

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES INTERDÉPENDANCES GÉOGRAPHIQUES
ENTRE RÉSEAUX DE SUPPORT À LA VIE

BERTRAND LEFÉBURE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DES INTERDÉPENDANCES GÉOGRAPHIQUES
ENTRE RÉSEAUX DE SUPPORT À LA VIE

présenté par : LEFÉBURE Bertrand

en vue de l'obtention du diplôme de : MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

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

M. RIVETTE Mickael, ing., Ph. D., président

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

Mme. LAGACÉ BANVILLE Jessica, M. Sc. A., membre externe

DÉDICACE



C'est à ce moment-là que John se demanda si quelque chose échappait à l'enchaînement des causes et des effets. Puis il pensa aux conséquences de cette réflexion.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de recherche, Benoît Robert, qui m'a permis d'effectuer ma maîtrise au sein du *Centre risque & performance*, qui m'a toujours apporté son aide et qui a contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de mes études à l'École Polytechnique de Montréal .

Mes remerciements s'adressent également à Luciano Morabito pour son aide précieuse dans ce projet de recherche, pour sa collaboration, son soutien moral et ses réflexions et recommandations qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

Je tiens à remercier tous mes collègues du *Centre risque & performance*, en particulier Caroline Catalan, Irène Cloutier, Yannick Hémond, Gabriel Yan, Rachel Pagé-Bélanger et Cédric Debernard, avec qui j'ai passé de bons moments dans une très bonne ambiance de travail. Je n'oublie pas non plus les anciens : Frédéric Petit, William Pinel, Jean-Yves Pairet, Géraldine Guichardet et Romain Pellet.

Je remercie également ma famille qui m'a soutenu activement malgré la distance et le décalage horaire et mes amis restés en France qui m'ont souvent manqué pendant ces deux ans mais qui sont restés fidèles dans leur soutien.

Je remercie également Colette pour son soutien plus que motivant même dans les moments les plus difficiles.

Et enfin, je souhaite remercier les membres du jury pour leur temps précieux consacré à l'évaluation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Nos sociétés modernes, de plus en plus performantes technologiquement, sont aussi de plus en plus vulnérables aux défaillances des réseaux de support à la vie (RSV), comme les réseaux d'électricité, de gaz naturel, d'eau potable, de télécommunications, de transports, etc. En effet, d'une part, elles sont devenues de plus en plus dépendantes à ces RSV et d'autre part, ces RSV eux-mêmes sont devenus fortement interdépendants. Ainsi, la défaillance d'un RSV est capable d'entraîner des réactions en chaîne sur les autres réseaux, responsables de graves conséquences. De plus, à cause d'une proximité toujours plus étroite entre les infrastructures des RSV en milieu urbain, des liens d'interdépendances géographiques peuvent se créer. En effet, la propagation non maîtrisée d'une matière d'un RSV peut avoir des effets, dans une zone d'impact, capables d'entraîner des conséquences sur d'autres RSV.

Le besoin de développer des outils opérationnels, simples à mettre en place et à utiliser, dans un contexte où peu d'études conduisant à des résultats tangibles ont été menées, justifie la nécessité d'une telle étude sur les interdépendances géographiques.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire proposent donc une méthodologie permettant d'identifier, de caractériser et d'évaluer les interdépendances géographiques entre RSV, l'objectif final étant de permettre la mise en place de mesures d'atténuation dans des secteurs critiques. Elle conduit à la création d'outils permettant d'évaluer la vulnérabilité des secteurs face aux interdépendances géographiques et de déterminer leur degré de criticité, grâce, notamment, aux tableaux de vulnérabilité et aux cartes de criticité des secteurs. Par ailleurs, ces outils sont capables de s'intégrer à un système expert en fournissant des analyses supplémentaires pour identifier et prioriser des mesures d'atténuation face aux risques générés par les interdépendances géographiques. Cette méthodologie a été appliquée sur la ville de Montréal et a conduit à une évaluation de ses utilisations auprès des professionnels de la gestion des risques des RSV.

Le but d'une telle étude est d'outiller et de guider les gestionnaires des RSV dans leur prise de décisions face à de telles problématiques. Ces travaux devraient donc, à terme, aider chaque RSV à mieux se protéger des défaillances transmises par les RSV avec lesquels il entretient des liens d'interdépendances géographiques, ce qui contribuera à rendre nos sociétés moins vulnérables.

ABSTRACT

Our modern societies, ever more technologically efficient, are also increasingly vulnerable to failures in lifeline networks (LN), like electricity grids, natural gas, water, telecommunications, transportation, etc. Indeed, on the one hand, they have become increasingly dependent on these LN and on the other hand, these LN themselves have become highly interdependent. Thus, the failure of a LN can cause a chain reaction on other networks, causing unprecedented disasters. Moreover, because of the increasingly close proximity between the LN's infrastructures in urban areas, geographic interdependencies have appeared. Indeed, the uncontrolled spread of a LN's dangerous substance may have effects in an impact area that can have consequences on other LN.

In a context where few studies leading to tangible results have been carried out, the need to develop operational tools, easy to implement and to use, justifies such a study on geographic interdependencies.

Therefore, the research presented in this paper proposes a methodology to identify, characterize and evaluate geographic interdependencies between LN. The ultimate objective was to enable the implementation of mitigation measures in critical areas. It led to the creation of tools in order to assess the vulnerability of sectors in terms of geographic interdependences and determine their criticality degree, thanks to vulnerability tables and sectors criticality maps. Moreover, these tools are able to integrate an expert system by providing additional analysis to identify and prioritize mitigation measures against risks generated by geographic interdependencies. This methodology has been applied to the city of Montreal and led to a discussion of its applications by the LN's risk management professionals.

The purpose of this study is to equip and guide LN's managers in their decision-making in the face of such issues. Therefore, this work should ultimately help each LN to protect them from

failures transmitted by the LN with whom they have spatial dependence links, which contribute to make our societies less vulnerable.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Contexte.....	4
1.1.1 Vulnérabilité des sociétés.....	4
1.1.2 Densité et proximité des réseaux urbains.....	5
1.2 Définitions.....	9
1.2.1 Réseaux de support à la vie.....	9
1.2.2 Interdépendances entre réseaux de support à la vie.....	11
1.2.3 Interdépendances géographiques.....	12
1.2.4 Effets domino.....	14
1.3 Étude des interdépendances géographiques.....	15
1.3.1 Méthodologies d'identification.....	15
1.3.2 Mesures d'atténuation.....	21
1.3.3 Systèmes d'informations géographiques.....	22
1.3.4 Organismes concernés.....	24

1.4	Résumé.....	25
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....		27
2.1	Mise en contexte.....	27
2.2	Problématique.....	28
2.3	Sujet de recherche	28
2.4	Objectifs et contraintes.....	28
2.5	Démarche méthodologique	30
CHAPITRE 3 CONCEPTS.....		32
3.1	Définitions.....	32
3.2	Aide à la décision.....	36
3.3	Confidentialité des informations	37
3.4	Espace de coopération.....	37
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....		39
4.1	Introduction	39
4.2	Gestion des données.....	42
4.3	Identification des interdépendances géographiques.....	43
4.3.1	Étape 1 : Sectorisation de la zone à l'étude.....	43
4.3.2	Étape 2 : Évènements générateurs d'interdépendances géographiques	44
4.4	Caractérisation des interdépendances géographiques	46
4.4.1	Étape 3 : Conséquences engendrées par les interdépendances géographiques	46
4.4.2	Étape 4 : Situations de risque générant des interdépendances géographiques	47
4.5	Évaluation des interdépendances géographiques	48
4.5.1	Étape 5 : Identification de la vulnérabilité des secteurs	48
4.5.2	Étape 6 : Évaluation de la criticité des secteurs	49

4.5.3	Étape 7 : Analyse de la criticité des secteurs	52
4.6	Atténuation des risques liés aux interdépendances géographiques	53
4.6.1	Étape 8 : Mise en place des mesures d'atténuation	53
CHAPITRE 5	APPLICATION ET RÉSULTATS.....	54
5.1	Présentation de l'application	54
5.2	Application de la méthodologie	54
CHAPITRE 6	DISCUSSION	67
6.1	Utilisations	67
6.2	Intérêts et limites	69
CONCLUSION.....		72
BIBLIOGRAPHIE		75
ANNEXES.....		81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Nombre de défaillances survenues au cours des 13 semaines suivant la catastrophe du 11 septembre 2001 (Mendonça & Wallace, 2006)	14
Tableau 4.1 – Exemples d'événements générateurs d'IG	45
Tableau 4.2 – Tableau de synthèse finale de vulnérabilité des secteurs	49
Tableau 4.3 – Exemple de classement de secteurs en fonction des critères et des règles de hiérarchisation.	52
Tableau 5.1 – Exemple de zones d'impact en fonction du comportement des matières en jeu, adapté de Robert & Morabito (2009)	56
Tableau 5.2 – Tableau de vulnérabilité des infrastructures.....	59
Tableau 5.3 – Tableau de synthèse finale de vulnérabilité des secteurs	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Exemple de courbe d’effets domino créés par une perte d’alimentation en eau dans un secteur de la ville de Montréal (Robert & Morabito, 2008).....	15
Figure 1.2 – Synthèse générale des critères de sensibilité retenus dans la méthode (Griot, 2007).....	16
Figure 1.3 – Effets en chaîne des dangers technologiques liés aux combustibles sur des sites urbains (Estacio, 2004).....	18
Figure 1.4 – Ajout d’une infrastructure dans LID-GIS (Johnson & McLean, 2008).....	19
Figure 1.5 – Situation de risque provoquée par des lignes électriques parallèles à des conduites de gaz (Wolthusen, 2005).....	20
Figure 1.6 – Nœud critique entre plusieurs réseaux (Wolthusen, 2005).....	21
Figure 1.7 – Nœud papillon (CRAIM, 2006).....	22
Figure 3.1 – Définition du risque (Robert & Morabito, 2009).....	33
Figure 3.2 – Schéma conceptuel des liens d’interdépendances géographiques entre les RSV.....	35
Figure 3.3 – Démarche générale d’aide à la décision (CRC-ADT, 2005).....	36
Figure 4.1 – Méthodologie d’étude des interdépendances géographiques.....	41
Figure 4.2 – Découpage de la zone à l’étude en secteurs de taille identique.....	44
Figure 4.3 – Schéma des conditions génératrices d’un lien d’interdépendance géographique entre deux RSV.....	46
Figure 4.4 – Approche par conséquences, adapté de Gleyze (2001).....	47
Figure 4.5 – Exemple de densité d’équipement des RSV.....	50
Figure 4.6 – Exemple de secteurs voisins de rang n+1.....	51
Figure 5.1 – Grille de localisation – Ville de Montréal.....	55
Figure 5.2 – Synoptique de développement d’une explosion (Paris, 2010).....	57

Figure 5.3 – Densité d'équipement des RSV sur le territoire de la Ville de Montréal (données fictives).....	61
Figure 5.4 – Exemple de calcul du nombre d'équipements total des secteurs voisins de 1 ^{er} rang autour de quatre secteurs (données fictives).....	62
Figure 5.5 – Carte de criticité des secteurs n°1 (données fictives)	64
Figure 5.6 – Carte de criticité des secteurs n°2 (données fictives)	64

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ARIA : Analyse, Recherche et Information sur les Accidents.

BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels.

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

CRAIM : Conseil pour la réduction des accidents industriels majeurs.

CRP : *Centre risque & performance*.

CSC : Centre de sécurité civile de la ville de Montréal.

EWS : Early warning system.

IE : Infrastructure essentielle.

IF : Interdépendance fonctionnelle.

IG : Interdépendance géographique.

MDDEP : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

MSP : Ministère de la Sécurité publique du Québec.

RSV : Réseau de support à la vie.

SIG : Système d'information géographique.

SPC : Sécurité publique Canada.

UVCE : Unconfined Vapor Cloud Explosion.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Tableau de vulnérabilité des infrastructures	81
ANNEXE 2 – Tableau de synthèse finale de vulnérabilité des secteurs.....	82
ANNEXE 3 – Présentation des questionnaires de la méthodologie.....	83

INTRODUCTION

Le développement toujours plus rapide des sociétés industrialisées, depuis le siècle dernier, a permis une augmentation considérable du niveau de confort des citoyens. De nombreuses avancées technologiques ont été réalisées, notamment dans le domaine des transports, avec des modes de déplacement diversifiés et des réseaux de plus en plus étendus et complexes ; dans le domaine de l'énergie, avec le déploiement de moyens de production et de distribution de plus en plus importants ; et dans le domaine des télécommunications, avec une dépendance accrue des systèmes d'information à l'informatique. Malheureusement, toutes ces avancées technologiques, devenues nécessaires au bien-être des populations, sont devenues, par la même occasion, génératrices de nouvelles sources de dangers et de nouveaux types de risques. En effet, de nouvelles vulnérabilités sont apparues, capables d'entraîner des conséquences à grande échelle. Et les événements des dernières années, comme l'ouragan Katrina en août 2005 à la Nouvelle-Orléans, le « black out » de 2003 dans le Nord-Est des États-Unis, les attentats terroristes du 11 septembre 2001 à New York ou la grande tempête de verglas en 1998 au Québec, témoignent largement de cette tendance.

Plusieurs facteurs sont responsables des réactions en chaîne qui font très souvent partie des grandes catastrophes naturelles et technologiques. Parmi eux, on peut identifier la dépendance vitale de nos sociétés aux ressources essentielles fournies par les Réseaux de Support à la Vie (RSV), comme l'électricité, le gaz naturel, l'eau potable, les télécommunications, les transports, etc. En plus des liens de dépendances qu'entretient une population avec ses RSV, ceux-ci entretiennent, entre eux, des liens d'interdépendances. En effet, ils ont développé, d'une part, des relations de type client / fournisseur qui leur permettent d'utiliser, pour leur fonctionnement, des ressources d'autres RSV. Et d'autre part, des liens d'interdépendances géographiques se sont créés entre les RSV à cause d'une proximité toujours plus étroite entre leurs équipements. En effet, un déploiement grandissant de nouveaux équipements en zone urbaine n'a cessé de densifier le tissu des infrastructures. La recherche de solutions toujours moins coûteuses a permis l'enfouissement de nombreux réseaux dans les mêmes couloirs de passage (Zimmerman, 2002).

Et de nombreuses infrastructures, vieillissantes, représentent un danger potentiel pour les installations voisines.

Non seulement de nouvelles possibilités de défaillances se sont donc créées avec le développement des RSV, mais leurs interdépendances ont aussi permis que ces défaillances se propagent facilement d'un RSV à l'autre, entraînant des conséquences en cascade, qualifiées d'« effets domino ». Alors que de nombreuses études ont été faites, par les RSV eux-mêmes, sur leurs vulnérabilités internes, l'étude des vulnérabilités provoquées par des événements externes est devenue un aspect incontournable dans leur protection et doit résulter d'une étude conjointe et coordonnée entre les RSV.

Dans ce contexte, les gestionnaires des RSV et les responsables des mesures d'urgence de la sécurité publique ont besoin d'avoir des outils capables de les aider dans leur compréhension des mécanismes d'effets domino et dans le choix et la mise en place de mesures de protection. Les travaux de recherche développés dans ce mémoire vont donc se présenter comme un outil d'aide à la décision pour améliorer la protection des RSV face à des liens d'interdépendances géographiques.

Dans une première partie, une revue de littérature sera faite sur le sujet. Elle présentera, en premier lieu, le contexte actuel duquel relève la problématique concernant les interdépendances géographiques. Elle exposera les définitions faites à ce sujet et les concepts associés aux domaines de la gestion des risques et des interdépendances entre les RSV. Une revue des méthodologies existantes abordant de près ou de loin la problématique de notre étude sera effectuée et on présentera les outils utiles à ce type d'étude.

Dans une deuxième partie, on exposera le cadre de l'étude et la problématique qui découle des questions et des besoins exprimés par la revue de littérature. La nécessité d'une telle étude sera précisée par la définition du sujet de recherche. À cette occasion on avancera les différents

objectifs que l'on doit remplir pour atteindre la solution à notre problématique ainsi que les contraintes qui devront être respectées.

La troisième partie visera à définir les concepts utilisés pour établir un cadre commun à la méthodologie et favoriser une meilleure compréhension des phénomènes en jeu. Elle abordera aussi l'utilisation des systèmes d'information géographique, le problème de la confidentialité des informations et la création de l'espace de coopération.

Dans la quatrième partie, sera présentée la méthodologie mise en place pour répondre à l'identification, la caractérisation, l'évaluation et l'analyse des interdépendances géographiques et à l'identification de secteurs critiques. Elle présentera la démarche à adopter pour obtenir de tels résultats puis expliquera les différentes étapes à effectuer en précisant les paramètres et les critères nécessaires à une telle étude.

Dans la cinquième partie, on exposera l'application de la méthodologie développée précédemment à l'échelle d'une ville comme Montréal pour des problématiques particulières. Nous verrons les résultats qui peuvent en découler.

Dans la dernière partie, on mènera une discussion sur les utilisations possibles de ces résultats. Elle sera renforcée par l'intégration des avis et des remarques des professionnels des RSV, faites à la suite des présentations auxquelles a donné lieu l'étude présentée dans ce mémoire.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

La première partie de ce chapitre met en lumière le contexte actuel de forte vulnérabilité de nos sociétés face à la défaillance des RSV, contexte dans lequel s'inscrivent les interdépendances géographiques. Elle recense les accidents importants impliquant des problématiques de risques générées par la proximité géographique des infrastructures et entraînant des effets domino. La deuxième partie présente les différents travaux trouvés dans la littérature qui tentent de définir et de caractériser les infrastructures et les réseaux de support à la vie, les interdépendances et les effets domino. Puis, on présentera en particulier les définitions qui ont été faites sur les interdépendances géographiques et on exposera les méthodes qui cherchent à les évaluer. Enfin, on verra les outils et services déjà existants utiles à la prévention et à la détection des interdépendances géographiques.

1.1 Contexte

1.1.1 Vulnérabilité des sociétés

Les attentats terroristes du 11 septembre 2001 à New York, le « blackout » du 14 août 2003 aux États-Unis et au Canada, la grande tempête de verglas du 5 au 8 janvier 1998 au Québec, sont autant d'évènements qui ont souligné la vulnérabilité des grands réseaux d'infrastructures et entraîné une réflexion de fond sur la gestion de la sécurité des grands services indispensables au bon fonctionnement de nos sociétés industrialisées. En effet la vulnérabilité de ces grands réseaux s'est démultipliée au cours des dernières années (Michel-Kerjan, 2003). Et nos sociétés, en voulant se doter de réseaux toujours plus performants et avancés technologiquement, en cherchant à minimiser les coûts et à fournir des services généralisés, ont en même temps permis une hyper connexion de ces réseaux. Paradoxalement, ces liens d'interconnexion, rendus indispensables, sont aussi devenus la source de propagation de défaillances en cascade, entraînant des conséquences néfastes pour les sociétés.

Par exemple, en janvier 1998 la tempête de verglas au Canada a causé l'effondrement successif de plusieurs réseaux. En effet, des pluies verglaçantes ont paralysé le sud du Québec, l'Ontario et le nord des États-Unis en détruisant des lignes électriques qui n'ont pas résisté au poids de la glace. Plus de trois millions de Canadiens ont été privés d'électricité par des températures avoisinant les -25°C . Quatre des cinq lignes principales qui alimentaient Montréal sont tombées en panne. Plus de 130 lignes du réseau ont été détruites (3000 km de lignes) et 1400 relais de transmission ont été endommagés ou entièrement détruits. L'approvisionnement en eau de Montréal a failli s'arrêter, risquant de mettre en jeu la santé de la population et le fonctionnement des services de protection incendie. Le réseau de transport a lui aussi été perturbé et les pertes liées aux dégâts se sont évaluées à près de 3 milliards de dollars (Michel-Kerjan, 2003; Nicolet et al., 1999).

1.1.2 Densité et proximité des réseaux urbains

Parmi l'historique des accidents technologiques survenus dans le monde pendant les dernières décennies, on retrouve de nombreux cas d'accidents dont les conséquences ont été exacerbées par le déclenchement d'effets domino inattendus, souvent provoqués par la proximité géographique des différents réseaux d'infrastructures en milieu urbain.

En Belgique le 30 juillet 2004, une fuite suivie d'une violente explosion survient sur un gazoduc passant dans la banlieue industrielle de Bruges (1 mètre de diamètre et 8000 kPa de pression). La fuite est détectée par le sifflement émis par le gaz non odorisé à ce stade. Une demi-heure plus tard une explosion se produit avec formation d'une boule de feu qui provoque l'incendie d'une usine en construction et d'une station-service à proximité. La zone est brûlée sur plusieurs centaines de mètres, les voitures calcinées jusqu'à 500 mètres et on retrouve même un tronçon de canalisation de 6 tonnes à 150 mètres de là. Le pipeline voisin est lui aussi endommagé. Le bilan, très lourd, s'élève à 24 morts et 132 blessés (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions industriels [BARPI], 2010a).

Aux États-Unis, le 19 juillet 2001 un train de marchandises de 62 wagons transportant des produits chimiques dangereux a déraillé dans un tunnel à Baltimore. Cet événement, en plus d'avoir provoqué des perturbations sur le trafic ferroviaire et routier et mobilisé les services d'urgence, a entraîné des réactions en chaîne inattendues. En effet, le feu qui s'est déclaré dans le tunnel a entraîné l'explosion d'une canalisation d'eau majeure (1 mètre de diamètre) située juste au-dessus, créant des geysers de près de 6 mètres de hauteur. Cette fuite a alors provoqué des inondations partielles atteignant jusqu'à 1 mètre de profondeur à certains endroits. Mais ces inondations ont elles-mêmes causé des pannes électriques, privant d'électricité près de 1200 résidences du centre-ville. Les câbles de fibre optique passant dans le tunnel ont eux aussi été détruits, déclenchant des défaillances majeures dans les réseaux de téléphonie fixe et mobile, les connexions internet et les services de transfert de données de six grandes compagnies (Pederson et al., 2006).

En France, le 7 décembre 1999, la rupture d'une importante canalisation d'eau (500 mm de diamètre) entraîne l'inondation d'un quartier entier de la ville de Grenoble, libérant 20000 m³ d'eau sur une superficie de 80000 m². Du fait de l'important débit, la fuite est difficile à localiser et elle n'est stoppée qu'au bout de 2 heures 30 minutes. Elle provoque des courts-circuits et plusieurs départs d'incendie. Les sociétés de gaz et d'électricité sont dépêchées sur les lieux et l'assèchement total du quartier ne se terminera que le lendemain soir (BARPI, 2010b).

Plus récemment certains événements survenus en Ontario et au Québec viennent nous rappeler cette omniprésence des risques urbains et des conséquences engendrées par la proximité des infrastructures.

Une fuite de gaz le 18 février 2009 dans le Vieux-Montréal a entraîné l'évacuation de près de 7000 personnes. Trois gratte-ciels ont été évacués, dont les bureaux de la Banque de Montréal. Hydro-Québec a dû couper l'électricité de près de 750 clients du quartier du Vieux-Montréal en raison des risques d'incendie, d'électrocution et d'explosion. Le service a été rétabli au bout de plusieurs heures (Handfield, 2009).

