient pas d'assurer la confidentialité des informations sensibles des réseaux. La base de connaissances, en utilisant uniquement les informations interprétées des RSV, est une sorte de matrice d'interdépendances simplifiée. D'autre part, elle intègre le concept sous-jacent des cartographies souples développées par le

CRP. En effet, l'idée d'avoir une localisation approximative du besoin, plutôt qu'une carte géoréférencée, est reprise.

Les résultats présentés ci-dessus paraissent prometteurs. Ils relèvent effectivement les principaux défis identifiés dans la littérature. Nous allons voir, dans la partie suivante, quelles applications nous pouvons envisager avoir avec notre méthodologie.

5.2. Applications

Nous allons voir, dans un premier temps, les applications possibles de nos travaux de recherches. Puis, dans un deuxième temps, nous allons reprendre les commentaires des partenaires qui ont assisté à une présentation des résultats.

À partir des résultats présentés dans ce document, il apparaît relativement simple de développer des outils qui pourront aider à une meilleure identification et anticipation des effets domino entre RSV interdépendants.

L'outil central, qui pourra être développé, est un système expert. Dans notre cas, cet outil ne devrait pas être trop complexe, et nous ne lui associerons pas des longues séries de règles. En effet, le système expert qui sera développé sera uniquement un système informatique qui gèrera les données de la base de connaissances. Ainsi, tout le travail de modélisation que nous avons présenté, précédemment, sera automatiquement réalisé par un programme informatique. Il suffira alors de déterminer un premier Ru/Sal non disponible pour obtenir directement les conséquences sur les autres RSV interdépendants. Une courte programmation pourra, donc, nous permettre d'avoir automatiquement les effets domino à court, moyen ou long terme. Ce système expert se basera sur un système de requêtes qui appellera les conséquences dues à la perte d'un

Ru/Sal donné. Il suffira ensuite d'afficher ces conséquences au travers de l'interface graphique associé.

L'interface graphique nous permet d'obtenir un tableau de bord. Ce dernier sera le premier résultat du système expert. Ainsi, lorsqu'une dégradation initiale sera définie, le système expert donnera comme résultat le tableau de bord sur lequel les conséquences, sur les RSV de l'espace de coopération, seront représentées.

Malgré l'utilisation de données fournies par les RSV partenaires du *Centre risque & performance*, nos travaux restent à un stade relativement théorique. Nous avons, donc, souhaité demander à des professionnels, qui travaillent tous les jours à la protection des RSV interdépendants face aux effets domino, ce qu'ils pensaient quant à l'applicabilité de ces travaux de recherche.

Nous allons, donc, voir comment ils pensent pouvoir utiliser cette méthodologie. Les partenaires ont aussi soulevé quelques limites que nous présenterons dans la partie suivante.

De manière générale, nous pouvons dire qu'ils ont plutôt bien accueilli les travaux présentés dans ce document. Ils ont apprécié la simplicité de la méthode et ont pu voir des applications rapides et pratiques.

Pour les partenaires, cette méthode se trouve dans la continuité du « Early Warning System » (du système d'avertissement précoce). En effet, les résultats ne risquent pas de donner la réalité exacte surtout lorsque nous cherchons les effets domino à moyen et long terme. Ainsi, c'est plutôt un état à venir probable qui résulte de la modélisation des interdépendances. Les RSV de l'espace de coopération vont donc pouvoir être prévenus de ce qui risque de pouvoir arriver. Ils seront alors conscients des conséquences possibles et pourront se préparer en mettant en place des mesures de protection. De plus,

cela permettra, aux responsables en sécurité civile, d'avoir un ordre de grandeur du phénomène.