L'explosion majeure d'un dépôt de propane de l'usine « Sunrise Propane » au Nord de Toronto le 10 août 2008 a entraîné l'évacuation de près de 12000 personnes pendant une quinzaine d'heures. Un périmètre de sécurité d'un rayon de 1,6 kilomètres autour de l'usine a été mis en place, l'alimentation en gaz naturel et en électricité du quartier a été interrompue et une partie de l'autoroute 401 (la plus fréquentée du pays) a été fermée ainsi qu'un grand centre commercial et plusieurs stations de métro. Le survol du site a lui aussi été interdit (BARPI, 2010c).

En France, la base de données « Analyse, Recherche et Information sur les Accidents » (ARIA) gérée par le BARPI, recense près de 32000 accidents survenus dans le monde entier « qui ont, ou qui auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. ». Elle identifie notamment, dans sa typologie des accidents, un volet « effets domino » et, plus particulièrement, ceux provoqués par des canalisations de matières dangereuses. Dans ce cas une synthèse des différentes situations de danger récurrentes a ainsi été établie. Il en ressort des informations particulièrement intéressantes pour l'étude des interdépendances géographiques (BARPI, 2010d) :

- Dans le cas du transport de matières inflammables et si la fuite ne s'enflamme pas dans les premiers instants, la matière dangereuse, gaz ou liquide, peut se propager sur une distance importante, en suivant des chemins préférentiels (caniveaux, égouts, terrains fissurés, etc.) avant de s'enflammer ou d'exploser au contact d'un point chaud ou d'une étincelle. En cas d'allumage retardé, la dispersion prolongée et étendue de matière inflammable sous forme liquide ou gazeuse est un facteur qui conditionne l'importance des effets. Ce type d'accident peut être lourd de conséquences et entraîner de nombreuses victimes. Le rayonnement thermique peut aussi enflammer des matières combustibles stockées à proximité et faire fondre des équipements sensibles proches.
- L'onde de surpression ou le souffle d'une explosion, ainsi que les projections de fragments peuvent impacter des infrastructures proches, mais peuvent également entraîner

des effets domino loin de la fuite, notamment lorsque le nuage inflammable formé explose sur un point chaud ou à cause d'une étincelle à plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres de la fuite. Plusieurs «Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion » (BLEVE) de réservoirs de gaz liquéfié inflammable ou toxique répertoriés ont notamment pour origine un feu de canalisation.

- De graves pollutions peuvent être causées par des canalisations enfouies et il peut être long de les détecter, dans le cas d'une fuite de faible débit sur une longue durée par exemple.
- Les couloirs où sont enterrés plusieurs types de canalisations et de câbles à proximité les uns des autres représentent un risque particulier pour la propagation d'un phénomène dangereux d'un réseau à l'autre.
- Le transport de matières toxiques peut provoquer des effets domino indirects en contaminant une zone et en la rendant inexploitable. En effet en cas de fuite d'ammoniac ou de chlore, par exemple, les employés travaillant dans la zone d'impact sont susceptibles de devoir arrêter leurs activités et le fonctionnement de certaines infrastructures peut s'en trouver dégradé.
- Les substances corrosives méritent, elles aussi, qu'on leur porte une attention particulière car elles représentent un danger indirect pour les autres canalisations plus dangereuses à proximité (matières toxiques, gaz ou liquides inflammables, etc.)
- Les bris de canalisations d'eau, de diamètres importants et de pressions élevées, peuvent être responsables d'importants dommages sur les infrastructures proches. Notamment en détremplant les sols, en affaiblissant les fondations, en provoquant des glissements de terrains et des tassements différentiels, en submergeant des équipements ou en

déclenchant des courts-circuits. Par exemple la fuite d'une canalisation d'eau à proximité d'une canalisation de gaz peut provoquer un tassement différentiel du sol où repose la conduite et exercer des contraintes entraînant la rupture de cette dernière.

1.2 Définitions

1.2.1 Réseaux de support à la vie

Au niveau fédéral, le ministère de la Sécurité publique du Canada (SPC) parle d' « infrastructures essentielles » (IE). Depuis début 2010, Sécurité publique Canada les définit comme « les processus, les systèmes, les installations, les technologies, les réseaux, les biens et les services qui sont essentiels à la santé, à la sécurité ou au bien-être économique des Canadiens et des Canadiennes, ainsi qu'au fonctionnement efficace du gouvernement. ». Elle ajoute aussi le fait qu'elles peuvent être interconnectées entre différents niveaux d'administration et interdépendantes entre elles (SPC, 2010).

Au niveau provincial, le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) parle quant à lui d' « infrastructures stratégiques » et vient rejoindre la définition de SPC en considérant qu'une infrastructure stratégique est « une infrastructure qui fournit un service d'une importance telle pour la société que sa perte engendrerait des conséquences majeures sur la santé, la sécurité ou le bien-être des citoyens ou encore sur le fonctionnement efficace du gouvernement. ». Il précise aussi qu' « une infrastructure peut prendre la forme d'une installation, d'un système, d'un réseau ou encore d'un bien. » (MSP, 2010a). Par ailleurs, le Québec a entrepris une démarche gouvernementale afin d'accroître la résilience des « systèmes essentiels » présents sur son territoire. Ces systèmes produisent ou fournissent des « ressources essentielles » qui sont des ressources « dont l'indisponibilité, même momentanée, peut engendrer des conséquences potentielles significatives et néfastes sur la santé, la vie, la sécurité, le bien-être social et économique d'une personne ou d'une collectivité, sur la viabilité d'une entreprise et sur le fonctionnement efficace du gouvernement et de ses institutions ». Cette démarche vise notamment à maintenir ou à rétablir le fonctionnement des systèmes essentiels à un niveau de fonctionnement acceptable malgré des défaillances (MSP, 2010b).

La stratégie nationale qui vise à accroître la résilience des infrastructures essentielles, en cours d'élaboration par le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux et territoriaux, les classe en dix secteurs (SPC, 2010) :

- **L'énergie et les services publics** – systèmes de production et de distribution d'électricité, de gaz, de pétrole, etc.
- **Les technologies de l'information et des communications** – réseaux de télécommunication et de radiodiffusion, réseaux informatiques, etc.
- **Les finances** – réseaux bancaires, bourses, etc.
- **La santé** – hôpitaux, réserves de vaccins, réserves de sang, etc.
- **L'alimentation** – industries alimentaires, agriculture, etc.
- **L'eau** – traitement et distribution de l'eau potable, gestion des eaux usées, etc.
- **Les transports** – ponts, réseau routier, aéroports, ports, etc.
- **La sécurité** – police, sécurité incendie, etc.
- **Le gouvernement** – services gouvernementaux, ministères, Assemblée nationale, etc.
- **Les industries** – industries chimiques, métaux, etc.

Aux États-Unis et dans l'Union Européenne on utilise plutôt les termes « critical infrastructure » (Moteff et al., 2003) ou « infrastructure critique » (UE, 2004) pour désigner les infrastructures essentielles et il existe des variations dans la liste des secteurs pris en compte en fonction des pays. On ne retrouve donc pas forcément les mêmes qu'au Canada.

Le *Centre risque & performance* (CRP), quant à lui, privilégie le terme « réseaux de support à la vie » (RSV) pour mettre en évidence le rôle fondamental qu'ils jouent dans la vie des citoyens et éviter d'utiliser le terme « infrastructure » qui peut créer la confusion entre le système (l'« infrastructure essentielle », le réseau d'électricité par exemple) et ses équipements (un poste électrique par exemple). Dans la suite de ce mémoire on utilisera donc le terme « RSV » que ce

soit pour désigner les infrastructures essentielles, les infrastructures critiques ou les infrastructures stratégiques.

Dans l'application finale, on s'attachera particulièrement aux secteurs de l'énergie et des services publics, des technologies de l'information et des communications, de l'eau et des transports.

On peut différencier deux types de RSV :

- Les RSV dépendants ;
- Les RSV interdépendants.

Un réseau est dit « dépendant » lorsqu'il existe une relation unidirectionnelle faisant état de la dépendance de ce réseau par rapport à un autre. Par exemple, les hôpitaux sont directement dépendants du réseau électrique mais l'inverse n'est pas vrai.

Deux réseaux sont dits « interdépendants » lorsqu'il existe une relation bidirectionnelle faisant état de la dépendance mutuelle entre ces réseaux. Par exemple, les réseaux d'électricité et de télécommunications sont interdépendants car ils ont besoin l'un de l'autre pour fonctionner normalement.

1.2.2 Interdépendances entre réseaux de support à la vie

Les zones fortement urbanisées dépendent de plus en plus de l'approvisionnement en ressources et services essentiels par les réseaux de transmission et de distribution tels que les réseaux de transports, de télécommunications, d'eau potable, d'électricité ou de gaz naturel. Ces réseaux sont souvent interconnectés et l'augmentation de la densité de certaines zones urbaines provoque une forte dépendance vis-à-vis de ces liens de connectivité (Zimmerman, 2002). En effet ces réseaux sont eux-mêmes interdépendants les uns des autres de différentes manières.

Une interdépendance entre deux RSV est définie par Rinaldi et al. (2001) comme une relation bidirectionnelle entre deux infrastructures dont l'état de l'une est influencé ou en corrélation avec

l'état de l'autre. Ces travaux identifient quatre types d'interdépendances possibles entre deux RSV:

- Les interdépendances physiques ou fonctionnelles (IF) : si chacun des deux RSV utilise une ressource matérielle fournie par l'autre RSV. Il s'agit de relations de type client/fournisseur.
- Les interdépendances cybernétiques : si un RSV est dépendant de l'utilisation d'informations électroniques.
- Les interdépendances géographiques : si les équipements de chacun des deux RSV se trouvent à proximité les uns des autres.
- Les interdépendances logiques : si chacun des deux RSV est dépendant de l'autre par un lien qui ne serait pas un lien de dépendance physique, cybernétique ni géographique (un lien financier par exemple).

1.2.3 Interdépendances géographiques

Pour Robert et Morabito (2009) les interdépendances géographiques résultent de la proximité géographique entre RSV. C'est à dire que la défaillance d'un RSV entraîne la défaillance d'un autre RSV par proximité. Par exemple, si l'explosion d'une conduite d'eau cause des dommages sur la chaussée on dira qu'il y a une interdépendance géographique entre le réseau d'eau et le réseau de transport.

Les travaux de Rinaldi et al. (2001) abordent la question sous un autre angle en affirmant que des infrastructures essentielles sont géographiquement interdépendantes si un événement local sur l'environnement peut créer des changements d'état dans chacune d'entre elles. De tels changements proviennent de l'influence qu'un aléa exerce sur toutes les infrastructures essentielles simultanément. Les interdépendances géographiques sont dues à une proximité des infrastructures essentielles qui entraîne une vulnérabilité groupée. Mais le fait que, dans ce groupe, une infrastructure essentielle touchée par l'aléa puisse entraîner la défaillance d'une ou

plusieurs autres infrastructures essentielles, n'est pas vraiment pris en compte dans cette définition.

Dans le même ordre d'idée, Dudenhoeffler et al. (2006) considèrent que des infrastructures sont géographiquement interdépendantes si un événement local sur l'environnement affecte les composantes de nombreuses infrastructures par proximité physique.

Dans le contexte d'une étude sur les attaques terroristes sur le World Trade Center en 2001, les infrastructures sont définies comme « co-localisées » si l'un de leurs composants ou l'une de leurs activités physiques sont situés dans une même zone géographique. Il peut alors exister des interdépendances géographiques entre ces infrastructures (Wallace et al., 2003).

Par la suite, Mendonça et Wallace (2006) publient une étude sur les impacts de ces attaques sur les infrastructures essentielles de la ville de New York, dans laquelle ils recensent le nombre de défaillances enregistrées au cours des semaines suivant la catastrophe. Ces défaillances concernent huit RSV : les réseaux de transport, de télécommunication, d'électricité, d'eau potable, de gaz et de pétrole, les services d'urgence, les services gouvernementaux et les banques. Les auteurs prennent en compte les défaillances suivantes, se rapportant à différents types d'interdépendances :

- Type « Input », qui se rapporte aux interdépendances fonctionnelles ;
- Type « Colocation », qui se rapporte aux interdépendances géographiques ;
- Type « Exclusive-or », qui se rapporte au fait qu'entre deux infrastructures qui utilisent normalement un même service, seulement une seule peut en profiter.

Ils obtiennent alors des statistiques sur le nombre de défaillances survenues, en fonction de plusieurs paramètres tels que le temps, le type de RSV ou encore le type d'interdépendances. Le tableau 1.1 ci-après illustre l'importance des interdépendances dans une catastrophe de ce type car environ 20 % des défaillances enregistrées impliquaient effectivement des interdépendances.

Il met aussi en évidence la part importante des interdépendances géographiques dans ces évènements, surtout la première semaine.

Tableau 1.1 – Nombre de défaillances survenues au cours des 13 semaines suivant la catastrophe du 11 septembre 2001 (Mendonça & Wallace, 2006)

Week(s)	Interdependency			None	Total
	Input	Colocation	Exclusive-or (XOR)		
1	8	16	2	68	94
2–13	9	11	0	101	121
1–13	17	27	2	169	215

Enfin on retrouve dans la littérature une autre définition qui s'écarte de celles vues précédemment et qu'il s'agit de connaître pour éviter les confusions. En effet, Restrepo et al. (2006) parlent d'un autre type d'interdépendances géographiques qui ne se rapporteraient non pas à une « co-localisation » mais aux interdépendances fonctionnelles entre différentes juridictions géographiques. Les échanges d'énergie électrique entre différents pays, comme le Canada et les États-Unis, en seraient un exemple.

1.2.4 Effets domino

Du point de vue d'un RSV il existe deux types d'effets domino (Reniers et al., 2005) :

- Les effets domino internes, causés par la propagation d'une défaillance d'un équipement à un autre au sein même de ce RSV ;
- Les effets domino externes, causés par la propagation de la défaillance de ce RSV à d'autres RSV, que ce soit par des liens de dépendance fonctionnelle, cybernétique, logique ou géographique.

Le plus souvent les analyses de risque tiennent compte des effets domino internes à un RSV ou des effets de la nature sur ce même RSV. Or, il est particulièrement intéressant d'étudier les effets domino externes car bien souvent ils sont responsables de vulnérabilités insoupçonnées. Pour cette raison, le CRP a mis en place des courbes d'effets domino qui permettent d'identifier

les situations susceptibles de générer des effets domino indésirables et la propagation des défaillances potentielles lorsqu'une ressource est non disponible dans un secteur d'une zone d'étude (Robert & Morabito, 2008). La figure 1.1 présente un exemple d'une courbe d'effets domino réalisée pour le centre-ville de Montréal. On peut y visualiser les différents RSV concernés, leur niveau de fonctionnement en fonction du temps (représenté par leur couleur) ainsi que le degré des effets domino en jeu.

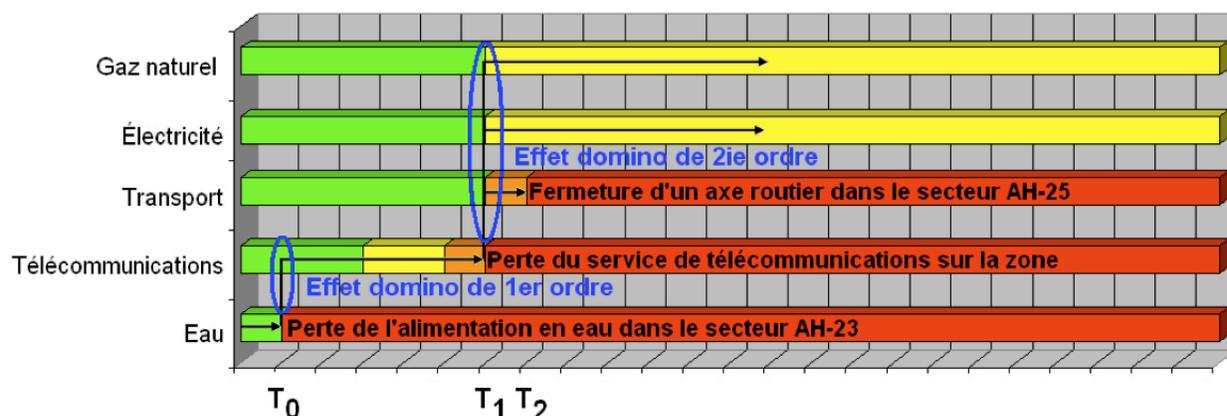


Figure 1.1 – Exemple de courbe d'effets domino créés par une perte d'alimentation en eau dans un secteur de la ville de Montréal (Robert & Morabito, 2008)

Sur cette courbe on peut remarquer que la perte d'alimentation en eau dans le secteur AH-23 entraînerait une perte de service du réseau de télécommunications dans la même zone, au temps T_1 , à cause d'une dépendance des télécommunications au réseau d'eau dans cette zone. En effet les équipements de télécommunications ont besoin d'eau pour alimenter leurs circuits de refroidissement. À son tour, cette panne provoquerait la fermeture d'une autoroute dans le secteur AH-25 au temps T_2 , mettant à jour la dépendance du réseau de transport aux données fournies ou acheminées par le réseau de télécommunications.

1.3 Étude des interdépendances géographiques

1.3.1 Méthodologies d'identification

Griot (2007) propose une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des espaces face aux risques liés au transport de matières dangereuses, issue de l'expertise de la sécurité civile. Cette

méthodologie consiste dans un premier temps à définir la vulnérabilité d'une zone à risque comme la combinaison de différents facteurs concernant les cibles vulnérables en présence, leur niveau de sensibilité aux effets ou aux conséquences potentielles et leur degré d'exposition à l'aléa.

Vulnérabilité = f (cibles, niveau de sensibilité, degré d'exposition)

Dans un deuxième temps il s'agit d'identifier une typologie des cibles (humaines, matérielles et environnementales) et des conséquences prévisibles, comme l'illustre la figure 1.2 ci-après. On remarque que les conséquences indirectes comme les effets domino sont pris en compte pour déterminer la vulnérabilité des cibles.

ESPACE VULNERABLE APPREHENDÉ A TRAVERS LES CIBLES			
	Humaines***	Matérielles	Environnementales***
Détail des cibles	Habitat Etablissements de nuit Etablissements quotidiens Zones couvertes de loisirs ou de transit Zones de plein air de loisirs ou de transit Traffics de voyageurs	Infrastructures liées à l'eau* Zones à vocation industrielle de type ICPE* Energie et infrastructures d'intérêt public* Infrastructures routières et ferroviaires* Infrastructures des zones portuaires ou aéroportuaires Extraction de matériaux, décharges, chantiers	Zones agricoles Forêts Marais ou zones humides Autres espaces naturels Eau
Effets	Thermiques Surpression Toxiques d'un gaz Infectieux Radioactifs	Thermiques Surpression Toxiques d'un gaz Infectieux Radioactifs Pollution accidentelle	Thermiques Surpression Toxiques d'un gaz Infectieux Radioactifs Pollution accidentelle
Conséquences prévisibles**	Difficulté à confiner (D) Difficulté à évacuer (D) Risque d'effet panique (D) Impact sanitaire (I) Impact économique (I) Impacts quotidiens (I) Impacts psycho-médiatiques (I)	Valeur financière (D) Effet domino (I) Pertes financières prévisibles (I) Impact sur la santé publique (I) Impacts quotidiens (I) Impacts psycho-médiatiques (I)	Valeur financière (D) Effet domino (I) Pertes financières prévisibles (I) Impact écologique (I) Impacts sur la santé publique (I) Impacts quotidiens (I) Impacts psycho-médiatiques (I)

M1 : Ressources en eau potable ou brute, stations d'épuration ...
M2 : Installations Seveso, soumises à autorisation (centrales EDF, centrales thermiques...), gares de triage ...
M3 : Génération d'énergie (barrages, poste électrique ...), réseau tubulaire enterré, installations radioélectriques, télécommunications ...
M4 : Réseaux routiers et ferroviaires et leurs équipements respectifs (tunnels, ponts, péages...)
D : Conséquences directes
I : Conséquences indirectes

Une typologie affinée a été établie en plus pour les cibles humaines et environnementales en raison de leur complexité et la sensibilité des cibles humaines a été étudiée distinctement selon les conditions diurnes et nocturnes.

Figure 1.2 – Synthèse générale des critères de sensibilité retenus dans la méthode (Griot, 2007)

Ensuite une hiérarchisation des cibles est effectuée selon les différents critères de sensibilité à partir de la méthode « Analytic Hierarchy Process » (AHP). La prise de décision selon la méthode AHP est un processus qui conduit à définir :

- Les objectifs : l'évaluation de la sensibilité de l'espace aux effets ou l'évaluation de la sensibilité de l'espace vis à vis des conséquences prévisibles ;
- Les alternatives à comparer : les cibles ;
- Les critères d'évaluation : les effets ou les conséquences.

Le but est de structurer les critères d'évaluation selon l'objectif et d'établir des priorités entre les alternatives selon chaque critère. La première étape consiste à comparer les différents critères deux à deux par rapport à l'objectif afin d'évaluer leur importance. La seconde s'attache à hiérarchiser de la même manière les alternatives selon chaque critère. Les experts sont ainsi amenés à se prononcer sur l'importance relative des cibles entre elles par rapport à un effet ou une conséquence. Les évaluations portées pour une cible sur chacun des critères sont ensuite « agrégées » pour obtenir l'évaluation globale du niveau de sensibilité de la cible.

Enfin, une application cartographique du modèle de vulnérabilité est mise en œuvre grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) et à la réalisation du carroyage de la zone d'étude (Griot, 2007).

Estacio (2004) utilise des outils et des modèles comme les SIG, les chorèmes¹ et la systémique pour évaluer les espaces exposés aux risques technologiques (à grande échelle) et les conséquences dans le district métropolitain de Quito en Équateur (à petite échelle). Ces outils permettent de tester différentes méthodes pour la représentation spatiale des risques technologiques dans la ville et de faire des suggestions pour son amélioration. La figure 1.3 ci-après illustre bien les réactions en chaîne que peut causer la perte de confinement et l'allumage d'une matière combustible sur les autres réseaux. On y retrouve la notion d'interdépendances géographiques (IG) représentée par la « conséquence 1 » et la notion d'interdépendances

¹ Un chorème est une représentation schématique d'un espace choisi. Il vise à représenter toute la complexité du territoire à l'aide de formes géométriques. Le chorème cherche à tenir compte de toute la dynamique présente sur le territoire étudié.

fonctionnelles (IF) représentée par la « conséquence 2 ». On peut aussi remarquer que la plupart du temps une IG est susceptible d'entraîner une ou plusieurs IF et parfois même une autre IG.

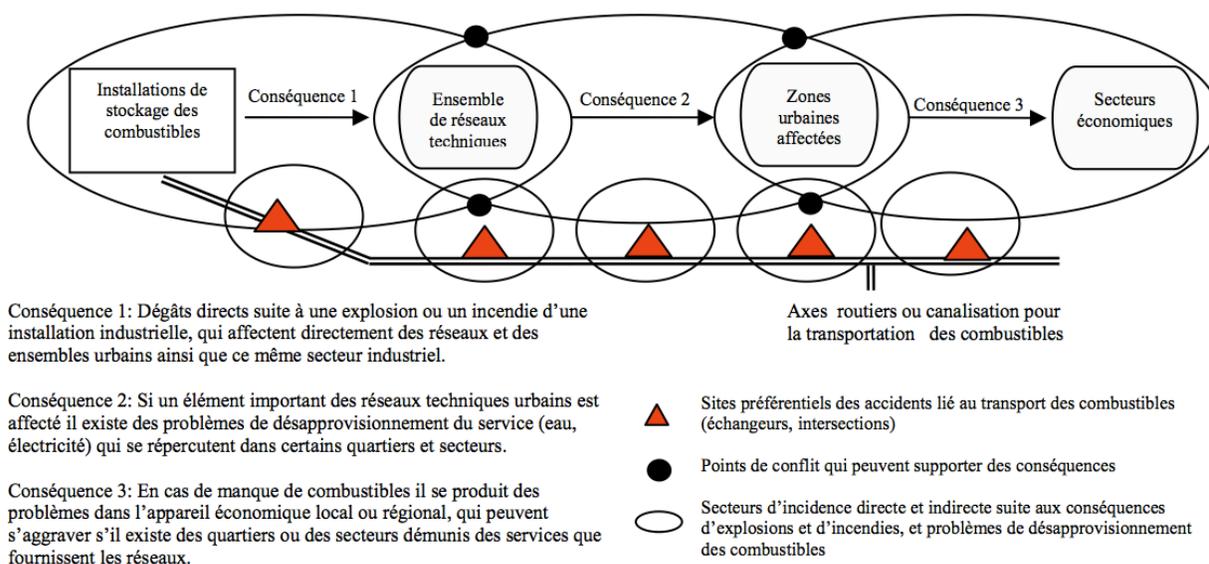


Figure 1.3 – Effets en chaîne des dangers technologiques liés aux combustibles sur des sites urbains (Estacio, 2004)

Johnson et McLean (2008) soulignent l'importance de développer des outils permettant d'aider les RSV locaux à identifier leurs dépendances. En effet les agences nationales de protection des infrastructures, comme le « UK Centre for the Protection of National Critical Infrastructure » au Royaume-Uni, doivent être préparées à fournir de l'aide à de nombreuses organisations locales simultanément. Pour cela, elles établissent des directives au niveau national mais délèguent à un niveau local la responsabilité de la mise en place des plans d'urgence. Malheureusement, il existe un écart important entre les stratégies nationales et leur mise en œuvre au niveau local.

Pour cela, Johnson et McLean (2008) préconisent l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) pour identifier les interdépendances entre les infrastructures essentielles locales. Leur logiciel, appelé « Local Infrastructure Dependencies Geographical Information System » (LID-GIS) permet de représenter sur une carte les infrastructures critiques et de

mesurer à quel point elles sont « co-localisées ». Les utilisateurs peuvent ajouter des infrastructures à la base de données, à l'aide de l'interface représentée dans la figure 1.4, en fournissant des informations telles que :

- Les coordonnées exactes de l'infrastructure ;
- L'importance de l'infrastructure, qui représente son utilité ou sa valeur en tant que cible potentielle (une approche simplifiée est utilisée dans le prototype) ;
- La sensibilité de l'infrastructure, qui représente sa vulnérabilité face à un scénario de danger potentiel ;
- Des paramètres qui varient en fonction du type de l'infrastructure : les caractéristiques techniques pour un poste électrique ou le nombre de patients pour un hôpital par exemple.

Le système utilise ensuite la proximité géographique des infrastructures pour calculer des clusters de vulnérabilité importante, ces clusters variant en fonction du scénario envisagé.

The screenshot shows a dialog box titled "Add New Target Point". It contains the following information and fields:

Information
 You can use this window to add a new target to the system.
 When the value is changed using the controls, the new value will be automatically updated in the database.
 If you type in a new values from you will need to hit the 'Return' key to force the change.

New Record

Name:	Wilton Street Station
Type:	Subway Station
X:	484
Y:	340
Importance:	0.02
Susceptibility:	0.1
Lower Population Bound:	25
Upper Population Bound:	50

Buttons: Add, Cancel

Figure 1.4 – Ajout d'une infrastructure dans LID-GIS (Johnson & McLean, 2008)

Wolthusen (2005) remarque que l'utilisation d'un SIG peut être un moyen efficace, pour les responsables de la planification, de visualiser rapidement une situation à risque avant d'analyser précisément toutes les données. Par exemple, cela peut être utile pour s'assurer que des lignes de transmission ou de câblage, identifiées comme redondantes, sont bien séparées par suffisamment d'espace pour ne pas être affectées simultanément par un aléa. Dans le cas contraire, il s'agirait de ne pas compter sur cette redondance. Par ailleurs, il est possible, en combinant des couches d'informations sur les réseaux, d'éviter de planifier l'installation d'une ligne électrique (en jaune sur la figure 1.5) parallèlement à des conduites de gaz (en rouge sur la figure 1.5) ou, le cas échéant, de s'assurer de la prise de mesures de sécurité suffisantes lors des activités de travaux. Enfin grâce à une coordination entre les réseaux il serait possible d'éviter la création de nœuds particulièrement critiques où se situeraient plusieurs équipements importants en étroite proximité géographique, comme l'illustre la figure 1.6.

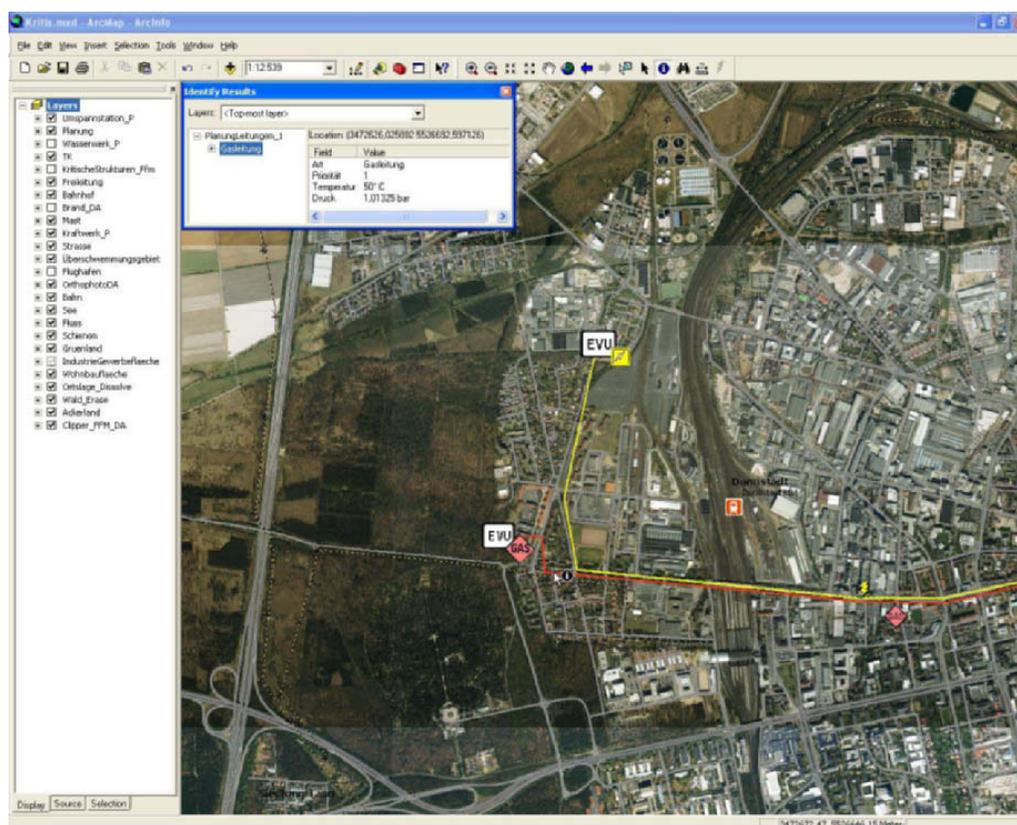


Figure 1.5 – Situation de risque provoquée par des lignes électriques parallèles à des conduites de gaz (Wolthusen, 2005)

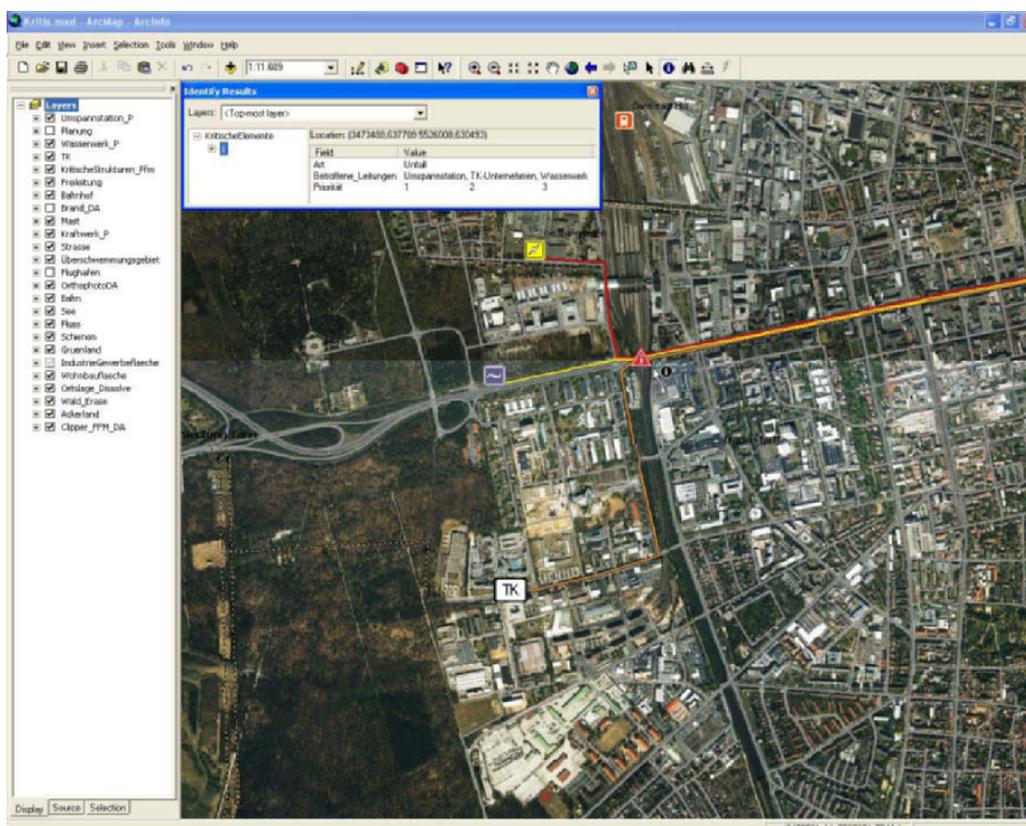


Figure 1.6 – Nœud critique entre plusieurs réseaux (Wolthusen, 2005)

1.3.2 Mesures d'atténuation

Même si l'analyse de risques permet de prendre connaissance des conséquences associées, son but n'en reste pas moins de servir à trouver des solutions pour atténuer les risques détectés.

Le Conseil pour la réduction des accidents industriels majeurs (CRAIM) identifie deux types de barrières de sécurité à mettre en place pour une atténuation efficace, illustrées à la figure 1.7 par le schéma du « noeud papillon » :

- Les **barrières de prévention**, qui se situent en amont de la situation de danger et permettent d'empêcher qu'elle ne se produise (programme régulier d'entretien, formation de personnel, politiques internes, appareil de détection avec alerte, vannes automatiques, etc.) ;

- Les **barrières de protection**, qui se situent en aval de la situation de danger et permettent de diminuer les effets sur les cibles potentielles (mur de sécurité, bassin de rétention, gicleurs, rideau d'eau, exercices d'intervention, procédures d'évacuation, plan d'urgence, clôture, etc.).

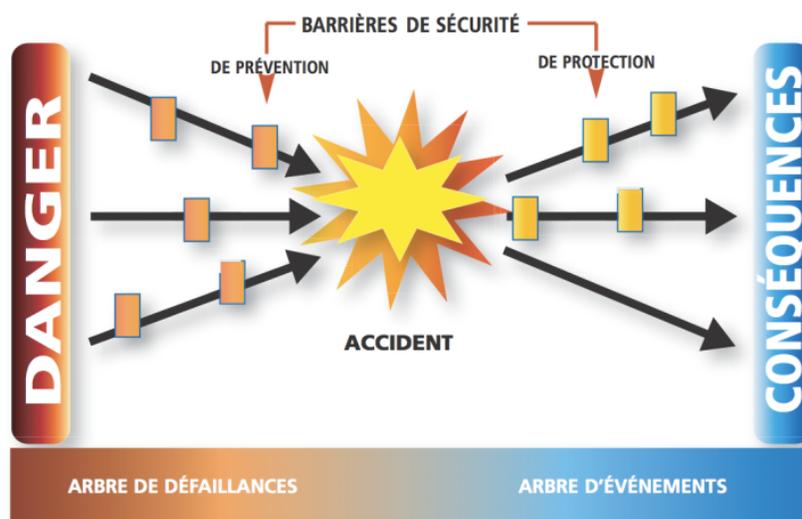


Figure 1.7 – Nœud papillon (CRAIM, 2006)

Deux grands types de mesures d'atténuation peuvent également être identifiés :

- Les **mesures d'atténuation actives**, destinées à gêner la propagation d'un incident ou à en réduire les conséquences en se servant d'équipements tels que des instruments de contrôle ou en faisant appel à l'intervention humaine ;
- Les **mesures d'atténuation passives**, destinées à gêner la propagation d'un incident ou à en réduire les conséquences en mettant en place des dispositifs passifs tels que des bassins de rétention, des panneaux de rupture, des murs coupe-feu, etc.

Il faut tout de même remarquer qu'une nouvelle mesure mise en place peut, elle aussi, être génératrice de nouveaux risques.

1.3.3 Systèmes d'informations géographiques

Un SIG est, par définition, un système permettant de communiquer et de traiter l'information géographique. Un SIG se caractérise par un critère essentiel, celui de la localisation : tel objet est

voisin de tel autre, tel phénomène affecte telle surface et se superpose à tel autre, etc. Le but ultime d'un SIG est l'aide à la décision, développée sur des connaissances géographiques et des moyens de traitement, de représentation et de communication de celle-ci (Denègre & Salgé, 2004).

Le MSP s'est doté d'un tel outil avec le logiciel « Gestion des Opérations de Localisation et de Cartographie » (G.O. LOC) qui est un système de géolocalisation conçu pour répondre à différents besoins du ministère tels que :

- La création et le partage de cartes de localisation ;
- L'analyse des risques naturels d'un secteur ;
- La localisation d'un appel d'urgence et la vérification de l'environnement aux alentours ;
- La validation d'une modification à un schéma d'aménagement ;
- La gestion et le suivi des événements d'urgence, comme un feu de forêt par exemple ;
- Le partage d'informations cartographiques officielles avec un partenaire.

Les cartes proviennent de :

- Différents ministères et organismes du gouvernement du Québec, comme le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, le ministère des Transports, l'Institut national de santé publique de Québec, la Commission de la toponymie du Québec, etc. ;
- Différents partenaires, comme les municipalités (adresse municipale et numéro de porte), le gouvernement fédéral (Environnement Canada et Ressources naturelles Canada), Hydro-Québec, Gaz Métro et Google.

Afin de respecter les droits d'auteur des fournisseurs et les politiques de diffusion d'informations cartographiques, les données fournies par les partenaires ne sont accessibles qu'en visualisation dans l'outil de localisation, c'est à dire qu'il diffuse uniquement des images de ces données (et non pas les données brutes) (Gignac, 2009).

1.3.4 Organismes concernés

Au niveau local, il existe de nombreux acteurs dans la gestion des risques liés aux infrastructures urbaines. Parmi eux, il est nécessaire de connaître les principales organisations susceptibles d'être particulièrement concernées par les risques engendrés par la proximité des infrastructures :

- **Le Centre de sécurité civile de la ville de Montréal (CSC) :** sa mission est de s'assurer de la prévention des sinistres majeurs, de permettre un meilleur état de préparation des arrondissements et des services centraux de la ville face aux risques majeurs, de fournir le support stratégique à la coordination des intervenants en sécurité civile lors de sinistres et du rétablissement après sinistre (CSC, 2010).

- **La Commission des services électriques de Montréal (CSEM) :** sa mission est de favoriser et promouvoir l'enfouissement et la coordination des interventions dans le réseau de câbles et de fils aériens. Dans le cadre de tout projet concernant les réseaux câblés, la CSEM :
 - Favorise les échanges entre les différents intervenants impliqués dans le projet et contribue à la coordination de leurs actions ;
 - Veille au respect des normes et des règlements en vigueur ;
 - Conçoit ou approuve les travaux de génie civil nécessaires aux réseaux câblés ;
 - Assure la surveillance des travaux de construction des infrastructures souterraines de réseaux câblés.

Une fois les travaux d'infrastructures terminés, la CSEM :

- Gère et coordonne les différentes concessions de câbles dans le cas de l'enfouissement des réseaux ;
- Effectue l'entretien et la réparation des infrastructures et conduits souterrains (CSEM, 2010).

- **L'Alliance pour la protection des infrastructures du Québec (APISQ)** : fondée en 2003 au Québec et partenaire régional du « Common Ground Alliance » (CGA), un réseau nord-américain qui s'active dans la promotion de la prévention des dommages. Elle regroupe des personnes et des organisations issues de nombreux groupes d'intérêts pour partager leurs enjeux et trouver collectivement des solutions à des problèmes liés aux dommages causés aux infrastructures souterraines.
- **Info-Excavation** : service de localisation gratuit des infrastructures souterraines aux particuliers, entreprises et municipalités du Québec.

1.4 Résumé

Cette revue de littérature nous permet de constater qu'il existe peu d'études sur les interdépendances géographiques et que la plupart sont des études plus globales sur les interdépendances qui se contentent d'en proposer une définition. Nous n'avons pas trouvé non plus de méthodologies ayant mené à des résultats concrets et efficaces concernant l'étude particulière des interdépendances géographiques. En général, celles qui s'en rapprochent le plus concernent la problématique du transport des matières dangereuses.

À travers la littérature, on s'aperçoit aussi que les logiciels de géomatique, traitant des données spatialement référencées, sont amplement préconisés et utilisés dans les études de risque à composante spatiale. Cependant, la question du partage et de la diffusion d'informations confidentielles concernant la position exacte d'infrastructures stratégiques n'est jamais vraiment traitée.

Toutefois, on remarque, suite aux nombreux accidents technologiques initiés ou aggravés par la proximité physique des infrastructures des RSV, qu'il existe un véritable besoin de connaître les dangers liés à ces phénomènes et une nécessité de mettre en place des mesures d'atténuation.

Par ailleurs, les approches probabilistes semblent inadaptées à ces situations de risque. En effet, les aléas technologiques sont encore plus imprévisibles que les aléas naturels et on ne peut pas se servir des probabilités comme mesure de risque. En revanche, il est bien plus judicieux de s'attarder sur les conséquences que l'on veut gérer. Il s'agit alors d'étudier la vulnérabilité et le comportement du système impacté qui est susceptible d'engendrer des conséquences dans un environnement spécifique.

Les réflexions qui ressortent de la revue de littérature apportent plusieurs idées intéressantes. Parmi elles, on retient que pour mener à bien une étude sur les IG, il faut :

- Connaître le comportement des matières en jeu et leurs effets sur l'environnement ;
- Identifier les conséquences de tels événements pour les RSV ;
- Identifier les différentes configurations qui représentent une situation de risque face à la matérialisation potentielle de liens d'interdépendances géographiques ;
- Connaître certaines propriétés des équipements cibles pour évaluer leur sensibilité à un événement en particulier ;
- Connaître les IF et les effets domino fonctionnels pouvant être initiés par la défaillance des équipements des RSV ;
- Gérer des données confidentielles et trouver une solution cartographique adéquate.

CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Le but de ce chapitre est de décrire avec précision, suite aux différents points abordés par la revue de littérature, la problématique à laquelle ce mémoire cherche à répondre, le sujet de recherche qui en découle et les différents objectifs à atteindre ainsi que les contraintes à respecter pour tenter de répondre à cette problématique.

2.1 Mise en contexte

De 2005 à 2008, en collaboration avec ses partenaires, le CRP a mené un projet, appliqué sur les villes de Montréal et de Québec, visant à évaluer les interdépendances et les effets domino entre RSV. Ce projet a mené au développement d'outils concrets de gestion des risques comme les courbes d'effets domino ou la cartographie souple. Dans la continuité de ce projet, le CRP conduit actuellement une étude de quatre ans, de 2008 à 2012, visant à développer un système expert capable d'effectuer une modélisation spatio-temporelle des effets domino entre les RSV. Il devra être en mesure d'identifier et d'anticiper les effets domino, de prioriser des mesures de prévention et de protection et de mettre en place des mécanismes d'alerte et de communication d'urgence à travers un système d'alerte précoce, favorisant la coordination entre les acteurs de l'espace de coopération.

Notre étude vient s'intégrer au système expert en cours de développement en fournissant une méthodologie capable d'identifier les interdépendances géographiques entre RSV, de faire ressortir des secteurs critiques selon les vulnérabilités particulières des RSV, et de les prioriser selon des problématiques que l'on veut étudier.

2.2 Problématique

La problématique qui se pose alors est la suivante : comment identifier des secteurs critiques où les interdépendances géographiques seraient initiatrices de conséquences pour les RSV en termes de dommages directs et d'effets domino ?

2.3 Sujet de recherche

Le sujet découlant de cette problématique est l'« étude des interdépendances géographiques entre réseaux de support à la vie ». Il s'agit de trouver une solution permettant de caractériser les liens d'interdépendances géographiques entre RSV et de mettre en évidence des secteurs critiques face à ces interdépendances. Elle doit être pensée comme un outil d'aide à la décision permettant de prioriser des mesures de prévention et de protection.

Cette solution mène à la mise en place d'une méthodologie qui doit répondre à trois défis : simplicité, flexibilité et adaptabilité (De La Lande de Calan, 2007). En effet, elle doit être simple à mettre en place, c'est à dire qu'elle ne doit pas nécessiter des moyens organisationnels et techniques importants. Elle doit être flexible pour aborder plusieurs problématiques particulières et répondre à différentes utilisations. Enfin, elle doit être facilement adaptable pour s'appliquer à n'importe quel territoire ou zone géographique et être capable de réagir à de nouveaux risques non identifiés.

2.4 Objectifs et contraintes

L'objectif principal de ce projet de recherche est de proposer une méthodologie d'aide à la décision permettant d'identifier des secteurs critiques face aux interdépendances géographiques.

Pour atteindre cet objectif principal, il est nécessaire de répondre aux deux objectifs particuliers suivants :

- **1^{er} objectif** : Définir le concept d'interdépendances géographiques entre réseaux de support à la vie et permettre son intégration dans la méthodologie actuellement développée par le CRP concernant l'évaluation et la modélisation des interdépendances et des effets domino entre RSV pour les villes de Montréal et Québec.