Les partenaires ont, également, relevé la multitude de cas possibles suivant les conditions prises en compte. Toujours dans l'idée de mettre en place un réseau d'alerte, ils pensent que la base de connaissances pourrait contenir uniquement les informations interprétées représentant le « Worst-Case Scenario » (le pire scénario possible). Ainsi, aucune mesure de protection devrait être prise en compte dans la modélisation. Le résultat sera donc la pire situation envisageable si rien n'est entrepris pour atténuer les conséquences. Les RSV pourront donc être avertis des pires conséquences envisageables et pourront s'y préparer qu'elles se concrétisent ou pas. Il sera ensuite possible de mettre en place des scénarios alternatifs qui pourront prendre en compte des mesures d'atténuation.

Les applications des travaux de recherche présentés dans ce document devrait être relativement rapides à mettre en place. De plus, les partenaires du CRP pensent que la méthodologie pourrait être profitable pour mieux protéger leur réseau. Elle devrait permettre de faciliter l'entraide mutuelle entre les RSV d'un même espace de coopération. Le constat est donc très positif. Cependant, certaines limites, présentées dans la partie suivante, sont à soulever.

5.3. Limites

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la complexité du problème nous a contraint à faire des compromis. Cela entraîne des limites qui ont, pour certaines, été relevées par les partenaires du CRP.

Une des premières limites mise en avant par les partenaires concerne la prise en compte de la continuité opérationnelle. En effet, la modélisation des interdépendances ne prend pas en compte le cas où l'état d'un RSV repasse à la normale après avoir été dégradé. Un RSV qui perd un Ru/Sal est affecté. Il n'est pas sûr qu'il puisse revenir à la normale dès que le Ru/Sal est de nouveau disponible. Il va donc être nécessaire dans de futurs travaux de se pencher sur cet aspect.

Une autre limite quant à l'application de cette méthodologie est de savoir qui va prendre en charge la gestion de la base de connaissances. Les partenaires ont finalement reconnu que la structure simple de la méthodologie ne donnerait pas un travail trop important au gestionnaire. Avec l'association de la base de connaissances et du système expert, le travail de gestion sera minimum et pourra être effectué par le Centre de sécurité civile. Ce dernier a d'ailleurs souligné la possible compatibilité de cette modélisation avec le portail de sécurité civile qui est en cours de développement.

Les partenaires ont aussi relevé la grande difficulté de pouvoir prévoir exactement les conséquences sur leur réseau lorsqu'un Ru/Sal n'est plus disponible. Ceci confirme que la méthodologie devrait plus être utilisée pour mettre en place un réseau d'alerte prévenant d'une situation à venir possible et non pas pour représenter la réalité.

De plus, il paraît difficile de mettre des valeurs sur les marges de manœuvre, d'autant plus qu'une fois qu'une valeur est fixée tout le monde la prendra pour acquise et le jour où le réseau tiendra moins longtemps que prévu, les utilisateurs vont se retourner contre lui. Cela pousse toujours plus à concevoir cette modélisation comme les conséquences probables afin de se protéger même s'il est possible que tout ne se déroule pas comme prévu. Il apparaît, effectivement, plus pertinent de se protéger d'une possible dégradation plutôt que de se laisser subir.

Certains points de la méthodologie sont aussi inachevés. En effet, l'association du type d'utilisation au Ru/Sal paraît pertinent. Cependant, il serait nécessaire d'associer un type de fourniture au Rf/Sal. Ainsi, il faudrait étudier si la perte d'un Ru/Sal affecte plus un type de fourniture qu'un autre. Nous pourrions donc avoir, par exemple, pour une perte d'un Ru/Sal, l'eau qui deviendrait non potable pour la consommation alors qu'elle serait toujours à une bonne pression pour la protection incendie.