- **2^{ème} objectif** : Développer une méthodologie servant d'outil d'aide à la décision pour identifier, évaluer et prévenir les risques liés à la proximité géographique des RSV en milieu urbain. Ces risques étant susceptibles d'entraîner des conséquences en termes de dommages directs et d'effets domino. Cet objectif peut se décomposer selon les trois sous-objectif suivants :
 - **1^{er} sous-objectif** : Permettre l'identification de secteurs vulnérables aux IG ;
 - **2^{ème} sous-objectif** : Définir des critères permettant de prioriser les secteurs vulnérables en évaluant leur degré de criticité ;
 - **3^{ème} sous-objectif** : Aider les RSV dans leur prise de décision pour mettre en place des mesures d'atténuation, aussi bien préventives que curatives, face aux IG.

Par ailleurs, ces objectifs doivent être remplis en respectant certaines contraintes imposées par le cadre de l'étude :

- **1^{ère} contrainte** : Utiliser au maximum les informations déjà disponibles dans la base de connaissances « DOMINO » développée par le CRP, afin d'optimiser la demande d'informations complémentaires auprès des partenaires de l'étude.

- **2^{ème} contrainte** : Résoudre la problématique de préservation de la confidentialité des informations, afin de bénéficier de l'entière collaboration des partenaires de l'étude dans un cadre d'échange totalement sécuritaire.

- **3^{ème} contrainte** : Travailler en partenariat avec les principales organisations publiques et privées concernées, partenaires du CRP, afin de permettre leur implication dans la mise en place de la méthodologie.

- **4^{ème} contrainte** : Appliquer la méthodologie développée sur la ville de Montréal et évaluer ses utilisations possibles et son efficacité, afin de valider la pertinence des outils développés.

2.5 Démarche méthodologique

La démarche de travail qui a conduit à la mise en place de la méthodologie d'étude des IG exposée au chapitre 4, s'est déroulée de la façon suivante :

- **Définir les objectifs de l'étude :**
Quels sont les résultats attendus et les utilisations possibles de ces résultats ?

- **Caractériser les types d'IG à étudier :**
Quels sont les équipements générateurs d'IG ? Comment sont-ils répartis sur le territoire ?
Quel est le comportement des matières en jeu ? Quelles sont les cibles vulnérables à prendre en compte ?

- **Déterminer les paramètres à évaluer :**
Quelles sont les zones d'impact ? Quelles sont les conséquences directes et indirectes potentielles pour les équipements touchés ? Quels sont les critères de criticité d'un secteur ?

- **Déterminer les outils à utiliser :**

Avec quels outils réaliser l'analyse de vulnérabilité des secteurs ? Comment obtenir les informations nécessaires ? Quels supports cartographiques adopter ?

La réponse à ces questions a été rendue possible grâce à plusieurs moyens. Une consultation auprès des partenaires du CRP, sous forme de réunions de travail, a permis de définir les résultats et les utilisations attendues par les gestionnaires des RSV. Une revue de littérature a permis de caractériser les IG et de les intégrer aux études menées par le CRP sur les interdépendances entre RSV. La réflexion sur un cas concret, tel que l'étude des explosions et des fuites de gaz naturel et d'eau potable sur la ville de Montréal, a permis de déterminer les paramètres à évaluer et de les généraliser. Enfin, l'utilisation de la base de connaissances « DOMINO », développée par le CRP, a permis d'alimenter les nouveaux outils créés et de valider leur applicabilité.

CHAPITRE 3 CONCEPTS

Ce chapitre a pour objectif principal d'expliquer en détail les concepts relatifs aux interdépendances géographiques. Cela permettra de poser les bases théoriques pour la compréhension de la méthodologie développée dans le chapitre suivant. Il s'agira de préciser la définition du vocabulaire et des concepts utilisés par la suite dans la méthodologie. Pour cela on utilisera un cadre commun de compréhension basé sur un schéma de synthèse global, repris dans la définition générale des interdépendances géographiques.

3.1 Définitions

La problématique principale des IG entre RSV est liée à la proximité physique de leurs équipements et à leur capacité à pouvoir s'impacter les uns les autres de manière spécifique dans une zone géographique particulière.

Tout d'abord, lorsque l'on parle d'impact, il s'agit d'identifier les sources de danger d'une part et leurs cibles potentielles d'autre part. C'est pourquoi, dans l'étude des IG, on identifie les sources de danger par les « **équipements à potentiel de conséquences géographiques** » (appartenant aux RSV générateurs d'IG) et les cibles potentielles par les « **équipements sensibles** » (appartenant aux RSV touchés).

Par ailleurs, pour que la source atteigne une ou plusieurs cibles potentielles, elle doit libérer une matière, que l'on appellera « **ressource matérielle génératrice d'IG** », susceptible, par son « **comportement** », d'entraîner des « **dommages** » dans une « **zone d'impact** ».

Enfin, ces dommages peuvent avoir des « **conséquences** » directes ou indirectes néfastes pour les RSV en fonction du « **rôle des équipements** » touchés.

En lien avec le concept de risque défini par Robert et Morabito (2009) dans la figure 3.1, le risque lié aux interdépendances géographiques résulte alors de la combinaison des trois facteurs suivants :

- **L'aléa**, qui correspond à l'évènement perturbateur qui provoque la défaillance d'un RSV générateur d'IG ;
- **La vulnérabilité**, au niveau des zones où sont localisés des équipements sensibles à la défaillance d'un RSV générateur d'IG ;
- **Les conséquences**, qui représentent les effets sur les RSV impactés.

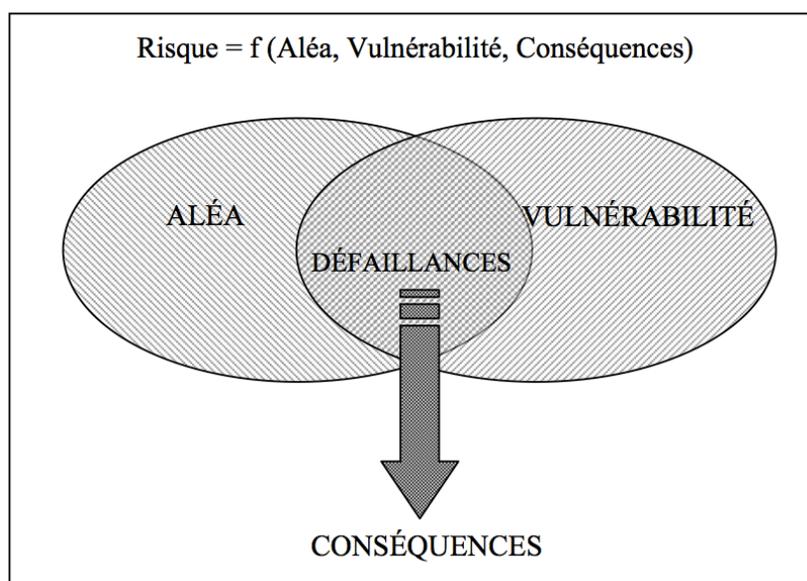


Figure 3.1 – Définition du risque (Robert & Morabito, 2009)

Pour bien comprendre les concepts avancés précédemment, il est nécessaire d'expliquer avec précision les différents termes utilisés. Ceux-ci seront proposés dans un schéma conceptuel. C'est pourquoi on expose les définitions suivantes :

- **Aléa**
Évènement perturbateur qui peut modifier l'état d'un système.
- **Équipements à potentiel de conséquences géographiques**
Équipements, installations, réseaux ou moyens physiques, dédiés à la fourniture d'une ressource matérielle potentiellement génératrice d'IG (ex : canalisations, réservoirs de stockage, etc.).

- **Ressource matérielle génératrice d'IG**

Matière, substance, objet ou infrastructure matérielle, participant à la mission de fourniture d'une ressource essentielle et dont le comportement non maîtrisé peut entraîner des dommages dans une zone d'impact (ex : eau, gaz, pétrole, électricité, ondes électromagnétiques, infrastructures routières, etc.).

- **Comportement d'une ressource matérielle**

Mode de propagation et effets physiques dans l'environnement de la ressource matérielle (ex : explosion, fuite, incendie, irradiation, effondrement, etc.).

- **Zone d'impact**

Zone géographique de l'espace potentiellement touchée par la ressource matérielle génératrice d'IG (ex : surface au sol, au sous-sol ou dans l'air).

- **Dommages**

Conséquences directes sur un environnement (humain, technologique, socio-économique, biophysique, etc.), de la propagation d'une ressource matérielle et de son comportement (ex : destruction ou arrêt de fonctionnement d'équipements, blocage d'accès à des installations, contamination, perte de vie humaines, etc.).

- **Équipements sensibles aux IG**

Équipements, installations, réseaux ou moyens physiques, dédiés à la fourniture d'une ressource essentielle et susceptibles de subir des dommages dans la zone d'impact.

- **Rôle de l'équipement**

Mission à laquelle participe l'équipement dans la fourniture de la ressource essentielle.

- **Conséquences sur les autres RSV**

Conséquences en termes d'effets domino et d'interdépendances fonctionnelles sur les ressources essentielles dépendantes et interdépendantes.

La figure 3.2 reprend les concepts développés précédemment en illustrant comment ils sont liés les uns aux autres.

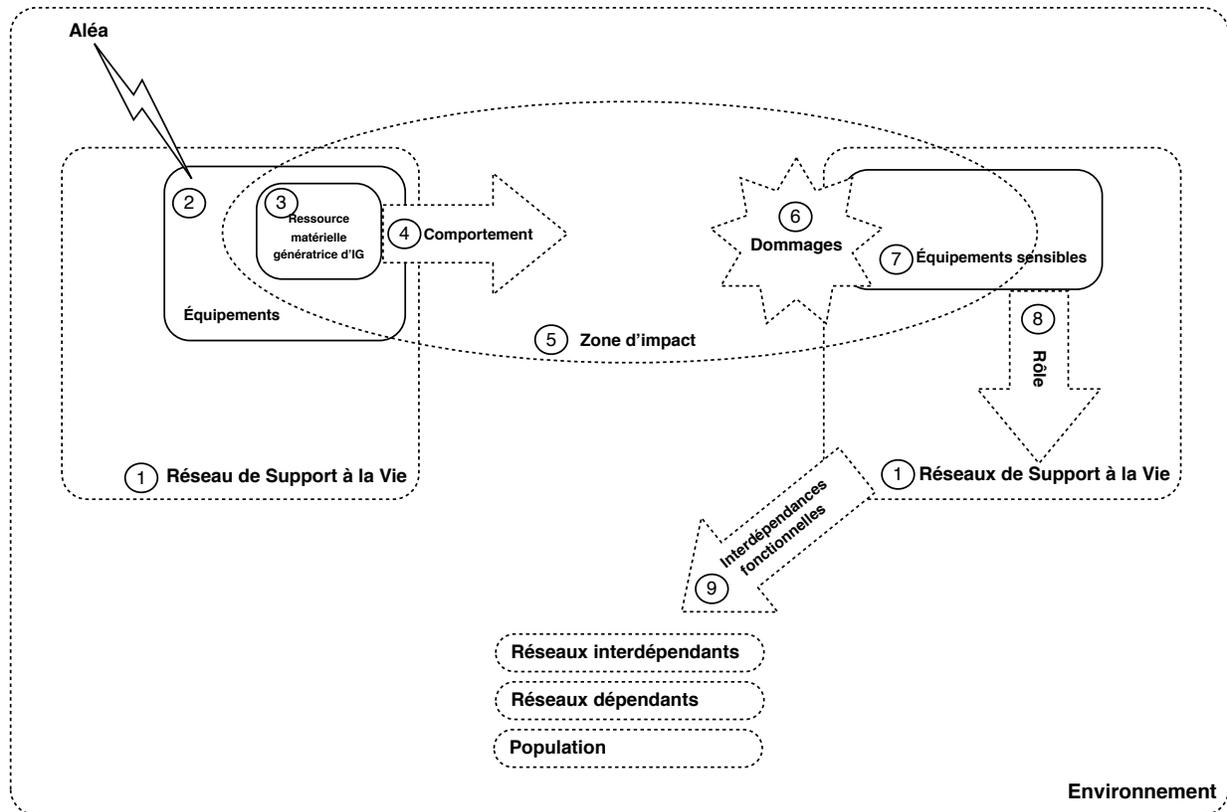


Figure 3.2 – Schéma conceptuel des liens d'interdépendances géographiques entre les RSV.

À partir de ces définitions et du schéma conceptuel, on est alors capable d'exposer la définition retenue pour un lien d'interdépendance géographique entre deux RSV, qui est la suivante :

Une interdépendance géographique existe entre deux RSV si :

Le comportement non maîtrisé d'une ressource matérielle d'un RSV peut engendrer des dommages, dans une zone d'impact, sur des équipements susceptibles d'entraîner des conséquences pour un autre RSV.

Ce lien se matérialise uniquement lorsque l'aléa survient.

3.2 Aide à la décision

Un des objectifs de notre étude est de développer un outil d'aide à la décision, utile aux gestionnaires des RSV et aux responsables de la sécurité civile. Selon la Chaire de Recherche du Canada en Aide à la Décision Territoriale (CRC-ADT) de l'université Laval (2005) « la matière première de l'aide à la décision est l'information ». En effet, des processus de collecte, d'analyse et d'échanges d'informations sont mis en place dans les outils d'aide à la décision pour permettre aux acteurs de construire, de renforcer ou de modifier les décisions qu'ils doivent prendre.

Mais cette information doit être filtrée et triée pour ne pas avoir à traiter des quantités de données inutiles (voir « 1^{ère} contrainte » au chapitre précédent). Elle doit aussi être interprétée et analysée par des experts afin d'apparaître sous forme de résultats d'expertises utiles à la prise de décision.

C'est pourquoi la méthodologie exposée par la suite, s'appuie sur l'utilisation d'un système expert conçu comme un outil d'aide à la décision alimenté par le partage des expertises des gestionnaires des RSV. En accord avec la démarche exposée dans la figure 3.3, elle comporte un processus de récolte des données (à travers la mise en place de questionnaires particuliers auprès des RSV) ; une évaluation d'indicateurs de vulnérabilité (à travers les « tableaux de vulnérabilités » développés dans le chapitre suivant) ; une évaluation des critères de criticité des secteurs ; une analyse et un classement de ces critères (grâce aux « cartes de criticité ») ; et enfin, une analyse de détail, avec la mise en place de mesures d'atténuation.

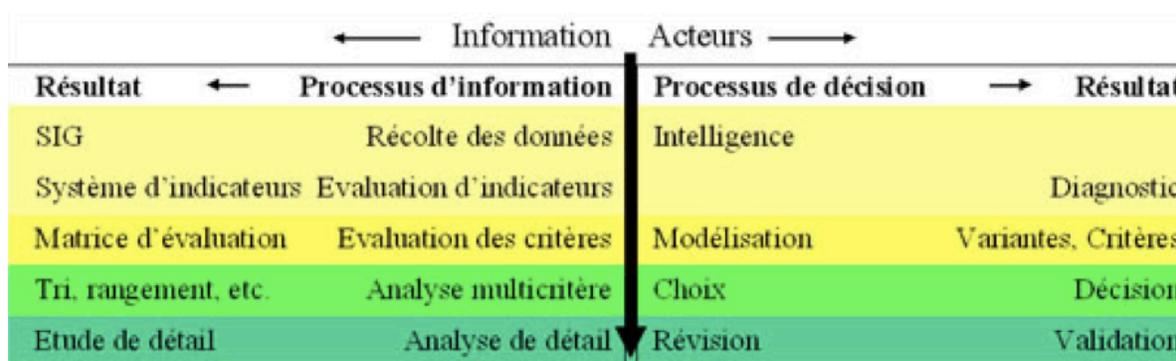


Figure 3.3 – Démarche générale d'aide à la décision (CRC-ADT, 2005)

3.3 Confidentialité des informations

Une des contraintes majeure de notre étude réside dans le problème de la confidentialité des informations (voir « 2^{ème} contrainte » au chapitre précédent). En effet, bien que la localisation exacte de certaines infrastructures des RSV soit connue, il reste de nombreux équipements dont ces mêmes RSV ne veulent pas dévoiler la position précise pour des raisons évidentes de sécurité. Ce qui nous amène à un paradoxe : plus les informations partagées sont précises, plus il est possible d'améliorer la sécurité des infrastructures, mais plus elles deviennent vulnérables à des actes de malveillance. Le partage d'informations implique donc de relever de nombreux défis, notamment les quatre défis suivants (Robert & Morabito, 2010) :

- L'aspect de propriété et de valeur des données géoréférencées qui freine le partage des informations ;
- La mise à jour et le traitement d'une quantité toujours plus importante de données ;
- Le caractère confidentiel des données qui pourraient être utilisées à mauvais escient, pour mener à des actes de malveillance ;
- Une mauvaise interprétation des informations cartographiées qui pourrait influencer négativement la prise de décision par des gestionnaires de la sécurité civile.

3.4 Espace de coopération

Le but de l'espace de coopération est de fournir un cadre propice au partage d'informations confidentielles nécessaires à l'étude des IG entre les gestionnaires des RSV (voir « 3^{ème} contrainte » au chapitre précédent). La création de l'espace de coopération comporte six étapes (Robert & Morabito, 2009) :

- Définition des objectifs ;
- Identification des ressources essentielles à étudier ;
- Identification de la zone d'étude ;

- Identification des intervenants ;
- Détermination des règles de fonctionnement ;
- Gestion de la confidentialité.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce chapitre est d'exposer la méthodologie permettant de répondre à la problématique de l'étude des interdépendances géographiques sur un territoire quelconque. On présentera donc les différentes étapes qui la constituent ainsi que la manière d'effectuer une analyse efficace tout en respectant les critères de simplicité, d'adaptabilité et de flexibilité.

4.1 Introduction

L'objectif final est d'identifier des secteurs critiques face aux risques liés aux interdépendances géographiques. Pour cela il s'agit de réunir différents critères, sous forme d'une grille d'analyse, nous permettant d'évaluer la criticité d'un secteur pour chacune des situations de risque qui génèrent des liens d'interdépendances géographiques, en fonction de l'utilisation que l'on veut faire des résultats.

La démarche consiste, dans un premier temps, à définir la zone à l'étude et à décider de son découpage en secteurs de tailles identiques.

Dans un deuxième temps, on choisit le ou les événements potentiellement générateurs d'interdépendances géographiques dont on veut faire l'étude. Ces événements représentent la combinaison d'une ressource matérielle potentiellement génératrice d'interdépendances géographiques et d'un comportement dangereux.

Dans un troisième temps, il s'agit d'envisager les conséquences d'un tel événement sur les autres RSV en termes de dommages directs, d'interdépendances fonctionnelles et d'effets domino.

On cherche ensuite, dans un quatrième temps, les différentes situations de risque qui peuvent générer la matérialisation de liens d'interdépendances géographiques et pouvant être responsables de telles conséquences.

Dans un cinquième temps, on doit coupler les informations nécessaires nous permettant d'obtenir de telles situations et donc la vulnérabilité des secteurs pour chaque conséquence. Cette vulnérabilité vient du couplage d'informations sur des équipements sensibles avec des informations sur des équipements dangereux, dans un même secteur, pour un phénomène donné.

Dans un sixième temps, on établit des critères de criticité nous permettant de classer les secteurs selon leur importance. Les règles de hiérarchisation utilisées, basées sur ces critères, sont alors fonction de la problématique particulière que l'on cherche à résoudre et de l'utilisation que l'on veut faire des résultats.

Dans un septième temps, il s'agit de tenir des réunions particulières sur les secteurs jugés importants par les RSV face aux problématiques que l'on veut gérer.

Enfin il s'agit de prendre les mesures de protection, de prévention ou mécanismes d'alertes appropriés répondants aux utilisations identifiées face aux différentes situations.

La figure 4.1 illustre le processus de la méthodologie en reprenant les différentes étapes décrites précédemment et en les répartissant selon quatre grandes phases. La première est une phase d'identification des IG. La deuxième phase sert à caractériser les IG en termes de conséquences potentielles et de situations de risque. La troisième phase permet l'évaluation des IG à partir des vulnérabilités propres des secteurs et de leurs critères de criticité. Enfin la quatrième phase permet l'atténuation des IG.

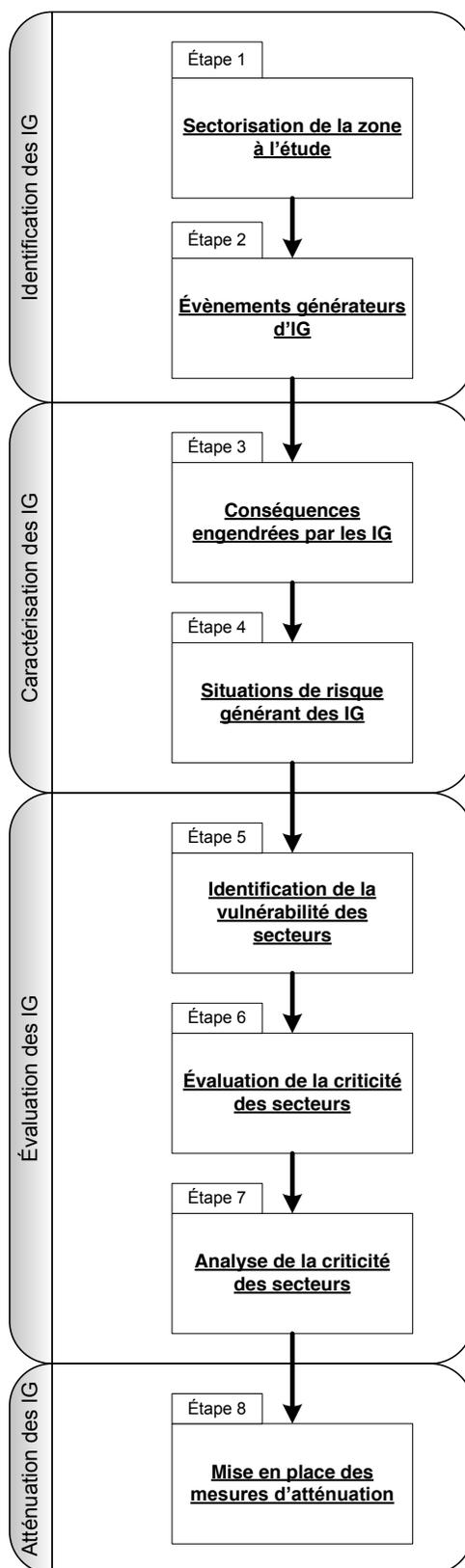


Figure 4.1 – Méthodologie d'étude des interdépendances géographiques

4.2 Gestion des données

Pour effectuer une telle étude il est indispensable de se doter d'un outil pour gérer les données nécessaires à l'étude. La gestion de ces données nécessite un système expert capable de répondre aux exigences de partage des informations, de préservation de la confidentialité et d'analyse croisée des informations. Il doit aussi pouvoir traduire les informations contenues dans une base de connaissance sous forme de courbes de dépendances afin d'identifier et d'anticiper les effets domino potentiels (Pellet, 2009a). Le but étant d'obtenir une expertise groupée dépassant la simple connaissance individuelle de chaque acteur, il doit donc se faire dans le cadre d'un partenariat étroit entre les différents RSV concernés.

Pour mener à bien ses études, le CRP a ainsi réalisé un prototype de système expert nommé « DOMINO » qui répond à cette problématique. Développé à partir du logiciel Microsoft Access[®], il est capable de traiter les connaissances et les expertises contenues dans la base de connaissances du CRP pour modéliser l'état de dégradation d'un RSV et anticiper les effets dominos susceptibles de se produire (Pellet, 2009b). Il est capable de remplir les fonctions suivantes :

- La visualisation, sous forme de rapport, de l'ensemble des informations relatives à la localisation des équipements appartenant à un RSV. Le but de cette fonction est de donner une vue d'ensemble du réseau et de sa répartition dans l'espace géographique ;
- La saisie de nouvelles données, à l'aide d'un formulaire, sur les équipements d'un RSV : identification du RSV, identification des équipements, identification des ressources utilisées de manière courante, identification des modes de gestion alternatifs ;
- La visualisation, sous forme d'un rapport, de l'ensemble des ressources utilisées par un équipement d'un RSV ;
- La visualisation des équipements utilisant une ressource choisie dans un secteur choisi. Et plus précisément :
 - La visualisation de tous les équipements utilisant la ressource dans le secteur choisi ;
 - La visualisation, sous forme de graphique, des effets domino du 1^{er} ordre ;

- La visualisation, sous forme de graphique, des effets domino du 2^{ème} ordre (générés suite aux effets domino du 1^{er} ordre) ;
 - La visualisation, sous forme de graphique (diagramme bâtons), des besoins en ressources alternatives.
- La visualisation, sous forme de rapport, des équipements utilisant une ressource précise dans une zone d'alimentation choisie (Pellet, 2009a).

Les effets domino du 1^{er} ordre surviennent lorsqu'un équipement n'est plus capable de fournir une ressource dans un secteur de la ville et qu'un certain nombre d'autres équipements des RSV sont affectés par l'indisponibilité de cette ressource. Par conséquent, les effets domino du 2^{ème} ordre surviennent lorsque des équipements des RSV, qui utilisent les ressources fournies par les équipements des RSV ayant été affectés par un effet domino de 1^{er} ordre, sont affectés.

Le système expert « DOMINO », exposé précédemment, a été utilisé dans l'application de la méthodologie présentée au chapitre suivant.

4.3 Identification des interdépendances géographiques

4.3.1 Étape 1 : Sectorisation de la zone à l'étude

La première étape consiste à adapter le territoire étudié selon une cartographie dite « souple ». L'utilisation de la cartographie souple consiste à découper la zone à l'étude en secteurs de tailles identiques permettant de mettre en commun des informations non géoréférencées à partir d'un support cartographique, tout en respectant les politiques de confidentialité des organisations. La figure 4.2 illustre, à cet effet, une grille de découpage permettant de sectoriser une zone à l'étude. Par ailleurs, la taille des secteurs doit résulter d'un compromis entre les objectifs visés par l'étude, la taille et la nature de l'espace étudié, le type d'informations nécessaires à l'étude, le niveau de précision des données et le niveau de confidentialité des informations. Elle ne doit pas être trop petite afin qu'on ne puisse pas identifier des localisations trop précises et afin de ne pas alourdir l'étude. Mais elle ne doit pas être non plus trop grande pour ne pas aboutir à une modélisation trop générale (Robert & Morabito, 2009).

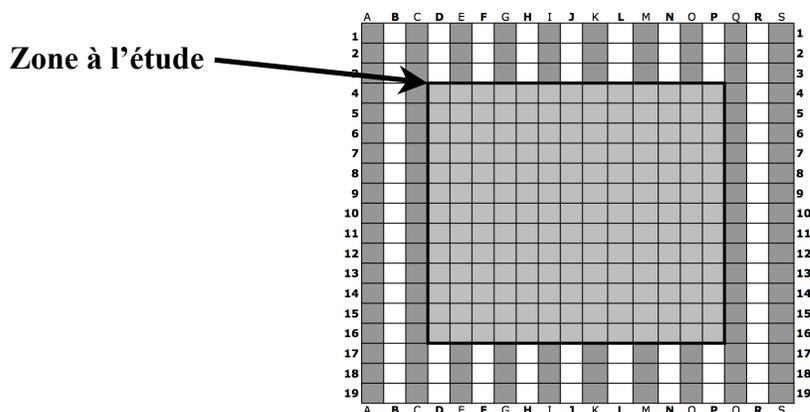


Figure 4.2 – Découpage de la zone à l'étude en secteurs de taille identique

4.3.2 Étape 2 : Évènements générateurs d'interdépendances géographiques

La deuxième étape de la méthodologie consiste à choisir, en fonction de l'étude que l'on veut réaliser, un ou plusieurs évènements générateurs d'interdépendances géographiques. Ces évènements représentent la combinaison d'une ressource matérielle d'un RSV potentiellement dangereuse avec un type de comportement. Une matière peut avoir plusieurs types de comportements et on aura donc autant d'évènements que de matières et de comportements.

$$\text{Évènement} = f(\text{Matière} ; \text{Comportement})$$

Par ailleurs, le comportement de cette matière peut être décomposé comme suit :

$$\text{Comportement} = f(\text{Mode de propagation} ; \text{Effet})$$

C'est à dire qu'elle peut adopter différents modes de déplacement dans l'espace (fuite, explosion, irradiation, effondrement, etc.) auxquels sont associés différents effets physiques sur l'environnement. Le département de géographie de l'École Normale Supérieure (2009) identifie trois effets majeurs dans les risques technologiques :

- **L'effet thermique**, qui concerne le risque d'incendie et ses conséquences sur l'environnement immédiat. Il peut notamment être dû à la libération de gaz inflammable dans l'atmosphère qui est alors susceptible de s'enflammer dans des conditions particulières de pression et de concentration. Parmi ces types d'évènements on redoute particulièrement ceux du type « Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion » (BLEVE)

provoqués par l'éclatement de réservoirs contenant du gaz liquide dont la pression interne a augmenté et qui peut alors s'enflammer sous forme de boule de feu.

- **L'effet toxique**, qui concerne les émanations gazeuses et la pénétration de substances toxiques dans l'environnement avec pollution des sols, de l'eau et de l'air.
- **L'effet de surpression**, qui concerne le risque d'explosion d'équipements ou d'installations provoquant une onde de choc pouvant avoir un rayon d'impact de plusieurs kilomètres. Il peut notamment venir de l'inflammation d'un nuage explosible qui crée alors une explosion du type « Unconfined Vapor Cloud Explosion » (UVCE).

Le tableau 4.1 donne plusieurs exemples d'événements pouvant générer des IG en identifiant, pour différentes matières, leurs modes de propagation et leurs effets sur l'environnement.

Tableau 4.1 – Exemples d'événements générateurs d'IG

TYPE DE MATIÈRE DANGEREUSE ¹	MATIÈRE	COMPORTEMENT		ÉVÉNEMENT
		Mode de propagation	Effet	
Gaz liquéfié	Gaz naturel	Fuite	Surpression / Thermique	Fuite de gaz naturel
Gaz comprimé		Explosion	Surpression / Thermique	Explosion de gaz naturel
Matière liquide	Eau	Bris	Surpression	Bris de conduite
		Fuite	Détrempage, affaiblissement des sols, ravinement, courts-circuits	Fuite d'eau
Matière toxique	Ammoniac	Fuite	Toxique	Fuite d'ammoniac
Matière inerte	Béton	Effondrement	Surpression	Effondrement d'un pont

¹ (MDDEP, 2010)

Pour qu'un événement crée un lien d'interdépendance géographique entre deux RSV, certaines conditions doivent être réunies. La figure 4.3 ci-après illustre cette situation. En effet, ce schéma montre que pour qu'un lien d'interdépendance géographique puisse se matérialiser dans un secteur, il doit y avoir au moins un RSV possédant au moins un équipement dédié à la fourniture d'une ressource matérielle, capable, par son comportement, d'engendrer des dommages sur au moins un équipement d'un autre RSV. Ces dommages se traduisent alors en conséquences néfastes pour le fonctionnement du RSV touché.

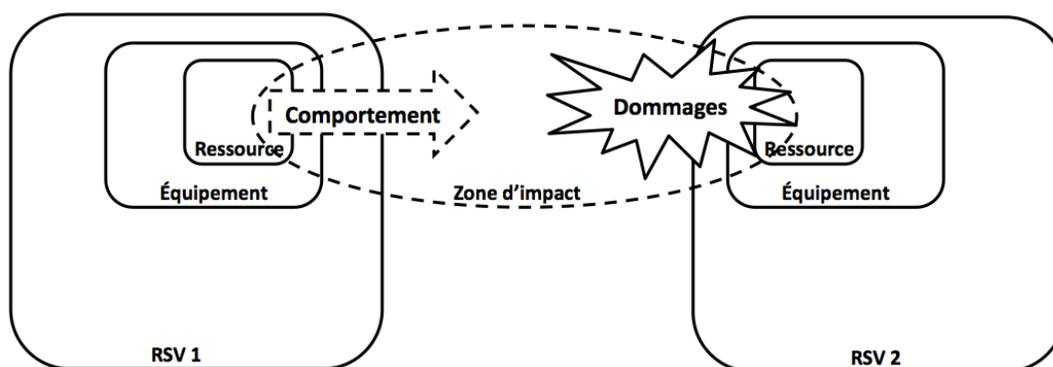


Figure 4.3 – Schéma des conditions génératrices d'un lien d'interdépendance géographique entre deux RSV

4.4 Caractérisation des interdépendances géographiques

4.4.1 Étape 3 : Conséquences engendrées par les interdépendances géographiques

Il s'agit à cette étape, d'identifier les différentes conséquences qu'entraînerait la matérialisation effective des IG. C'est-à-dire qu'il faut envisager les conséquences en termes d'impacts humains, matériels ou environnementaux qui résulteraient de la réalisation d'un tel événement. Il est alors nécessaire de faire le choix de celles que l'on veut retenir dans l'étude. Par exemple, si l'on s'attache aux impacts matériels, on peut redouter la destruction d'équipements stratégiques par une explosion directe ou l'allumage retardé d'un nuage explosible, des pertes financières, la création d'effets dominos, etc. Au niveau des impacts humains, on peut redouter la perte de vies humaines, l'évacuation de bâtiments importants, le blocage d'accès à une zone (hôpitaux,

casernes de pompiers), des impacts sur la santé, etc. Enfin, d'un point de vue environnemental, on peut redouter des impacts écologiques, des contaminations, des intoxications, etc.

4.4.2 Étape 4 : Situations de risque générant des interdépendances géographiques

Après avoir identifié et choisi les conséquences que l'on veut appréhender dans l'étude, il s'agit, en accord avec l'approche par conséquences préconisée par le CRP, d'identifier les différentes situations qui entraîneraient de telles conséquences, comme l'illustre la figure 4.4. Cette approche propose de se concentrer sur les conséquences d'un aléa et non sur ses causes. Il s'agit, dès lors, de caractériser les conséquences selon des seuils d'acceptabilité en intégrant un paramètre temporel. Il est alors possible de tracer des courbes de conséquences (Robert et al., 2003). En analysant les seuils précédents, les situations qui génèrent les conséquences sont établies sans considérations à des scénarios spécifiques. En effet, les approches traditionnelles, basées sur des scénarios, ne permettent pas de prendre en compte tous les événements possibles (Robert et al., 2003).

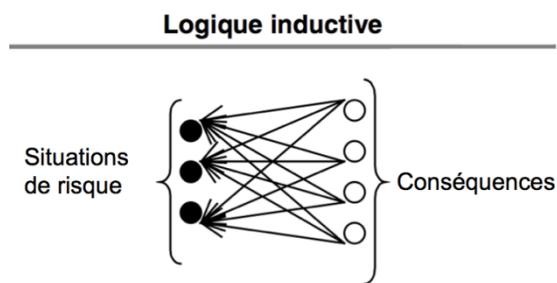


Figure 4.4 – Approche par conséquences, adapté de Gleyze (2001)

Ces situations correspondent à la présence, dans un secteur, d'équipements dont les propriétés particulières les rendent vulnérables à un événement dangereux et qui sont capables d'entraîner les conséquences néfastes envisagées. Il s'agit de déterminer, à l'aide des experts, toutes les configurations spatiales et techniques possibles qui seraient sources de danger. Par exemple, des équipements raccordés à des câbles ou conduites situés au-dessus de canalisations de gaz naturel ou des équipements situés en zones de pressions négatives, qui pourraient provoquer un allumage de gaz, ou encore, des équipements souterrains pouvant être submergés ou tout simplement des équipements électriques pouvant être coupés.

4.5 Évaluation des interdépendances géographiques

4.5.1 Étape 5 : Identification de la vulnérabilité des secteurs

Il s'agit, à cette étape, d'établir des questionnaires sur la vulnérabilité des secteurs face aux risques décrits précédemment. Pour cela, on doit chercher à connaître les vulnérabilités particulières des différents types d'équipements des RSV face aux situations de risque identifiées à l'étape précédente et les relier aux secteurs associés.

On cherche en fait à réaliser le couplage d'informations sur des équipements sensibles avec des informations sur des équipements dangereux, en identifiant les secteurs qui possèdent ces deux types d'équipements. Si l'on s'attache à une répartition ponctuelle des équipements à potentiel de conséquences géographiques (canalisations majeures de gaz naturel, par exemple) on ne retiendra que les secteurs traversés par ces équipements. En revanche si l'on s'attache à une répartition diffuse des équipements dangereux sur le territoire (toutes tailles de canalisations de gaz naturel, par exemple) tous les secteurs doivent être considérés dans l'étude.

On peut alors dire qu'un secteur vulnérable doit répondre à l'équation suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = f(\text{situation dangereuse ; équipements sensibles})$$

Le but est de demander aux experts des renseignements complémentaires sur des propriétés particulières de leurs équipements. On peut ainsi obtenir, pour chaque équipement présent dans la base de données, une liste de ses vulnérabilités propres. Par exemple, tel équipement est vulnérable à une fuite de gaz car il peut provoquer des étincelles, ou est vulnérable à une inondation car il est situé en sous-sol et peut être immergé, etc.

Une fois que l'on a recueilli les informations nécessaires, on effectue alors la synthèse de toutes les étapes précédentes dans un tableau général nous donnant la vulnérabilité des secteurs face à différentes situations de risque, comme l'illustre le tableau 4.2 ci-après. Ce tableau recense, par secteur et par RSV, dans les cases « **équipements** », ceux qui sont sensibles à une situation de risque particulière.

À partir de ce tableau, on est ainsi capable d'identifier, pour chaque secteur, les équipements présents en fonction des RSV, leur sensibilité à des situations de risques particulières et les conséquences potentielles qui en découleraient. On peut ainsi en déduire leur vulnérabilité face à

certaines évènements. Par exemple, on pourrait dire qu'un secteur est vulnérable à une fuite de gaz (« **Matière 1 + Comportement 2** ») s'il contient des équipements capables d'entraîner l'allumage retardé d'un nuage explosible (« **Conséquence 2** ») et situés en zones de pressions négatives (« **Situation 2** »), ou raccordés à des conduites situées au-dessus de conduites de gaz naturel (« **Situation 3** ») ; ou encore s'il contient des équipements nécessitant une évacuation (« **Conséquence 3** »).

Tableau 4.2 – Tableau de synthèse finale de vulnérabilité des secteurs

		VULNÉRABILITÉ							
ÉVÈNEMENTS		Matière 1 + Comportement 1		Matière 1 + Comportement 2					
CONSÉQUENCES		Conséquence 1		Conséquence 2				Conséquence 3	
SITUATIONS		Situation 1		Situation 2		Situation 3		Situation 4	
EFFETS DOMINOS			effets dominos		effets dominos		effets dominos		effets dominos

SECTEURS	RSV	PROPRIÉTAIRES							
XXX1	RSV 1		équipements	x / 1 ^{er} / 2 ^{ème}					
	...								
	RSV i		équipements	x / 1 ^{er} / 2 ^{ème}					
	...								
...	RSV n		équipements	x / 1 ^{er} / 2 ^{ème}					
	...								
	RSV i								
	...								
XXXN	RSV n								
	...								
	RSV i								
	...								

Dans la colonne « **effets dominos** » du tableau 4.2 ci-dessus, on associe, à chaque équipement sensible, le nombre d'effets dominos qu'il pourrait entraîner s'il était impacté par l'évènement dangereux (« x » : aucun effet domino, « 1^{er} » : nombre d'effets domino du 1^{er} ordre, « 2^{ème} » : nombre d'effets domino du 2^{ème} ordre).

4.5.2 Étape 6 : Évaluation de la criticité des secteurs

Pour évaluer la criticité des secteurs, il faut définir des critères de criticité. Ces critères vont nous permettre de prioriser les secteurs vulnérables en les classant selon leur importance, déterminée par des règles de hiérarchisation. Pour déterminer les secteurs à classer, on peut choisir tous ceux qui sont vulnérables à n'importe quel type d'évènement générateur d'IG, mais on peut aussi

choisir seulement ceux qui sont vulnérables à un événement ou à une situation de risque en particulier.

Afin de répondre à la problématique de cette étude on a mis en place les critères suivants :

- La densité d'équipement des RSV ;
- Le nombre d'effets domino d'ordre n+1 ;
- La densité d'équipement des RSV des secteurs voisins de rang n+1.

La densité d'équipement des RSV représente le nombre total d'équipements sensibles par secteur. Cette densité varie donc avec la taille des secteurs. Ce critère permet de donner de l'importance aux secteurs qui cumuleraient de nombreuses conséquences si un événement générateur d'IG survenait. On pourrait ainsi parler d' « effet de groupe ». Ce critère est illustré par la figure 4.5 qui représente un exemple de densité d'équipement sur une zone quelconque. Chaque secteur, localisé par une lettre en abscisse et un nombre en ordonnée, contient un certain nombre d'équipements sensibles susceptibles d'être impactés par des IG. Par ailleurs, on peut choisir de compter, par secteur, le nombre d'équipements sensibles à tous les comportements d'une matière ou juste ceux qui sont sensibles à un comportement donné. Par exemple, on pourrait lire, sur la figure 4.5, que le secteur L13 contient 8 équipements sensibles à une explosion de gaz naturel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2																			
3																			
4							1												
5										1	1		1		1				
6						1	1			5	1	3			8	3			
7						2	2			1					6	7	4		
8						1	3	1		1	1			5					
9						2							1						
10						4	3		1	2	3	2				1			
11						1			1	1		3	1						
12						1		3				3	5	4					
13								2		3				8	3	1			
14						3	2					1	12	14	1	1			
15								1	1			7	9	11					
16								1				1	1						
17																			
18																			
19																			

Figure 4.5 – Exemple de densité d'équipement des RSV

Le nombre d'effets domino d'ordre $n+1$ représente le nombre d'effets domino fonctionnels du 1^{er} ordre, 2^{ème} ordre, 3^{ème} ordre, etc. engendrés par la défaillance des équipements sensibles d'un secteur. Ce critère permet de donner plus d'importance aux secteurs qui possèdent un fort potentiel pour générer des interdépendances fonctionnelles si jamais un lien d'interdépendance géographique se matérialisait. On peut penser, par exemple, à un poste électrique alimentant de nombreuses infrastructures stratégiques qui serait proche d'une conduite majeure de gaz naturel et qui provoquerait de nombreux effets domino en cas d'explosion de celle-ci.

La densité d'équipement des RSV des secteurs voisins de rang $n+1$ représente le nombre d'équipements sensibles présents autour d'un secteur et le degré de leur rang est fonction de leur éloignement par rapport à ce même secteur. Pour un secteur (X, Y) (colonne, ligne) on parlera de voisinage de 1^{er} rang pour les huit secteurs situés directement autour de ce secteur, soit sur les colonnes précédente et suivante et les lignes précédente et suivante. Ce critère peut permettre de départager des secteurs qui possèderaient la même densité d'équipement en donnant plus d'importance à celui qui est entouré de plus d'équipements à un rang supérieur. Par ailleurs, le choix du rang maximum que l'on veut prendre en compte dans l'étude pour chaque secteur va dépendre du comportement des matières en jeu et surtout de la taille des zones d'impact. En effet, si l'on a choisi, par exemple, des secteurs de 100 m par 100 m, et que l'on considère une fuite de gaz qui peut avoir des effets jusqu'à 300 m, il faudra alors considérer les secteurs voisins jusqu'au rang 3, comme l'illustre la figure 4.6 ci-dessous.

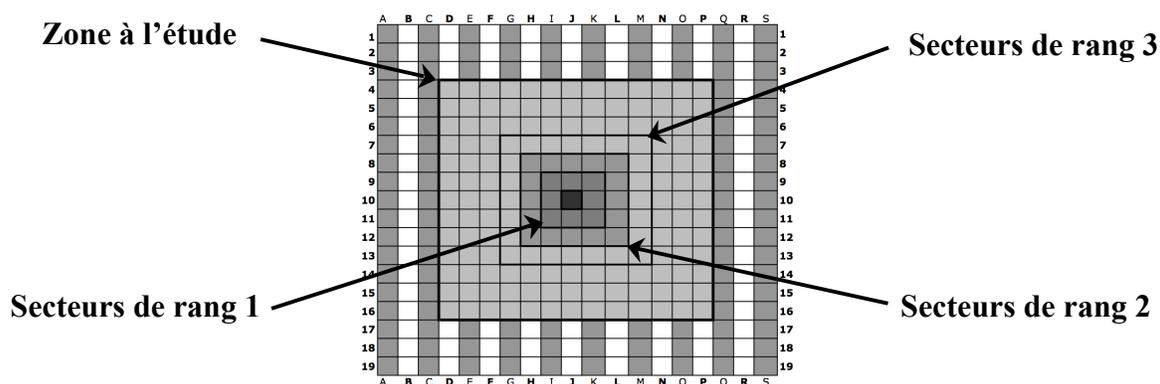


Figure 4.6 – Exemple de secteurs voisins de rang $n+1$

On peut très bien calculer ce critère pour des secteurs où il n'y a pas d'équipements ponctuels mais qui mériteraient tout de même une attention particulière au cas où ils seraient entourés de

secteurs possédant, eux, de nombreux équipements sensibles. Cela peut être intéressant dans le cas d'une répartition diffuse des équipements à potentiel de conséquences géographiques, pour une fuite de gaz pouvant survenir n'importe où, par exemple. De plus, on peut même associer à ce critère celui du nombre d'effets domino des secteurs voisins. En effet, cela donnerait plus d'importance à un secteur entouré d'équipements potentiellement initiateurs d'effets domino et pouvant se trouver dans la zone d'impact.