Il est, aussi, nécessaire de pousser les recherches sur le cumul des vulnérabilités. Les partenaires ont d'ailleurs exprimé des réserves quant à la façon dont cette méthodologie propose d'y répondre. En effet, faire un cumul basé sur un ensemble de règles régissant l'association de deux dégradations causées par deux Ru/Sal paraît ne pas être viable. Il sera important de poursuivre les travaux à ce niveau. Nous pourrions alors étudier l'ajout de duo ou trio de Ru/Sal à la base de connaissances. En effet, on ne cherchera plus à faire le cumul de deux impacts engendrés par deux Ru/Sal, mais plutôt à compléter la base de connaissances avec de nouvelles données telles que des duo, ou trio, de Ru/Sal. Ces derniers associeront plusieurs Ru/Sal et donneront les conséquences sur l'état du RSV si le duo, ou le trio, n'est plus disponible. Nous pourrions donc avoir, par exemple, E1 supportif pour Ta, W2 nécessaire pour Ta et E1/W2 critique pour Ta.

Il faudra aussi se concentrer sur les Ra/Sal. Ce point paraît crucial dans une bonne modélisation des interdépendances. Les travaux futurs devront trouver un moyen d'associer les Ra/Sal à cette modélisation. Pour ce faire, il sera possible de créer un code couleur pour indiquer l'utilisation de Ra/Sal. Ce code couleur nous permettra d'identifier les besoins en Ra/Sal et dans certains cas, où la demande est plus grande que l'offre, prendre des mesures pour adapter la modélisation et prévenir les RSV concernés.

La dernière limite concerne la modélisation à moyen ou long terme. En effet, il paraît peu probable que les résultats soient tangibles pour une modélisation à moyen ou long

terme. Cependant, dans une optique où nous cherchons à prévenir d'un cas possible afin de se protéger « au cas où », il sera toujours intéressant de faire des prévisions à moyen ou long terme en gardant à l'esprit que les conséquences pourront ne pas apparaître.

Les limites que nous avons déterminées sont principalement dues aux hypothèses posées dans la méthodologie. Toutefois, toutes ces limites sont autant de pistes où de futurs travaux pourront être effectués. Il sera donc nécessaire de poursuivre les recherches de manière à améliorer la méthodologie développée pour que ces résultats puissent s'approcher toujours plus de la réalité.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION

Les travaux de recherche, présentés dans ce document, s'inscrivent bien dans le Programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures (PCRII) du Canada. Nous avons, en effet, donné une réponse tangible à notre problématique de protection des RSV interdépendants face aux effets domino. La méthodologie qui ressort de ces travaux devrait à terme aider chaque RSV à mieux se protéger des défaillances des autres RSV, ce qui rendra nos sociétés moins vulnérables.

Le principe sous-jacent de ces travaux de recherche est l'association des secteurs d'alimentation aux ressources utilisées et aux ressources fournies pour former respectivement les couples ressource utilisée – secteur d'alimentation (Ru/Sal) et les couples ressource fournie – secteur d'alimentation (Rf/Sal). Ainsi, les RSV peuvent désormais faire le lien entre un Ru/Sal et un Rf/Sal et associer à ce lien les conséquences sur l'état du RSV utilisateur lors de la perte d'un Ru/Sal.

La méthodologie se sépare globalement en deux volets : la structuration des données et les applications possibles. Les résultats qui ressortent principalement sont la base de connaissances et la modélisation des interdépendances.

Pour créer notre base de connaissances qui regroupe l'ensemble des informations interprétées pertinentes des RSV, nous avons mis en place un système de mesure de l'état du RSV utilisateur et une classification des Ru/Sal en trois catégories (critique, nécessaire et supportif). Ces catégories représentent l'impact, ou les conséquences, sur le RSV utilisateur lors de la perte d'un Ru/Sal. Ainsi, suivant la catégorie à laquelle appartient le Ru/Sal non disponible, nous pouvons savoir quels sont les conséquences sur l'état du RSV.

Les RSV doivent donc transmettre des informations interprétées de leur réseau à travers une structure rigoureuse qui permet d'avoir des données que tous les membres de l'espace de coopération peuvent comprendre et utiliser.

La base de connaissances qui en résulte est sous forme d'un tableau simple ne contenant aucune information sur l'intérieur des RSV ce qui permet de conserver une bonne confidentialité des données des réseaux. Cette base de connaissances est, d'autre part, flexible à l'ajout de nouvelles données et adaptable à tout type de RSV. Son application à grande échelle est donc tout à fait réaliste.