4.5.3 Étape 7 : Analyse de la criticité des secteurs

Une fois que l'on a associé à chaque secteur les nombres correspondant à chacun des critères décrits précédemment il est alors possible d'effectuer plusieurs classements particuliers. En effet, on peut définir des règles de hiérarchisation différentes selon que l'on veut donner plus ou moins d'importance à chaque critère. La définition d'une règle de hiérarchisation dépend directement de l'utilisation que l'on veut faire des résultats. Le choix des secteurs à classer dépend, lui, de l'événement que l'on veut étudier et des situations de risque associées. Le tableau 4.3 ci-dessous est un exemple de classement de huit secteurs selon la règle de hiérarchisation suivante :

Critère 1 > Critère 2 > Critère 3 > Critère 4

Tableau 4.3 – Exemple de classement de secteurs en fonction des critères et des règles de hiérarchisation.

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	
Secteurs	Équipements sensibles	Effets domino du 1 ^{er} ordre	Effets domino du 2 ^{ème} ordre	Équipements des secteurs voisins	Classement
XXX1	14	1	0	32	1
XXX2	11	2	1	25	2
XXX3	5	2	0	5	3
XXX4	5	1	1	4	4
XXX5	3	1	1	3	5
XXX6	3	1	0	2	6
XXX7	1	0	0	8	7
XXX8	1	0	0	1	8

À partir de ces classements, il est alors possible de produire un outil graphique d'identification des secteurs critiques qui permet de visualiser les secteurs avec leur classement. On peut ainsi produire différentes « cartes de criticité » qui seront fonction :

- D'un événement particulier ;
- D'une situation de risque particulière ;
- D'une règle de hiérarchisation choisie ;
- De certains RSV en particulier (éventuellement).

On pourra alors faire apparaître le classement des secteurs en adoptant un code de couleur représentatif du degré de criticité des secteurs. Et on pourra ainsi facilement visualiser leur ordre de priorité par rapport aux autres secteurs vulnérables.

4.6 Atténuation des risques liés aux interdépendances géographiques

4.6.1 Étape 8 : Mise en place des mesures d'atténuation

À cette dernière étape, il s'agit de tenir des réunions particulières avec les gestionnaires des RSV concernés. Dans un premier temps, l'objectif est de prendre des décisions, à partir des tableaux de vulnérabilité et des cartes de criticité développés précédemment, pour prioriser les secteurs nécessitant la mise en place de mesures d'atténuation. Dans un deuxième temps, il faut alors tenir des réunions techniques particulières par secteur (ou groupement de secteurs) pour mettre en place ces mesures d'atténuation. Cela nécessitera, le temps de la réunion, de partager de l'information confidentielle avec les coordonnées exactes des infrastructures. Cependant, une fois les solutions déterminées, tous les intervenants repartiront avec leurs cartes et aucune donnée confidentielle ne sera alors mémorisée. Seul le résultat de l'analyse des experts des RSV sera conservée.

CHAPITRE 5 APPLICATION ET RÉSULTATS

Le but de ce chapitre est de présenter l'application de la méthodologie, développée dans le chapitre précédent, au cas concret de l'étude d'interdépendances géographiques particulières sur le territoire de la ville de Montréal.

5.1 Présentation de l'application

Le but de cet application est de montrer qu'il est possible de mettre en pratique la méthodologie proposée dans ce mémoire de façon simple sur une grande ville comme Montréal. L'objectif étant d'adopter une approche de type « top-down » permettant de partir d'une vision globale de la répartition des équipements sur le territoire pour aboutir à une analyse détaillée, ciblée par la problématique que l'on veut résoudre. Cette démarche doit passer par un filtrage des données afin d'économiser de l'information en allégeant les demandes.

La méthodologie a été appliquée avec les données réelles des RSV provenant du système expert « DOMINO » développé par le CRP. Cependant, pour des raisons évidentes de confidentialité, les cartes présentées dans ce mémoire ont été établies à partir de données fictives. Elles sont toutefois représentatives du cas réel dans la mesure où elles se situent dans les mêmes échelles de valeurs et de localisation.

5.2 Application de la méthodologie

Étape 1 : Sectorisation de la zone à l'étude

La première étape consiste à sectoriser le territoire à l'étude, soit l'île de Montréal, en secteurs de 1 km² et à établir un repère commun pour tous les RSV qui permettra d'identifier chaque secteur par ses coordonnées (X, Y) définies comme son numéro de colonne en abscisse et son numéro de ligne en ordonnée, comme l'illustre la figure 5.1 ci-après (la zone à l'étude contient 532 secteurs pour l'île de Montréal).

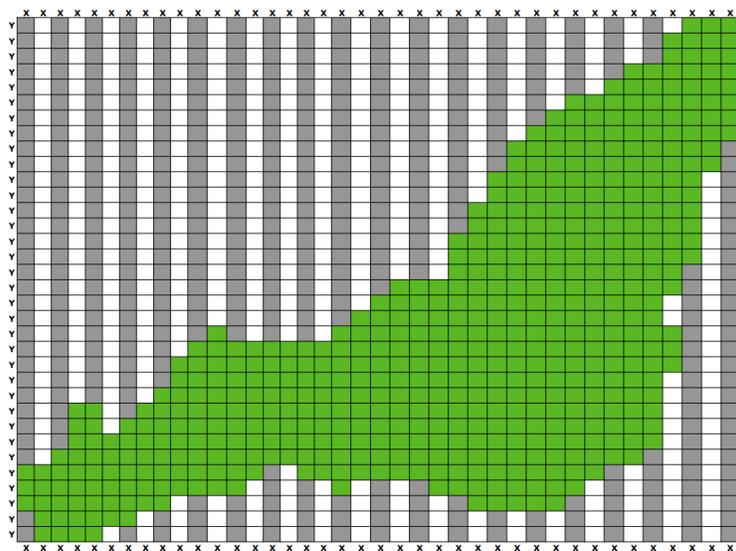


Figure 5.1 – Grille de localisation – Ville de Montréal

Étape 2 : Évènements générateurs d'interdépendances géographiques

La deuxième étape consiste à choisir les évènements générateurs d'interdépendances géographiques. Dans le cas de notre étude, ils se concentrent sur les deux matières suivantes :

- Le gaz naturel ;
- L'eau potable ;

Et les comportements associés suivants :

- L'explosion (ou le bris, dans le cas d'une conduite d'eau) ;
- La fuite.

Il s'agit alors de préciser le comportement de ces matières en allant chercher de l'information pertinente auprès d'experts compétents. Ceci dans le but de pouvoir identifier les différentes conséquences qui se rapportent aux différents comportements des matières en jeu (Robert & Morabito, 2009).

Le gaz naturel est un gaz combustible composé d'environ 95 % de méthane, il est transporté sous pression, toujours à l'état gazeux, par un réseau de conduites souterraines en polyéthylène, en acier ou en fonte. Il peut aussi être transporté par camion-citerne. La densité du gaz naturel à 15°C est de 0,6, il est donc plus léger que l'air. Ainsi, contrairement à d'autres gaz, il se dissipe

rapidement en s'élevant dans l'atmosphère. Il est également insoluble dans l'eau et peut migrer facilement dans le sol, le long des conduites. Pour s'enflammer, le gaz naturel doit se mélanger dans une certaine proportion à l'oxygène contenu dans l'air. La concentration propice à la combustion se situe entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI), soit entre 5 % (LII) et 15 % (LSI) de gaz naturel dans l'air ambiant (MSP, 2004).

L'eau peut aussi représenter un danger en détrempeant les sols, en affaiblissant les fondations, en provoquant des glissements de terrains et des tassements différentiels, en submergeant des équipements ou en déclenchant des courts-circuits. Et les bris de canalisations majeures d'eau potable peuvent être responsables d'importants dommages sur les infrastructures proches.

Le tableau 5.1 donne des exemples de tailles de zones d'impact en fonction des comportements du gaz naturel et de l'eau et des caractéristiques techniques des équipements en jeu.

Tableau 5.1 – Exemple de zones d'impact en fonction du comportement des matières en jeu, adapté de Robert & Morabito (2009)

Matière	Comportement	Caractéristiques des équipements	Zones d'impact
Eau	Fuite	Conduites Diam $\geq 1,5$ m	300 m
		Conduites $0,8 \text{ m} \leq \text{Diam} \leq 1,5$ m	150 m
		Conduites Diam $\leq 0,8$ m	local
		Réservoir Volume = 240000 m ³	2 secteurs de 1 km ² touchés
	Rupture (destruction de type explosion)	Conduites Diam ≥ 2 m	50 m
		Conduites Diam ≤ 2 m	local
Gaz naturel	Fuite	Conduites HP Pression ≥ 1000 kPa	Infrastructures souterraines dans un rayon de 500 m
	Explosion / Incendie	Conduites HP Pression ≥ 2400 kPa	300 m

Étape 3 : Conséquences engendrées par les interdépendances géographiques

L'existence de liens d'interdépendances géographiques entre plusieurs RSV peut entraîner différentes conséquences. Pour notre étude, dans le cas d'une fuite de gaz, on redoute plusieurs conséquences, selon que des mesures d'atténuation sont ou ne sont pas mises en place.

- S'il n'y a pas de mesure d'atténuation, la conséquence que l'on redoute le plus est l'allumage retardé d'un nuage explosible ;
- Si des mesures sont prises - comme la décision d'évacuer, de bloquer l'accès ou encore de couper l'électricité dans la zone concernée - elles peuvent alors se traduire comme des conséquences néfastes pour les RSV concernés en altérant leur niveau de fonctionnement.

Dans le cas d'une explosion de gaz naturel il n'y a pas de délai car l'allumage est immédiat.

La figure 5.2 illustre le processus de développement d'une explosion de gaz ou de liquide inflammable.

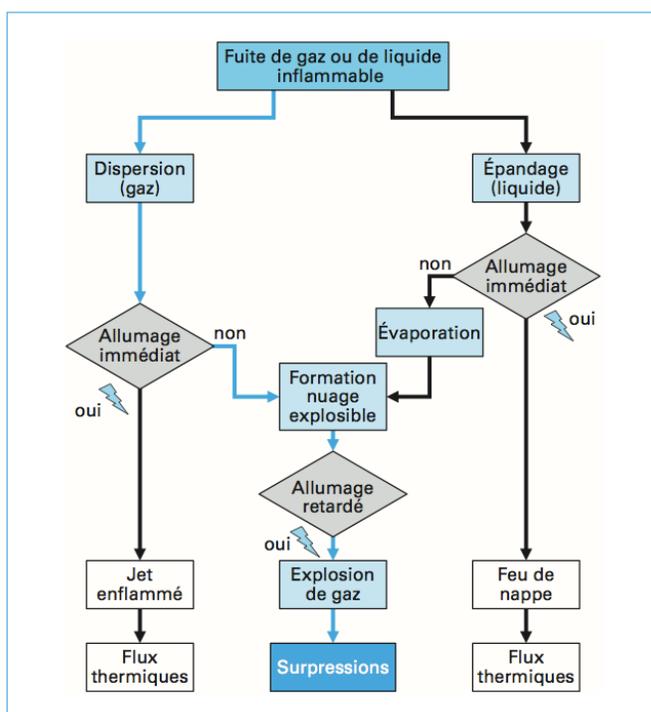


Figure 5.2 – Synoptique de développement d'une explosion (Paris, 2010)

Les sources potentielles d'inflammation sont principalement parmi les sources suivantes (Paris, 2010) :

- L'électricité statique ;
- L'étincelle mécanique ;
- L'étincelle électrique ;
- La présence d'un point chaud local.

L'interprétation de la figure 5.2 associée aux sources potentielles d'inflammation vont nous servir à l'étape suivante pour identifier les situations de risque pour une fuite de gaz naturel.

Étape 4 : Situations de risque générant des interdépendances géographiques

Les conséquences énumérées précédemment sont susceptibles de se produire lorsque les conditions d'une situation de risque sont réunies. En effet, certaines configurations des équipements dans l'environnement urbain peuvent provoquer des situations dangereuses. Chaque conséquence découle d'une ou plusieurs situations de risque.

Pour notre étude, dans le cas de la fuite de gaz, on associe à nos conséquences les situations suivantes :

Pour un allumage retardé :

- Des équipements sensibles (c'est à dire qui peuvent présenter une source potentielle d'inflammation) qui utilisent du gaz naturel.
- Des équipements sensibles raccordés à des conduites situées au-dessus de conduite de gaz naturel (ce sont des zones où les règles de sécurité concernant l'enfouissement des canalisations ne sont pas respectées et où on parlera alors d'inversions de conduites).
- Des équipements sensibles situés en zone de pressions négatives.

Pour une évacuation :

- Des bâtiments stratégiques pour les RSV.

Pour une coupure d'électricité :

- Des équipements électriques.

Étape 5 : Identification de la vulnérabilité des secteurs

Le but de cette étape est d'identifier les secteurs vulnérables aux différentes situations de risque décrites à l'étape précédente. Pour cela il s'agit d'aller chercher :

- des informations déjà disponibles dans la base de données du système expert « DOMINO » développé par le CRP ;
- de nouvelles informations collectées sous forme de questionnaires aux différents RSV et concernant des propriétés particulières de leurs infrastructures (voir l'annexe 3 pour les questionnaires détaillés présentés aux gestionnaires des RSV lors des réunions de travail).

Il s'agit d'ajouter de nouvelles propriétés aux infrastructures de la base de données (et éventuellement de nouvelles infrastructures stratégiques) qui nous permettront d'identifier leur vulnérabilité à différentes situations de risque en couplant les informations adéquates. Le tableau 5.2 illustre le type d'informations pertinentes dont on a besoin pour déterminer la vulnérabilité d'une infrastructure face à différentes interdépendances géographiques (voir l'annexe 1 pour un agrandissement). Chaque RSV remplit ce tableau en répondant par « oui » ou par « non » pour chacune des vulnérabilités possibles et ce, pour chacun de ses équipements.

Tableau 5.2 – Tableau de vulnérabilité des infrastructures

Informations sur l'infrastructure et sa localisation				VULNÉRABILITÉ							
				Explosion de gaz naturel	Fuite de gaz naturel					Coupage d'électricité	Fuite d'eau potable
Infrastructure	Localisation précise de l'infrastructure (adresse civique ou intersection) <small>OPTIONNEL</small>	En vous référant à la carte fournie avec le questionnaire, indiquez dans quel secteur de la zone d'étude est localisée cette infrastructure. Si vous fournissez une adresse ou une intersection, vous n'avez pas à remplir ces deux colonnes.		Équipement vulnérable à une explosion de gaz naturel	Équipement utilisant du gaz naturel	Équipement pouvant provoquer un allumage retardé	Équipement raccordé à des conduites situées au-dessus de conduites de gaz naturel	Équipement situé en zones de pressions négatives	Équipement nécessitant une évacuation ou inaccessible suite à une fuite de gaz naturel à proximité	Équipement utilisant de l'électricité	Équipement souterrain pouvant être submergé
Nom	Adresse	X	Y	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non	oui / non

Il est alors possible de regrouper les infrastructures vulnérables par secteur et d'identifier ainsi la vulnérabilité des secteurs à différentes situations de risque associées à différents événements. Le tableau 5.3 ci-après a ainsi été créé pour effectuer la synthèse de la vulnérabilité des secteurs face à une explosion et une fuite de gaz naturel pour la ville de Montréal en fonction de plusieurs conséquences et situations de risque (voir l'annexe 2 pour un agrandissement). Il a été établi à partir du tableau 4.2 présenté au chapitre précédent. Il recense, par secteur et par RSV, dans les

cases « équipements », les infrastructures qui sont vulnérables à une situation de risque particulière en leur associant le nombre d'effets dominos qu'elles pourraient éventuellement provoquer.

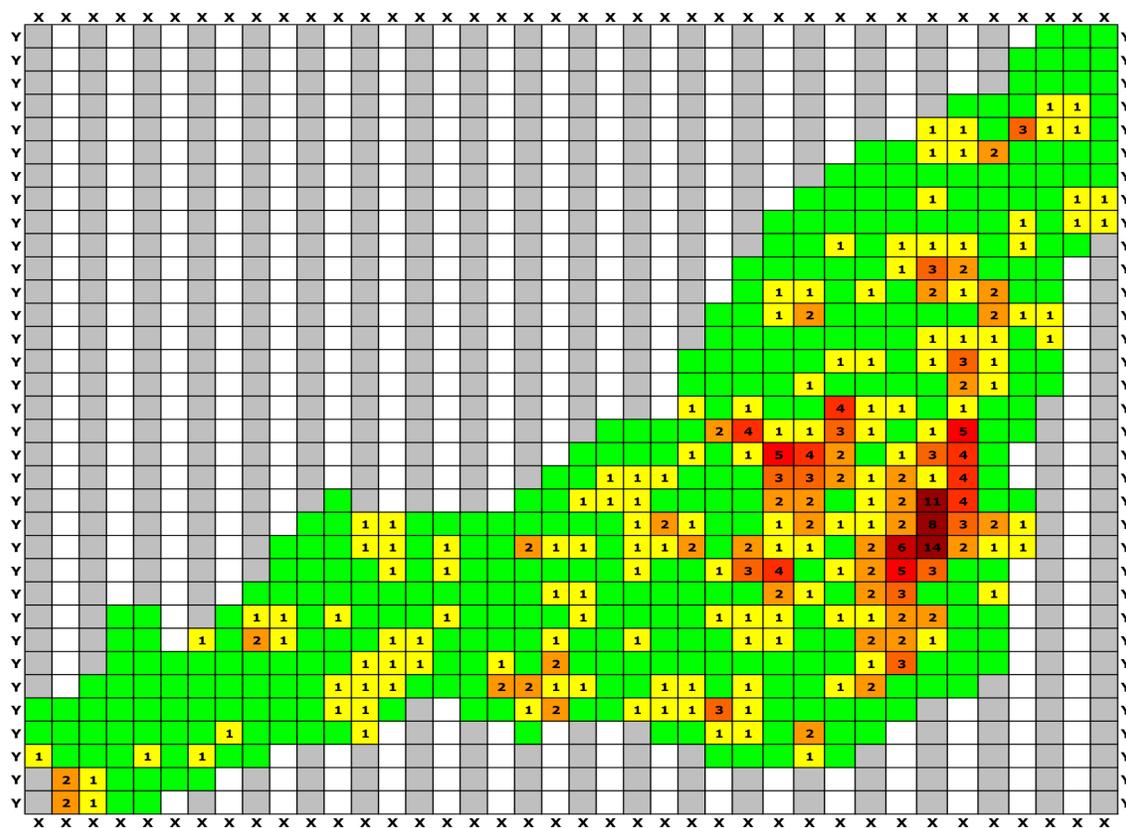
Tableau 5.3 – Tableau de synthèse finale de vulnérabilité des secteurs

		VULNÉRABILITÉ										
EVÉNEMENTS		Explosion de gaz naturel		Fuite de gaz naturel								
CONSÉQUENCES		Allumage retardé						Évacuation, inaccessibilité		Coupure d'électricité		
SITUATIONS		à cause d'utilisation de gaz naturel		à cause d'inversions de conduites		à cause de zones de pressions négatives						
EFFETS DOMINOS		effets dominos		effets dominos		effets dominos		effets dominos				
N°	SECTEUR	RSV	PROPRIÉTAIRE									
1	XXX1	TELECOMS	Réseau 1									
		ELECTRICITE	Réseau 2									
		GAZ NATUREL	Réseau 3									
		EAU POTABLE	Réseau 4									
		TRANSPORTS	Réseau 5									
			Réseau 6									
			Réseau 7									
2	TELECOMS	Réseau 1									
		ELECTRICITE	Réseau 2									
		GAZ NATUREL	Réseau 3									
		EAU POTABLE	Réseau 4									
		TRANSPORTS	Réseau 5									
			Réseau 6									
			Réseau 7									
3	XXXN	TELECOMS	Réseau 1									
		ELECTRICITE	Réseau 2									
		GAZ NATUREL	Réseau 3									
		EAU POTABLE	Réseau 4									
		TRANSPORTS	Réseau 5									
			Réseau 6									
			Réseau 7									

Étape 6 : Évaluation de la criticité des secteurs

Après avoir identifié les différentes vulnérabilités des secteurs il s'agit de déterminer leur criticité. Le but est d'établir un classement des secteurs selon leur degré de criticité afin d'aider les gestionnaires des RSV à prioriser leurs interventions, identifier les problèmes les plus importants ou encore établir les mécanismes d'alertes dans les secteurs clés. Plusieurs critères de la méthodologie ont donc été retenus dans l'application pour hiérarchiser les secteurs :

- **Critère 1 : le nombre total d'équipements sensibles par secteur** (tous RSV confondus), qui représente en fait la densité d'infrastructures essentielles sur le territoire de la ville de Montréal, soit le nombre d'équipements par km². La figure 5.3 ci-après représente la visualisation de ce critère sur la ville de Montréal. Un code de couleur a été appliqué selon un dégradé de plus en plus foncé à mesure que la densité d'équipements dans un secteur augmente.



**Figure 5.3 – Densité d'équipement des RSV sur le territoire de la Ville de Montréal
(données fictives)**

- **Critère 2 : le nombre total d'effets domino du 1^{er} ordre par secteur**, provoqués par la défaillance d'équipements dont dépendent un ou plusieurs autres équipements par des liens de dépendance fonctionnelle. Ce critère est primordial si l'on cherche à anticiper les interdépendances géographiques susceptibles d'entraîner des effets domino fonctionnels.

- **Critère 3 : le nombre total d'effets domino du 2^{ème} ordre par secteur**, provoqués par la défaillance d'équipements subissant un effet domino du 1^{er} ordre et provoquant à leur tour un nouvel effet domino en affectant des équipements qui leur sont dépendants.

Ces deux critères ont été déterminés à l'aide du système expert « DOMINO » capable de modéliser les effets domino fonctionnels de 1^{er} et 2^{ème} ordre.

Étape 7 : Analyse de la criticité des secteurs

Après avoir posé les critères permettant d'évaluer la criticité d'un secteur, il est possible de faire ressortir seulement ceux qui répondent à un objectif fixé. Pour les mettre en évidence, il est possible d'agir de plusieurs manières :

- En effectuant un filtrage des secteurs selon la situation de risque considérée. C'est à dire que l'on va afficher seulement les secteurs présentant une problématique d'inversions de conduites ou de zones de pressions négatives ou encore d'utilisation de gaz, par exemple.
- En effectuant un filtrage des secteurs selon l'appartenance des équipements présents à un RSV en particulier.
- En adoptant un code de couleur correspondant à la priorité d'importance accordée par les gestionnaires des RSV ou les responsables de sécurité civile aux secteurs problématiques. On peut ainsi choisir des mises en forme conditionnelles correspondant à un certain nombre de secteurs (les 10 premiers par exemple), un certain pourcentage (les 10 % premiers), une échelle du nombre d'équipements ou encore une échelle de valeurs de classement (de 1 à 10, de 10 à 20, de 20 à 40, de 40 à 80).

Cartes de criticité

À partir des résultats des étapes précédentes nous avons ainsi pu obtenir différentes cartes de criticité des secteurs pour la ville de Montréal. Ces cartes permettent de visualiser facilement l'importance d'un secteur vulnérable face à un événement tel qu'une fuite de gaz, en fonction de l'importance qu'on accorde aux différents critères tels que la densité d'infrastructures d'autres RSV ou le nombre d'effets domino. Les figures 5.5 et 5.6 ci-après sont un exemple des cartes que l'on a obtenu.

- La carte de criticité n°1 représente le classement final des secteurs pour la règle de hiérarchisation suivante : Critère 1 > Critère 2 > Critère 3 > Critère 4
- La carte de criticité n°2 représente le classement final des secteurs pour la règle de hiérarchisation suivante : Critère 2 > Critère 3 > Critère 1 > Critère 4

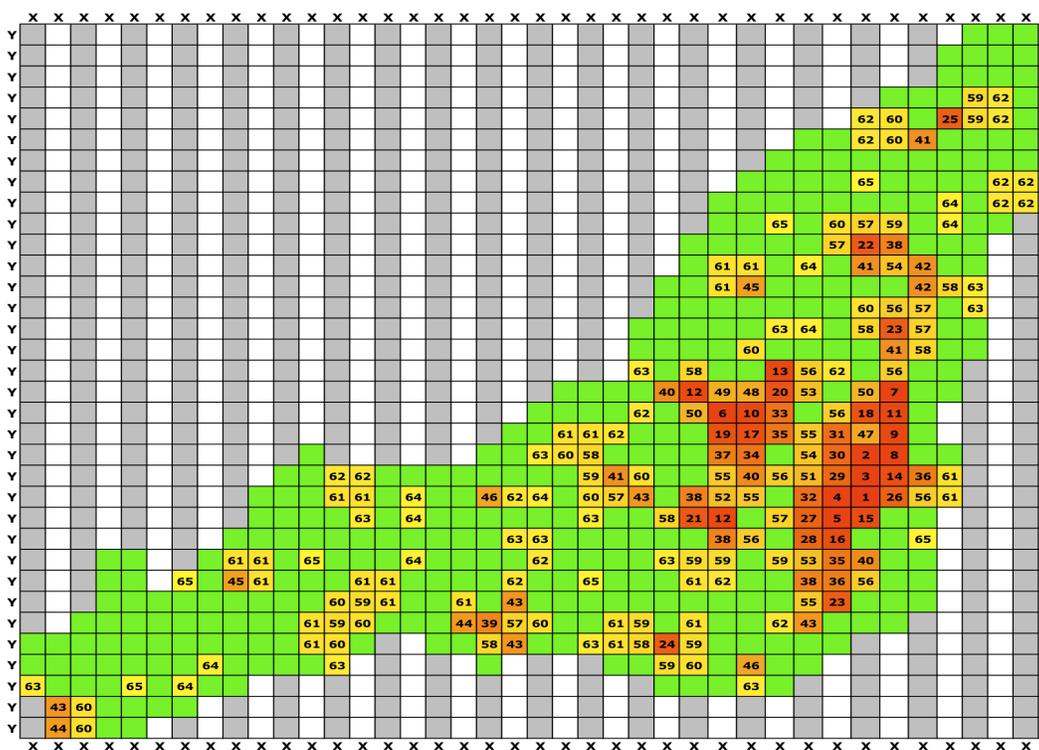


Figure 5.5 – Carte de criticité des secteurs n°1 (données fictives)

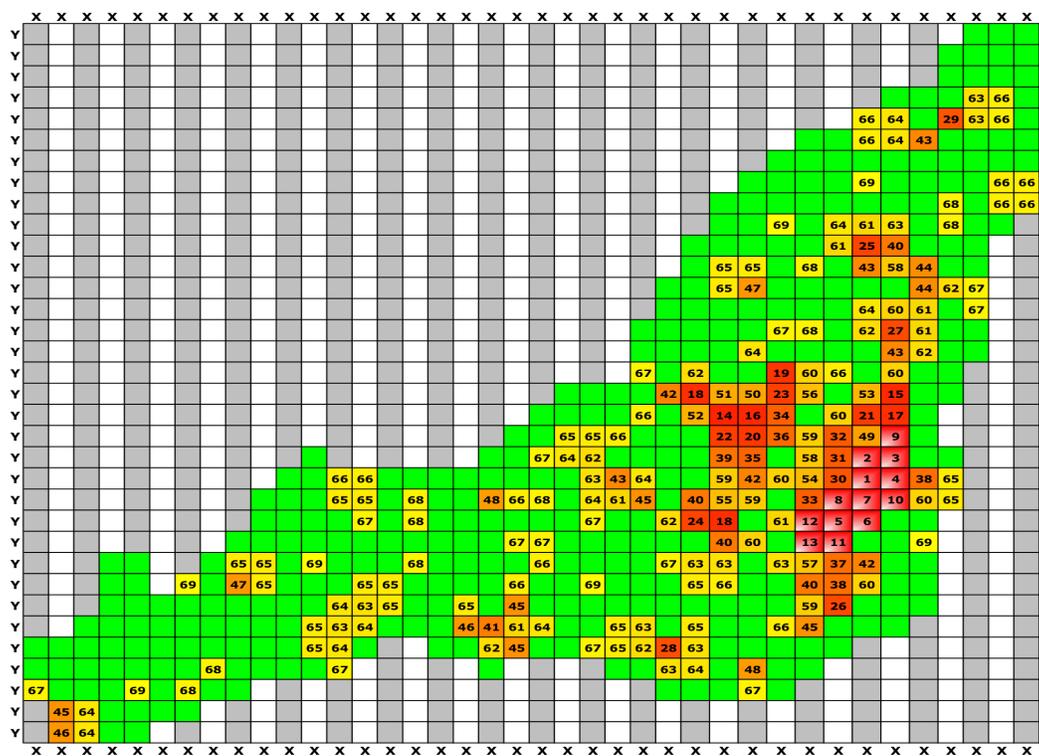


Figure 5.6 – Carte de criticité des secteurs n°2 (données fictives)

À l'aide de ces cartes on visualise facilement l'importance d'un secteur, celle-ci variant selon la règle de hiérarchisation choisie. Ainsi, un secteur classé 26^{ème} selon la première règle qui met l'accent sur l'« effet de groupe » peut remonter au 10^{ème} rang selon la deuxième règle qui privilégie les effets domino. On peut alors appliquer les filtres décrits précédemment et faire ressortir le classement des secteurs désirés.

Étape 8 : Mesures d'atténuation

Comme vu au chapitre précédent, il s'agit à cette étape de tenir les réunions particulières face aux problématiques des explosions et des fuites de gaz naturel et d'eau potable sur la ville de Montréal. Les tableaux de vulnérabilité et les cartes de criticité mis en place aux étapes précédentes servant d'outil d'aide à la décision pour prioriser les secteurs et mettre en place les solutions d'atténuation adéquates.

Les solutions alors mises en place peuvent être d'ordre technique :

- Mesures visant à l'amélioration de l'étanchéité des locaux électriques ;
- Mise en place d'un asservissement entre la détection gaz et la coupure de l'alimentation électrique ;
- Analyses métallurgiques complémentaires sur les canalisations ;
- Installer des détecteurs de gaz naturel dans certaines infrastructures critiques afin de déceler toute fuite ;
- Suppression des bras morts sur les anciennes tuyauteries ;
- Diagnostics d'état des canalisations.

Elles peuvent aussi concerner les règles de gestion :

- Implanter des règles de gestion pour l'entretien et la maintenance des réseaux en tenant compte des interdépendances ;
- Modifier certaines procédures d'intervention ;

- Mettre en place des plans de communication adaptés pour optimiser l'échange d'information entre les intervenants et les gestionnaires de mesures d'urgence des réseaux.

Nous allons discuter au chapitre suivant des différentes utilisations auxquelles peuvent répondre ces mesures d'atténuation.

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Les travaux développés dans ce mémoire se veulent être une réponse à la problématique de l'étude des interdépendances géographiques. En effet, peu de méthodologies concrètes et facilement applicables existent à ce sujet et c'est pourquoi la méthodologie développée dans ce mémoire serait d'une réelle valeur ajoutée dans ce domaine. Nous allons voir, à travers cette discussion, quelles sont les utilisations possibles d'une telle méthodologie et quels en sont les intérêts et les limites. Nous verrons enfin, dans la conclusion, les résultats atteints face aux objectifs visés par ce mémoire, puis nous terminerons par les nouveaux travaux qu'il reste à faire à ce sujet.

6.1 Utilisations

Le but ultime, face à la problématique des interdépendances géographiques, est de planifier et de mettre en œuvre des mesures de gestion des risques et de réponse aux accidents, qui permettront de réduire la vulnérabilité des secteurs face aux IG. Pour cela il est nécessaire de disposer d'un système expert et d'un Système d'Alerte Précoce (SAP), ou « Early Warning System » (EWS) en anglais. Le rôle de ce dernier est de permettre la transition entre les étapes de planification et de mise en œuvre et sa mise en place se situe donc à la frontière de ces deux étapes.

En intégrant la méthodologie développée sur les IG dans le système expert « DOMINO » on permet alors la création d'une interface pouvant répondre à diverses utilisations. Elle peut ainsi être utilisée dans plusieurs domaines de la sécurité publique à des fins différentes, selon la dimension abordée.

En prévention, elle peut être utilisée comme :

- Une aide à l'identification de secteurs critiques où les IG seraient initiatrices d'interdépendances fonctionnelles ;
- Une aide à la mise en place de mesures techniques d'atténuation des risques liés aux IG ;
- Une aide à la mise en place de programmes d'inspection et d'entretien des équipements.

Ces mesures, établies sur une base permanente, visent à réduire les risques, leur fréquence ou leurs effets potentiels.

On pourrait ainsi permettre l'intégration d'un nouveau paramètre dans les plans d'intervention pour le renouvellement des conduites, qui concernerait les risques liés aux IG. En effet les indicateurs qui sont recommandés actuellement, pour les conduites d'eau potable par exemple, par la Direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales et des Régions du Québec (2005) concernent des paramètres intrinsèques tels que la longueur, l'âge, le matériau, le diamètre, l'historique des réparations, le débit de fuite, le registre des plaintes, le type de sol et la pression d'eau. Mais des paramètres concernant des risques extrinsèques causés par les conduites, comme la submersion d'équipements importants, le ravinement ou le détrempage de zones impactant d'autres RSV, devraient être pris en compte dans la priorisation des interventions.

En préparation, elle peut être vue comme une aide à la mise en place de programmes d'exercices, de simulations, de formation et de sensibilisation du personnel. Ces mesures visant à renforcer les capacités de réponse de la communauté face aux accidents.

En intervention, elle peut servir d'aide à la mise en place de mécanismes et procédures d'alerte et de mobilisation. Ces mesures étant prises immédiatement avant un accident, lors d'un accident, ou immédiatement après un accident. En effet, il serait possible, à l'aide des tableaux de vulnérabilité, d'identifier rapidement quels équipements sensibles (à une fuite de gaz par exemple) sont présents dans la zone touchée. Les RSV concernés pourraient alors prendre plus rapidement les mesures appropriées, comme la coupure de l'alimentation électrique, l'évacuation du personnel, l'interdiction d'utiliser des outils pouvant provoquer des étincelles, la redirection du trafic routier, etc.

En conception, elle peut être considérée comme une aide à l'intégration des risques concernant les IG lors de l'implantation de nouveaux équipements. Cela permettrait d'éviter la création de nouvelles IG :

- En évitant l'implantation de nouveaux équipements, considérés comme générateurs d'IG, dans une zone où sont présents des équipements sensibles à ces IG ;
- En évitant l'implantation de nouveaux équipements sensibles dans une zone où sont présents des équipements générateurs d'IG.

Il reste cependant un vaste champ d'étude pour approfondir des problématiques telles que la **gestion d'activités de travaux**, où elle pourrait aider à renforcer la sécurité sur le terrain (si l'on veut établir une bonne coordination entre les RSV par exemple) ; ou **l'aménagement du territoire**, où elle pourrait être une aide à l'intégration des risques concernant les IG dans les plans d'aménagement du territoire.

6.2 Intérêts et limites

Ce projet concernant l'étude des interdépendances géographiques sur les villes de Montréal et de Québec a fait l'objet de deux présentations suivies d'une réunion de travail sur l'outil développé avec les différents partenaires du CRP :

- À l'École Polytechnique de Montréal, le 21 mai 2010, en présence des responsables des mesures d'urgence de Bell Canada, d'Hydro Québec, de l'AMT et du Centre de sécurité civile de la Ville de Montréal ;
- Au Bureau de la sécurité civile de la Ville de Québec, le 7 juin 2010, en présence des responsables des mesures d'urgence de Bell Canada, d'Hydro Québec, de Gaz Métro, du MSP et du Bureau de sécurité civile de la Ville de Québec.

Ces réunions ont permis de discuter de l'utilisation des résultats de cette méthodologie et de leur intérêt pour les RSV. Les principaux points qui en sont ressortis sont les suivants:

Pour la problématique des fuites de gaz :

- Il existe une problématique concernant la répartition diffuse des fuites. En effet, comme il peut y en avoir presque partout sur le territoire, il apparaît essentiel de bien identifier les critères qui caractérisent les secteurs vulnérables .
- Il existe aussi une problématique sur la fréquence des fuites. En effet, les fuites de gaz sont des événements très courants à Montréal et au CSC des avis sont reçus presque tous les jours. Il faut donc établir des critères clairs afin de savoir quand aviser les RSV dans le cadre d'un SAP.
- En termes de planification ou de construction de nouveaux équipements, il est particulièrement intéressant pour un RSV de pouvoir identifier des zones sensibles.
- Dans le cas d'un SAP, il est très utile que les RSV concernés par une problématique particulière dans un secteur puissent être rapidement au courant afin de réduire les effets domino.
- Dans le cadre de l'aménagement du territoire et la planification de chantiers importants, l'utilisation de tels résultats serait intéressante. Cependant se sont des problématiques qui devraient déjà être connues.
- Dans le cadre d'une problématique de partage des infrastructures, comme le passage de différents réseaux sous un pont par exemple, les gestionnaires des RSV pensent que ces résultats sont moins utiles car depuis les événements du 11 septembre 2001 (et même avant dans certains cas) c'est beaucoup moins commun.
- En terme d'inversion de conduites, quelques cas sont déjà connus pour le transport d'électricité. En revanche pour la distribution, c'est beaucoup moins sûr et il y en aurait sûrement plus. Aussi, il est intéressant de bien identifier à qui sont les conduites sur l'ensemble du territoire.

Pour la problématique des fuites d'eau :

- Puisque les problématiques sont surtout au niveau des équipements qui sont souterrains, pour certains réseaux c'est évident qu'il y a des conséquences, comme pour la STM, par exemple. Pour les autres RSV c'est moins clair. Y a-t-il des équipements stratégiques? Quel est l'effet d'une évacuation et donc d'avoir des équipements inaccessibles?
- Quelques exemples de problèmes reliés à des fuites d'eau survenus sur des infrastructures importantes ont été mentionnés : au poste Dorchester d'Hydro-Québec, au siège social de Bell et de la Banque Nationale notamment.
- En terme de planification d'exercices de simulation, cela permettrait une meilleure préparation des exercices et peut-être de mobiliser d'autres réseaux essentiels (réseaux dépendants).

Considérations générales

- Une problématique connexe reliée aux interdépendances géographiques concerne les avis d'interruption de service. Il pourrait être intéressant de vérifier comment « DOMINO » et le SAP peut permettre d'aborder cette problématique.

CONCLUSION

À travers la revue de littérature, nous avons constaté que parmi les différents travaux portant sur les interdépendances entre RSV, les interdépendances géographiques sont souvent peu traitées. Pourtant, avec le développement croissant des réseaux techniques urbains actuels dans les grandes villes, les risques liés à la proximité des infrastructures essentielles se sont multipliés et les catastrophes des dernières années en témoignent largement. Les sociétés ont donc besoin de mener une véritable réflexion sur ce type de risques et pour cela il est nécessaire de créer des outils capables de les gérer. C'est pourquoi il est apparu indispensable de mener une telle étude sur les IG.

En accord avec les objectifs fixés au chapitre 2, nous avons donc commencé par définir ce qu'on appelle des liens d'interdépendance géographique entre RSV et nous avons développé les concepts qui s'y rattachent. Face à l'importante quantité d'informations à gérer, nous avons résolu la problématique de confidentialité des données en adoptant le concept de la cartographie souple (Robert & Morabito, 2008) qui intègre des informations cartographiques non précises (comme une densité d'équipements) avec des informations techniques pertinentes regroupées sous forme de tableaux. Nous avons ensuite fragmenté notre méthodologie en plusieurs étapes qui suivent le principe de l'approche par conséquence préconisée par le CRP. En effet, après avoir sectorisé la zone à l'étude et étudié le comportement et les effets des matières en jeu génératrices d'IG, nous nous sommes attachés d'abord aux conséquences potentielles qu'elles pouvaient engendrer. Nous avons ensuite cherché les situations de risque qui pouvaient entraîner de telles conséquences, par certaines configurations ou propriétés particulières des équipements des RSV. C'est alors que nous sommes allés chercher de l'information (dans la base de connaissance « DOMINO » et auprès des RSV) nous permettant d'évaluer la vulnérabilité des secteurs face à ces situations. Enfin, nous avons pu poser des critères nous permettant de classer les secteurs selon leur degré de criticité suivant différentes règles de hiérarchisation.

Les résultats de la méthodologie développée dans ce mémoire ont donc démontré qu'il est possible de mettre en place une solution relativement simple permettant d'étudier les IG. Cette solution a conduit à la création d'outils capables d'identifier la vulnérabilité des secteurs face aux IG (grâce aux tableaux de vulnérabilité) et de déterminer leur degré de criticité (grâce aux cartes de criticité des secteurs). Par ailleurs, ces outils sont capables de s'intégrer à un système expert en fournissant des analyses supplémentaires pour identifier et prioriser les mesures d'atténuation à mettre en place face aux risques générés par les IG. Ces analyses se basent, au maximum, sur les données déjà présentes dans la base de connaissance du système expert mais nécessitent néanmoins de nouvelles informations sur les propriétés particulières de certaines infrastructures. Ces résultats pourront servir d'outil d'aide à la décision pour aider les gestionnaires à cibler leurs choix dans un environnement complexe où, bien souvent, la surcharge comme l'absence d'informations n'aide pas à la prise de décision.

L'application d'une grande partie de cette méthodologie sur le cas concret de la ville de Montréal a aussi permis de vérifier son applicabilité, de valider les outils auprès des experts lors de réunions menées à Montréal et à Québec et d'effectuer les ajustements nécessaires au passage de la théorie à la pratique.

La méthodologie proposée par ces travaux devrait donc, à terme, aider chaque RSV à mieux se protéger des défaillances transmises par les RSV avec lesquelles ils entretiennent des liens d'interdépendances géographiques, ce qui contribuera à rendre nos sociétés moins vulnérables.

Néanmoins, ces travaux de recherche présentent des limites et il reste de nombreux axes à développer. En effet, on peut se demander si les critères de criticité d'un secteur ne restent pas trop globaux et s'ils sont assez représentatifs. On pourrait en trouver de nouveaux et aussi leur donner différents poids en fonction de différentes expertises. Par ailleurs on ne s'est pas attaché aux conséquences sur la population à proprement dit dans cette étude car le but était de traiter les IG entre les RSV.

Et bien que l'étude effectuée dans ce mémoire a posé les bases de la compréhension des IG et a permis la création de nouveaux outils, de futurs travaux sur ce sujet seront nécessaires. En effet, il existe de nombreuses matières génératrices d'IG avec des comportements différents et il serait donc intéressant de les étudier, comme pour le cas du transport routier de matières dangereuses par exemple. Il faudrait aussi permettre l'intégration des cartes de criticité sur une plateforme interactive (un SIG, par exemple) qui permettrait une visualisation dynamique des secteurs critiques en fonction d'une matière, d'un comportement, d'une conséquence, d'une situation de risque, d'une règle de hiérarchisation, etc. Cette étude étant ouverte il sera possible d'améliorer les outils créés et de développer de nouveaux outils d'aide à la décision. L'application à différentes zones d'étude et à différentes échelles permettra aussi de valider ou d'adapter ces outils. Par ailleurs, on a vu dans la discussion que la méthodologie peut avoir des applications dans différents domaines de la sécurité publique. Mais si certaines de ces utilisations sont plus évidentes, comme en prévention, en intervention ou en conception, il reste néanmoins à préciser et à approfondir le cas de la vaste problématique de l'aménagement du territoire.

BIBLIOGRAPHIE

- BARPI. (2010a). *ARIA n°27681 - Transports par conduite*. Base de données ARIA, Enseignements tirés des accidents technologiques, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions industriels, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, France. Consulté le 21 juillet 2010, tiré de http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/barpi_stats.gnc.
- BARPI. (2010b). *ARIA n°16863 - Captage, traitement et distribution d'eau*. Base de données ARIA, Enseignements tirés des accidents technologiques, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions industriels, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, France. Consulté le 21 juillet 2010, tiré de http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/barpi_stats.gnc.
- BARPI. (2010c). *ARIA n°35014 - Commerce de gros de combustibles et de produits annexes*. Base de données ARIA, Enseignements tirés des accidents technologiques, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions industriels, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, France. Consulté le 21 juillet 2010, tiré de http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/barpi_stats.gnc.
- BARPI. (2010d). *Effets dominos*. Base de données ARIA, Enseignements tirés des accidents technologiques, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions industriels, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, France. Consulté le 23 juillet 2010, tiré de http://barpipdf.geniecube.info/fichek_35672_et_35860_effets_dominos.pdf.
- Centre de sécurité civile de la ville de Montréal. (2010). *Mission du Centre de sécurité civile*. Consulté le 25 juillet 2010, tiré de http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=2776,3108458&_dad=portal&_schema=PORTAL.

- Chaire de Recherche du Canada en Aide à la Décision Territoriale de l'Université Laval. (2005). *Manuel d'introduction à l'Aide à la Décision Territoriale*. Consulté le 27 juin 2010, tiré de http://www.adt.chaire.ulaval.ca/4_ressources/manuel_introduction.php.
- Commission des services électriques de la ville de Montréal (CSEM). (2010). *Services professionnels*. Consulté le 14 mai 2010, tiré de <http://www.csem.qc.ca/index.asp?MenuID=4&SMenuID=13&DDMenuID=4>.
- Conseil pour la réduction des risques industriels majeurs. (2006). Les barrières de sécurité et le noeud papillon. *Dépliant de vulgarisation technique, 3*.
- De La Lande de Calan, R. (2007). *Modélisation des interdépendances pour identifier et anticiper les effets dominos*. (M.Sc.A, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada).
- Denègre, J., & Salgé, F. (2004). *Les systèmes d'information géographique*. Paris: P.U.F.
- Département de géographie de l'École Normale Supérieure. (2009). *Les différents risques*. Consulté le 20 juin 2010, tiré de <http://129.199.13.25/Les-differents-risques.html>.
- Direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales et des Régions du Québec. (2005). *Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout*.
- Dudenhoeffer, D. D., Permann, M. R., & Manic, M. (2006). CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. *Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter* (pp. 478-485).
- Estacio, J. (2004). *Risques technologiques liés au stockage et au transport de combustibles dans le District Métropolitain de Quito* (DEA, Université de Savoie).