À partir de ce premier résultat, nous avons présenté différentes applications possibles. Tout d'abord, la modélisation des interdépendances permet d'identifier les effets domino à court, moyen ou long terme. Cette modélisation simple et rapide permet d'avoir une vision du phénomène engendré par la perte d'un ou plusieurs Ru/Sal.

D'autres applications ont été présentées : la meilleure anticipation des effets domino, le cumul des vulnérabilités et la prise en compte des Ra/Sal. Chacune d'elles apporte des pistes de réflexion qui devront être poussées dans des travaux futurs.

Les résultats de ces travaux de recherche, effectués au sein du *Centre risque & performance*, relèvent les défis majeurs qui ressortent de la littérature. En effet, après avoir fait ressortir tous les conseils de la littérature pour donner une bonne réponse à la problématique des interdépendances, nous avons identifié les défis que notre méthodologie devait relever. Nous avons donc pu développer une méthodologie prenant en compte tous ces paramètres additionnels.

Avec l'aide de nouveaux travaux, il sera rapidement possible de mettre en place un système expert. Ce système informatique sera responsable de gérer les données de la

base de connaissances afin d'avoir une modélisation automatique des interdépendances. Ainsi, il suffira de déterminer une première défaillance pour avoir le portrait du phénomène induit à court, moyen ou long terme. Ce portrait sera sous la forme d'un tableau de bord grâce à l'interface graphique associée à notre base de connaissances. Lorsqu'un Ru/Sal est défaillant, le système expert, en s'appuyant sur la base de connaissances, permettra d'évaluer les impacts engendrés sur les RSV. Nous aurons, alors, un affichage sur le tableau de bord des RSV affectés et de leur état. Cet affichage se fera au travers de couleurs définies dans la méthodologie. Nous aurons donc suivant l'importance de l'impact engendré par un Ru/Sal défaillant, un état de couleur différente pour chaque RSV affecté. Les responsables en sécurité civile, avec l'appui de ce tableau de bord, pourront donc anticiper des conséquences non souhaitées. Les RSV concernés seront prévenus et pourront mettre en place des mesures de protection adéquates.

Les partenaires du CRP ont bien accueilli les travaux de recherche qui leur ont été présentés. Ils ont vu la méthodologie comme un outil pour un réseau d'alerte qui ne rend pas compte d'une réalité unique mais plutôt d'une situation possible à venir. Ainsi, ils pensent pouvoir s'en servir en se protégeant des défaillances prédites par le système expert. C'est donc dans une optique de « au cas où » qu'ils se protégeront d'événements qui n'arriveront peut être pas.

Certaines limites sont tout de même présentes. Ainsi, la méthodologie ne permet pas de prendre en compte la continuité opérationnelle ni le type de fourniture. Elle demeure également inachevée au niveau du cumul de vulnérabilité et des Ra/Sal. D'autres points ont été soulevés quant à la véracité des informations interprétées de la base de connaissances. Cependant, à partir du moment où la méthodologie est considérée comme un réseau d'alerte, cela n'apparaît plus comme une limite mais un élément dont il faut être conscient.

Pour finir, ces travaux ne doivent pas s'arrêter là. En effet, toutes les limites identifiées sont autant de pistes pour de nouvelles recherches. Des idées ont d'ailleurs été relevées pour résoudre la problématique du cumul des vulnérabilités et la problématique des Ra/Sal. Cette méthodologie peut être appliquée très rapidement. Les travaux de recherches complémentaires pourront alors être réalisés parallèlement. Ils permettront d'obtenir un résultat toujours plus proche de la réalité ce qui à terme devrait permettre de prévoir des effets domino à long terme avec une bonne précision.

RÉFÉRENCES

AMIN, M. (2001). Toward self-healing energy infrastructure systems. *IEEE Computer Applications in Power*. IEEE. Vol. 14, No. 1, 20-28.

AMIN, M. (2002). Toward secure and resilient interdependent infrastructure. *Journal of infrastructure systems*. Vol. 8, No. 3, 67-75.

BENEY, C., DALLAIRE, J., GAGNON, V., GAUTIER, F. et ROBERT, B. (2007). La géomatique au service de la sécurité civile : les défis à relever. 7^e Colloque sur la sécurité civile. Saint-Hyacinthe.

BROWN, T., BEYELER, W. et BARTON, D. (2004). Assessing infrastructure interdependencies: the challenge of risk analysis for complex adaptive systems. *International Journal of Critical Infrastructures*. Vol. 1, No.1, 108-117.

CHENG, Q. (2007). Gestion des situation d'urgence utilisant des systèmes d'aide à la prise de décisions géographiques. Symposium du programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures. Ottawa.

COMFORT, L. K., DUNN, M., JOHNSON, D., SKERTICH, R. et ZAGORECKI, A. (2004). Coordination in complex systems: increasing efficiency in disaster mitigation and response. *Int. J. Emergency Management*. Vol. 2, Nos. 1-2, 62-80.

U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY (2003). "The National Strategy for Physical Protection of Critical Infrastructure and Key Assets". Executive Office of the President. 92p.

DOBSON, I., CARRERAS, B. A. et NEWMAN, D. E. (2004). A branching process approximation to cascading load-dependent system failure. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii.

DUENAS-OSORIO, L., CRAIG, J. I. et GOODNO, B. J. (2004). Probabilistic response of interdependent infrastructure networks. Proceedings of the 2nd annual meeting of the Asian-pacific network of centers for earthquake engineering research (ANCER). Hawaii.

GUIHOU, X., LAGADEC, P. et LAGADEC, E. (2006). "Les crises hors cadres et les grands réseaux vitaux". *Katrina, Mission de retour d'expérience*. Groupe EDF. 34p.

HILLS, A. (2005). Insidious environments: creeping dependencies and urban vulnerabilities. *Journal of contingencies and crisis management*. Vol. 13, No. 1, 12-20.

HUBIN, S. et BALOUIN, T. (2005). "Analyse des risques et prévention des accidents majeurs (DRA-34), Concepts et méthodes de détermination des effets dominos, Aspects méthodologiques et seuils d'effets pour le traitement des effets dominos". INERIS, DRA. 52p.

KOUBATIS, A. et SCHONBERGER, J.Y. (2005). Risque management of complex critical systems. *Int. J. Critical Infrastructures*. Vol. 1, Nos. 2-3, 195-215.

LEE, E.E., MITCHELL, J.E. et WALLACE, W.A. (2004). Assessing vulnerability of proposed designs for interdependent infrastructure systems. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii.

LEWIS, D. et MIOCH, J. (2005). Urban vulnerability and good governance. *Journal of contingencies and crisis management*. Vol. 13, No. 2, 50-53.

LEWIS, T.G. (2006). "Critical infrastructure protection in homeland security". Wiley-interscience. 474p.

LITTLE, R.G. (2004). A socio-technical systems approach to understanding and enhancing the reliability of interdependent infrastructure systems. *Int. J. Emergency Management*. Vol. 2, Nos. 1-2, 98-110.

MARTI, J. (2007). Liens essentiels dans les réseaux d'infrastructure. Symposium du programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures. Ottawa.

MEDD, W. et MARVIN, S. (2005). From the politics of urgency to the governance of preparedness: a research agenda on urban vulnerability. *Journal of contingencies and crisis management*. Vol. 13, No. 2, 44-49.

MORABITO, L. (2006). La gestion des interdépendances entre infrastructures essentielles : méthode et outils. Troisième symposium annuel du réseau canadien d'étude des risques et dangers. Montréal.