- Gignac, N. (2009). G.O. LOC - Un nouvel outil pour gérer les opérations de localisation et de cartographie. *Résilience*, 4(3), 18-19.
- Gleyze, J. (2001). Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes. *Bulletin d'Information de l'IGN*, 72(3), 69.
- Griot, C. (2007). Vulnérabilité et transport de matières dangereuses : une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile. *Cybergeo*, 1(361).
- Handfield, C. (2009). *Fuite de gaz dans le Vieux-Montréal: tout est rétabli*. La Presse. Consulté le 18 février 2009, tiré de <http://www.cyberpresse.ca/actualites/quebec-canada/justice-et-faits-divers/200902/18/01-828771-fuite-de-gaz-dans-le-vieux-montreal-toutestretabli.php>.
- Johnson, C. W., & McLean, K. (2008). Tools for Local Critical Infrastructure Protection : Computational Support for Identifying Safety and Security Interdependencies between Local Critical Infrastructures. *2008 3rd IET International Conference on System Safety* (pp. 1-6).
- Mendonça, D., & Wallace, W. (2006). Impacts of the 2001 world trade center attack on New York City critical infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*, 12, 260.
- Michel-Kerjan, E. (2003). Risques catastrophiques et réseaux vitaux : de nouvelles vulnérabilités. *Flux*, 51(1), 6-15.
- Ministère de la Sécurité Publique du Québec [MSP]. (2004). *Lignes directrices visant à favoriser l'intervention lors d'incidents impliquant le gaz naturel*. Consulté le 3 mars 2010, tiré de http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/index.php?id=3657&no_cache=1.
- Ministère de la Sécurité Publique du Québec [MSP]. (2010a). *Sûreté des infrastructures stratégiques*. Consulté le 25 février 2010, tiré de <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/index.php?id=857>.

Ministère de la Sécurité Publique du Québec [MSP]. (2010b). *Démarche gouvernementale de résilience des systèmes essentiels*. Consulté le 02 novembre 2010, tiré de <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/index.php?id=1173>.

Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs [MDDEP]. (2010). *Règlement sur les matières dangereuses*. MDDEP, Loi sur la qualité de l'environnement, L.R.Q., c. Q-2, r. 15.2. Consulté le 1er mai 2010, tiré de http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R15_2.HTM.

Moteff, J., Copeland, C., & Fischer, J. (2003). *Critical infrastructures: what makes an infrastructure critical?* Report for Congress, The Library of Congress. Consulté le 1er novembre 2010, tiré de http://www.libertysecurity.org/IMG/pdf/CRS_Report_-_What_makes_an_Infrastructure_Critical_-_30.08.2002.pdf.

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.

Paris, L. (2010). Évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre. *Techniques de l'ingénieur*, 5(62).

Pederson, P., Dudenhoefter, D., Hartley, S., & Permann, M. (2006). Critical infrastructure interdependency modeling: a survey of US and international research. *Idaho National Laboratory report INL/EXT-06-11464*.

Pellet, R. (2009a). *Système expert de modélisation des effets dominos entre réseaux de support à la vie* (M.Sc.A, École Polytechnique de Montréal, Montréal. Québec, Canada).

- Pellet, R. (2009b). Critical Infrastructures Interdependency Modelling. *Modelling & Simulation of Public Safety & Security Operations, Ottawa, December 3rd, 2009.*
- Reniers, G. L. L., Dullaert, W., Ale, B. J. M., & Soudan, K. (2005). Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of loss prevention in the process industries, 13(3)*, 127-138.
- Restrepo, C. E., Simonoff, J. S., & Zimmerman, R. (2006). Unraveling Geographic Interdependencies in Electric Power Infrastructure. *System Sciences, 2006. HICSS '06. Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (Vol. 10, pp. 248a-248a).*
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *Control Systems Magazine, IEEE, 21(6)*, 11-25.
- Robert, B., Sabourin, J., Glaus, M., Petit, F., & Senay, M. (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., & Morabito, L. (2008). The operational tools for managing physical interdependencies among critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures, 4(4)*, 353-367.
- Robert, B., & Morabito, L. (2009). *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles. Guide méthodologique.* Paris: Lavoisier.
- Robert, B., & Morabito, L. (2010). An approach to identifying geographic interdependencies among critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures, 6(1)*, 17-30.

Sécurité publique Canada [SPC]. (2010). *Infrastructures essentielles*. Consulté le 28 mai 2010, tiré de <http://www.securitepublique.gc.ca/prg/em/ci/index-fra.aspx>.

UE. (2004). *Protection des infrastructures critiques dans le cadre de la lutte contre le terrorisme*. Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen. Consulté le 1er novembre 2010, tiré de http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=fr&type_doc=COMfinal&an_doc=2004&nu_doc=702.

Wallace, W., Mendonca, D., Lee, E., Mitchell, J., & Chow, J. (2003). Managing disruptions to critical interdependent infrastructures in the context of the 2001 world trade center attack. *Beyond September 11th: An Account of Post-Disaster Research*, 165–198.

Wolthusen, S. D. (2005). GIS-based command and control infrastructure for critical infrastructure protection. *First IEEE International Workshop on Critical Infrastructure Protection (IWCIP'05)* (pp. 1-8).

Zimmerman, R. (2002). Enjeux et gestion des interactions entre les différents réseaux d'infrastructure. *Flux*, 47(1), 54-68.

ANNEXE 1 – Tableau de vulnérabilité des infrastructures

Informations sur l'infrastructure et sa localisation		VULNÉRABILITÉ					
		Explosion de gaz naturel	Fuite de gaz naturel				Coupe d'électricité
Infrastructure	Localisation précise de l'infrastructure (adresse civique ou intersection) OPTIONNEL	En vous référant à la carte fournie avec le questionnaire, indiquez dans quel secteur de la zone d'étude est localisée cette infrastructure. SI vous fournissez une adresse ou une intersection, vous n'avez pas à remplir ces deux colonnes.	Allumage retardé		Évacuation / Inaccessibilité	Équipement nécessitant une évacuation ou inaccessible suite à une fuite de gaz naturel à proximité	Équipement souterrain pouvant être submergé
			Équipement utilisant du gaz naturel	Équipement pouvant provoquer un allumage retardé			
Nom	Adresse	Coordonnée x	Coordonnée y				
		X	Y				
				oui / non	oui / non	oui / non	oui / non
				oui / non	oui / non	oui / non	oui / non

ANNEXE 3 – Présentation des questionnaires de la méthodologie





Étude des interdépendances géographiques entre réseaux de support à la vie

Présentation de la méthodologie

7 Juin 2010

Bureau de Sécurité Civile
de la Ville de Québec

Bertrand LEFÉBURE



1

Plan de la présentation

1. Définition
2. Problématique et objectifs
3. Méthodologie
4. Discussion



2

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

1. Interdépendances géographiques

➤ Définition :

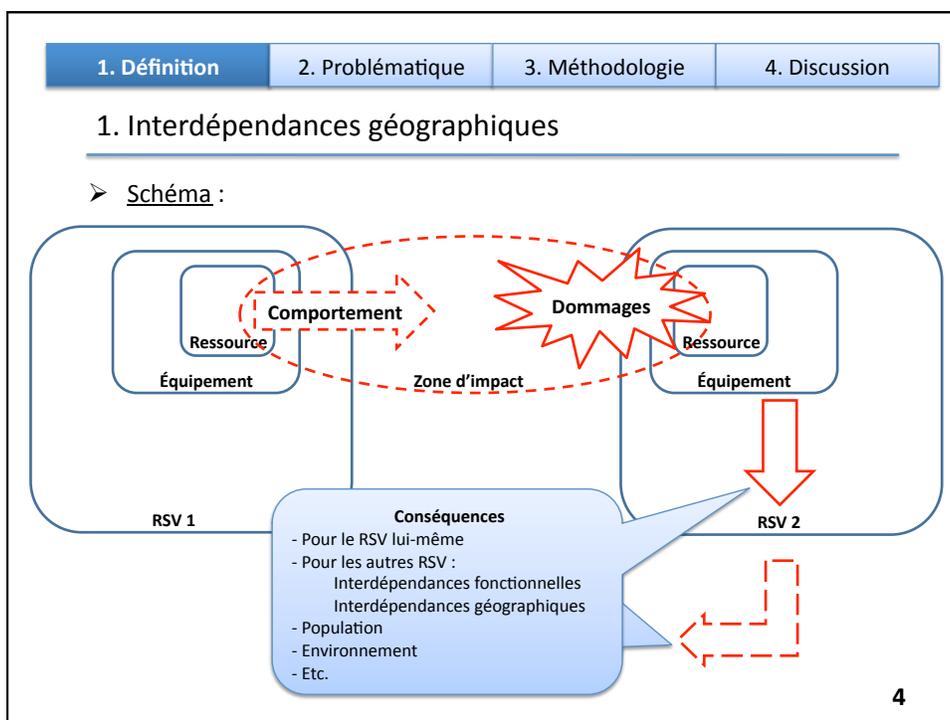
« Une dépendance géographique existe entre deux RSV si :

Le comportement non maîtrisé d'une ressource matérielle d'un RSV peut engendrer des dommages, dans une zone géographique, sur des équipements susceptibles d'entraîner des conséquences pour un autre RSV.

Ce lien se matérialise uniquement lorsque l'aléa survient. »



3



1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	-------------------------	-----------------	---------------

2.1 Problématique

→ Identifier des secteurs critiques où les interdépendances géographiques seraient initiatrices d'interdépendances fonctionnelles.



2.2 Objectifs

→ Développer un outil d'aide à la décision (intégré au modèle DOMINO développé par le CRP) capable de répondre à la problématique.

→ Permettre aux partenaires de connaître les risques liés aux interdépendances géographiques et de mettre en place des mesures de prévention appropriées.



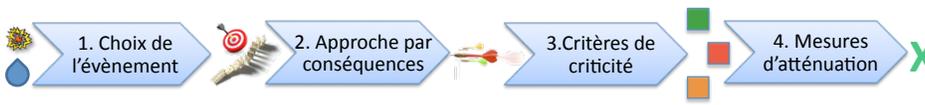
5

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	------------------------	---------------

3. Démarche

Étape 1 → Étape 2 → Étape 3

1. Choix de l'évènement → 2. Approche par conséquences → 3. Critères de criticité → 4. Mesures d'atténuation X



6

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.1 Étape 1

- Choix de la ressource matérielle potentiellement génératrice d'IG
 - ➔ Gaz naturel
 - ➔ Eau potable
- Choix du comportement associé
 - ➔ Explosion
 - ➔ Fuite







7

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.2 Étape 2

- Critères de criticité d'un secteur pour le gaz naturel :

		VULNÉRABILITÉ				
		Explosion de gaz naturel	Fuite de gaz naturel			Évacuation, inaccessibilité
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	Allumage retardé			Évacuation, inaccessibilité	
CONSÉQUENCES		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
	ED	ED				
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

ED = Effets Dominos

8

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Explosion de gaz naturel 

9

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Explosion de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

équipements sensibles + secteurs à potentiel de dommages  **vulnérabilité explosion**

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT		Fuite de gaz naturel				
CONSÉQUENCES		Allumage retardé			Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

10

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.2 Étape 2

Explosion de gaz naturel

1. Informations sur les équipements sensibles

> *informations connues :*

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification
Q1	• Lister les équipements susceptibles d'être "endommagés" (arrêt de fonctionnement) en cas d'explosion majeure de gaz naturel à proximité.		"Dominos"	

> *informations demandées :*

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Explosion majeure : conduites hautes pressions ≥ xxxx Kpa					
Q1	• Lister d'autres équipements stratégiques susceptibles d'être "endommagés" (arrêt de fonctionnement) en cas d'explosion majeure de gaz naturel à proximité.		RSV		v

11

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.2 Étape 2

Explosion de gaz naturel

2. Informations sur les équipements dangereux

> *informations demandées :*

N°	Questions	Connaissance	Secteurs	Identification	Caractéristiques	Mémoire
Explosion majeure : conduites hautes pressions ≥ xxxx Kpa						
Q2.1	• Lister les secteurs impactés par l'explosion de conduites de transport et de distribution majeures de gaz naturel.	GazMétro	XXXX XXXX	Conduite XXXXXX	Pression Coulour d'impact	v
Q2.2	• Lister les secteurs impactés par l'explosion de réservoirs de stockage majeurs de gaz naturel.	GazMétro	XXXX	Réservoir XXXXXX	Volume, Pression, Rayon d'impact	v

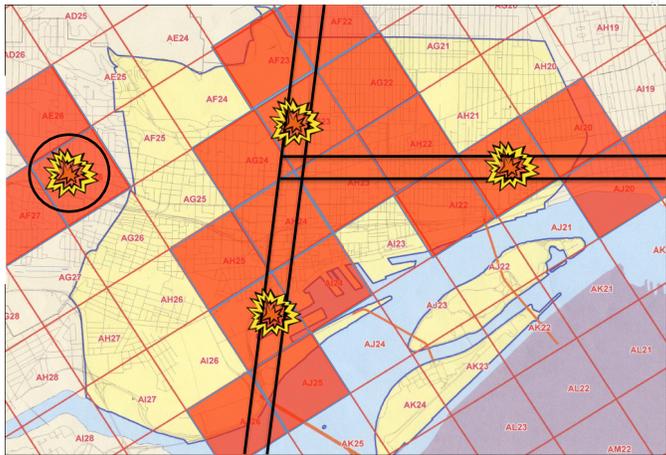
12

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 **Explosion**

➤ Identification de secteurs à forts potentiels de dommages



13

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 **Explosion de gaz naturel**

➤ Détails :

		VULNÉRABILITÉ			
		Explosion de gaz naturel			
		Effets dominos			
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	XXX1	Bell	Équipement 1	1 ^{er} ordre
			H-Q	Équipement 2	X
				Équipement 3	2 ^{ème} ordre
CONSÉQUENCES		XXX2			
				
		XXXN			

14

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel 

15

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ **Conséquences :**

➔ **allumage retardé** : à cause

- d'utilisation de gaz 
- de pressions négatives 
- d'inversions de conduites 

➔ **évacuation / blocage d'accès** 

➔ **coupure d'électricité** 

16

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ Absence d'équipements

➤ *informations demandées :*

N°	Question	Connaissance	Secteurs	Mémoire
Q1	• Lister les secteurs éventuels où il n'y a aucun équipement de gaz naturel.	GazMétro	XXXX	V

17

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel


Utilisation de gaz


18

1. Définition 2. Problématique 3. Méthodologie 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

équipements sensibles + utilisation de gaz → vulnérabilité allumage retardé

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT		Explosion de gaz naturel		Fuite de gaz naturel		
CONSÉQUENCES		à cause d'utilisation de gaz naturel		Allumage retardé	Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
		à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives			
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

19

1. Définition 2. Problématique 3. Méthodologie 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

1. Informations sur les équipements sensibles 

➤ informations connues :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	Lister les équipements susceptibles d'entraîner un <u>allumage retardé</u> en cas de fuite de gaz naturel à proximité.		"Dominos" RSV		v

➤ informations demandées :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	Lister d'autres équipements <u>stratégiques</u> susceptibles d'entraîner un <u>allumage retardé</u> en cas de fuite de gaz naturel à proximité.		RSV		v

20

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

2. Identification d'équipements dangereux 

➤ informations connues :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Effets dominos
Q2	• Lister parmi les équipements identifiés en Q1 ceux qui utilisent du gaz naturel.	voir Q1	"Dominos"		

21

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

➤ Détails :

		VULNÉRABILITÉ	
		Allumage retardé	
		Utilisation de gaz	
		Effets dominos	
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	XXX1	Équipement 1 1 ^{er} ordre
CONSÉQUENCES		XXX2	Équipement 2 X
			Équipement 3 2 ^{ème} ordre
		
		XXXN	

à cause d'utilisation de gaz naturel

ED ED

SECTEURS

SECTEURS

SECTEURS

22

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel 

Inversions de conduites 

23

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

inversions de conduites + raccordement conduite + fuite de gaz  **vulnérabilité allumage retardé**

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel				Fuite de gaz naturel	
CONSÉQUENCES			Allumage retardé		Évacuation, inaccessibilité	Coupeure d'électricité
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

24

1. Définition
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

1. Informations sur les inversions de conduites

> informations demandées :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	<ul style="list-style-type: none"> Lister les secteurs ou des équipements sont enfouis <u>au-dessus</u> de conduites de gaz naturel (inversions de conduites) 		CSEM		v

2. Informations sur les équipements sensibles

> informations demandées :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q2	<ul style="list-style-type: none"> Lister, dans ces secteurs, les équipements qui sont raccordés à des conduites. 	voir Q1	RSV « Domino »		v

25

1. Définition
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

➤ Détails :

		VULNÉRABILITÉ				VULNÉRABILITÉ	
						Allumage retardé	
						Inversions de conduites	
						équipement 1	
						équipement 2	
						équipement 3	
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	Fuite				XXX1	
CONSÉQUENCES		Allumage retardé				XXX2	
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause d'inversions de conduites	à cause d'inversions de conduites		
		ED	ED				
SECTEURS	XXX1						
	XXX2						
						
	XXXN						

26

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel 

Pressions négatives 

27

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

équipements à pressions négatives + fuite de gaz  **vulnérabilité allumage retardé**

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	fuite de gaz naturel			Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
CONSÉQUENCES		Allumage retardé				
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

28

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

1. Identification d'équipements sensibles 

> informations demandées :

N°	Question	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	Lister les équipements qui se trouvent en zones de pressions négatives (métro, Montréal souterrain...)		RSV « Domino »		v

29

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

> Détails :

		VULNÉRABILITÉ		VULNÉRABILITÉ	
		Allumage retardé			
		Pressions négatives		Fuite de gaz naturel	
ÉVÈNEMENT	Explosion de			Évacuation, inaccessibilité	Coupeure d'électricité
SECTEURS	XXX1	Équipement 1	à cause de zones de pressions négatives		
		Équipement 2			
		Équipement 3			
	XXX2				
				
	XXXN				

30

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel 

Évacuation 

31

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

équipements sensibles + fuite de gaz  **vulnérabilité évacuation**

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT		Explosion de gaz naturel		Fuite de gaz naturel		
CONSÉQUENCES		Allumage retardé			Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

32

1. Définition
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

1. Identification d'équipements sensibles

➤ *informations connues :*

N°	Questions	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	• Lister les équipements qui ne pourraient plus assurer leurs fonctions en cas de fuite de gaz naturel à proximité (évacuation ou inaccessibilité).		"Dominos » RSV		v

➤ *informations demandées :*

N°	Questions	Secteurs	Connaissance	Identification	Mémoire
Q1	• Lister d'autres équipements stratégiques qui ne pourraient plus assurer leurs fonctions en cas de fuite de gaz naturel à proximité (évacuation ou inaccessibilité).		RSV		v

33

1. Définition
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel

➤ Détails :

		VULNÉRABILITÉ				
		Évacuation / Inaccessibilité				
ÉVÈNEMENT	CONSEQUENCE	SECTEURS	XXX1	Équipement 1 Équipement 2 Équipement 3	Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
			XXX2			
SECTEURS	XXX1				
	XXX2					
	XXXN					

34

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

Fuite de gaz naturel 

Coupure d'électricité 

35

1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.2 Étape 2

 Fuite de gaz naturel

➤ Couplage des informations :

équipements électriques + fuite de gaz  **vulnérabilité coupure d'électricité**

		VULNÉRABILITÉ				
ÉVÈNEMENT	Explosion de gaz naturel	Fuite de gaz naturel			Évacuation, inaccessibilité	Coupure d'électricité
CONSÉQUENCES		Allumage retardé				
		à cause d'utilisation de gaz naturel	à cause d'inversions de conduites	à cause de zones de pressions négatives		
		ED	ED			
SECTEURS	XXX1					
	XXX2					
					
	XXXN					

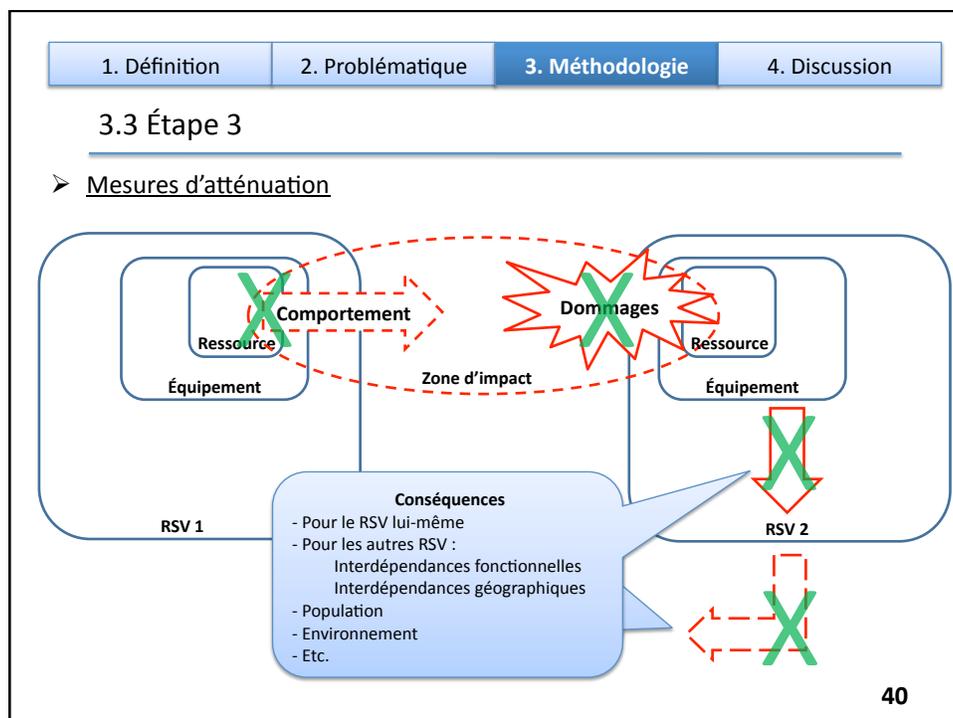
36

1. Définition	2. Problématique	3. Méthodologie	4. Discussion
---------------	------------------	-----------------	---------------

3.3 Étape 3

Mesures d'atténuation
X

39



1. Définition 2. Problématique **3. Méthodologie** 4. Discussion

3.4 Eau potable

➤ Même méthodologie

		VULNÉRABILITÉ					
ÉVÈNEMENT	Explosion/rupture de conduite d'eau potable	Fuite d'eau potable					
CONSÉQUENCES		Submersion			Évacuation, inaccessibilité	Coupeure d'électricité	
		à cause d'utilisation d'eau potable	à cause de corridors communs	à cause d'équipements souterrains			
	ED	ED					
SECTEURS	XXX1						
	XXX2						
						
	XXXN						

ED = Effets Dominos

41

1. Définition 2. Problématique 3. Méthodologie **4. Discussion**

4.1 Plan de travail

```

    graph TD
      A[Tableaux Excel pré-remplis] --> B[Validations]
      B --> C[Compléments d'informations]
      C --> D[Questions précises]
      D --> E[Analyse des informations]
  
```

42