NICOLET, R., TRUDEAU, N., DENIS, H., BERNIER, C., CLOUTIER, L., DICAIRE, A. et ROY, A. (1999). "Pour affronter l'imprévisible : les enseignements du verglas de 1998". *Rapport de la commission scientifique et technique chargée d'analyser les événements relatifs à la tempête de verglas survenue du 5 au 9 janvier 1998*. Les publications du Québec, Gouvernement du Québec, Canada. 442p.

NOZICK, L., TURNQUIST, M., JONES, D., DAVIS, J. et LAWTON, C. (2004). Assessing the Performance of Interdependent Infrastructures and Optimizing Investments. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii.

PEERENBOOM, J.P. (2001). Infrastructure interdependencies: overview of concepts and terminology. National Science Foundation/Office of Science and Technology Policy Workshop on Critical Infrastructure: Needs in Interdisciplinary Research and Graduate Training. Washington, DC.

PEERENBOOM, J.P. et FISHER, R.E. (2007). Analyzing Cross-Sector Interdependencies. Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii.

PETIT, F., ROBERT, B. et ROUSELLE, J. (2004). Une nouvelle approche pour la caractérisation des aléas et l'évaluation des vulnérabilités des réseaux de support à la vie. *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 31, No. 2, 333-344.

RENIERS, G.L.L., DULLAERT, W., ALE, B.J.M. et SOUDAN, K. (2005). Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of loss prevention in the process industries.* Vol. 18, No. 3, 127-138.

RINALDI, S., PEERENBOOM, J., KELLY, T. (2001). Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine.* IEEE. Vol. 21, No. 6, 11-25.

RINALDI, S. (2004). Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii.

ROBERT, B., SABOURIN, J.-P., GLAUS, M., PETIT, F. et SENAY, M.-H. (2003). A New Structural Approach for the study of Domino Effects Between Life Support Networks. *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*. Washington, D. C., Provention Consortium, The World Bank. 245-272.

ROBERT, B. (2005). La démarche de prévention : une gestion des risques reliée à l'interdépendance des infrastructures. *Les nouvelles tendances du développement urbain intégré*. Congrès international Urbistique. Montréal.

ROBERT, B., MARCHE, C., ROUSELLE, J. et PETIT, F. (2006). Method for consequence curves as applied to flood risks. *Int. J. Emergency Management*. Vol. 3, Nos. 2-3, 192-214.

ROBERT, B. (2007). La gestion de la vulnérabilité des réseaux de support à la vie face à leurs interdépendances. Symposium du programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures. Ottawa.

SIMPSON, D.M., ROCKAWAY, T.D., WEIGEL, T.A., COOMES, P.A. et HOLLOMAN, C.O. (2005). Framing a new approach to critical infrastructure modelling and extreme events. *Int. J. Critical Infrastructures*. Vol. 1, Nos. 2-3, 125-143.

SP (2007). A propos des infrastructures essentielles. Sécurité Publique Canada. Consulté le 25/04/2007, tiré de <http://www.psepc-sppcc.gc.ca/prg/em/nciap/about-fr.asp>.

TERMIUM (2007). Définition d'Infrastructures Essentielles. TERMIUM PLUS : base de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada, Bureau de la traduction. Consulté le 25/04/2007, tiré de

<http://www.termiumplus.bureaudelatrading.gc.ca/tpv2Show/termiumplus.html?lang=f2>.

WIMBISH, W. et STERLING, J. (2003). A National Infrastructure Simulation and Analysis Center (NISAC): Strategic Leader Education and Formulation of Critical Infrastructure Policies. *Centre for Strategic Leadership, US Army War College*. Vol. 6, 1-4.

ZHANG, J. (2007). Interdépendances des infrastructures au moyen d'une analyse des besoins et des compétences des intervenants ainsi que des risques auxquels ils doivent faire face. Symposium du programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures. Ottawa.

ZHANG, W. (2007). Simulation des réseaux d'infrastructures essentielles. Symposium du programme conjoint de recherche sur les interdépendances entre les infrastructures. Ottawa.