POLYPUBLIE

Estimation des coûts indirects des bris d'infrastructures souterraines au Québec à travers 3 études de cas

Vincent Mouchikhine

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2013
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/1257/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Mouchikhine, V. (2013). Estimation des coûts indirects des bris d'infrastructures souterraines au Québec à travers 3 études de cas [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/1257/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Nathalie De Marcellis-Warin, & Thierry Warin
Programme Program	Génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ESTIMATION DES COÛTS INDIRECTS DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES AU QUÉBEC À TRAVERS 3 ÉTUDES DE CAS

VINCENT MOUCHIKHINE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

NOVEMBRE 2013

© Vincent Mouchikhine, 2013.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ESTIMATION DES COÛTS INDIRECTS DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES AU QUÉBEC À TRAVERS 3 ÉTUDES DE CAS

présenté par : MOUCHIKHINE Vincent

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

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

M. TRÉPANIER Martin, Ph.D , président

Mme DE MARCELLIS-WARIN Nathalie, Doct., membre et directrice de recherche

M. WARIN Thierry, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. CLÉMENT Éric, M.Env. , membre

DÉDICACE

À ma famille

Et à tous les gens qui m'ont soutenu pendant ma maîtrise

REMERCIEMENTS

J’aimerais profiter de cette section afin de remercier un grand nombre de personnes qui m’ont aidé à la réalisation de ce mémoire de maîtrise. Je souhaiterais commencer par remercier ma directrice de recherche, Nathalie de Marcellis-Warin, ainsi que mon codirecteur, Thierry Warin pour le temps et l’énergie qu’ils m’ont consacré ainsi que pour le soutien qu’ils ont su m’apporté. Je les remercie également de m’avoir donné l’opportunité de m’investir dans ce projet. Ce mémoire de maîtrise s’inscrit dans un projet au CIRANO. Je souhaiterais donc remercier à ce titre le Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, et en particulier Ingrid Peignier pour l’accueil et le soutien reçus durant les diverses phases du projet.

La réalisation d’une étude et d’un rapport de cette nature nécessite l’implication d’un grand nombre de partenaires et personnes externes. Je souhaiterais ainsi remercier sans ordre précis le Service de sécurité Incendie de Montréal, la compagnie Gaz Métro, le Service de Police de la ville de Montréal, les sociétés Hydro-Québec et Bell Canada, les services de transport de la ville de Montréal ainsi que les différents services la ville de Gatineau pour l’ensemble des informations qu’ils ont accepté de me transmettre. Je souhaiterais également remercier chaleureusement Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines pour sa collaboration et son implication apportées tout au long du projet.

Enfin, j’aimerais remercier l’organisme MITACS qui, à travers son programme Mitacs-Accélération a contribué à rendre ce projet possible. Ma maîtrise n’aurait pu avoir lieu sans le partenariat de stage proposé par cet organisme.

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de faire un état des lieux des coûts socio-économiques liés aux bris d'infrastructures souterraines au Québec. Avec environ 5 bris d'infrastructures souterraines par jour en 2012, uniquement pour la province du Québec, l'étude de l'impact social, mais également économique de cette problématique s'avère être importante.

La problématique de l'étude visant à évaluer l'ensemble des coûts reliés à un bris d'infrastructure souterraine nécessitait la définition de ces coûts. Quand nous parlons des coûts liés aux bris d'infrastructures souterraines, il est important de différencier deux grandes familles de coûts. Les premiers sont appelés coûts directs (CD) et représentent les coûts nécessaires à la remise en état des infrastructures touchées lors du bris. Parmi ces coûts, on retrouve le coût des matériaux de remplacement, celui du matériel utilisé et de la main-d'œuvre, mais également le coût de la gestion du projet. À ces CD, il est important d'ajouter la présence de coûts indirects (CI). Ces coûts correspondent à l'évaluation économique de toutes les perturbations ayant un lien plus ou moins important, mais avéré avec le bris. Ils sont variés et peuvent balayer un large éventail de domaines. On y retrouve notamment le coût de la perte de produit et celui lié à l'interruption de service. À cela s'ajoute le coût associé aux diverses interventions de la part des services d'urgence, les coûts dus à la perturbation des sols, ceux engendrés par la fermeture ou la perturbation d'une section de route (congestion, perte de temps, surconsommation, etc.) ainsi que les coûts provenant des impacts environnementaux (bruit, vibrations, pollutions de tous genres). Enfin, nous verrons les coûts liés aux impacts économiques qui s'accompagnent d'une baisse visible de la qualité de vie.

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un projet de recherche en partenariat avec Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines ainsi qu'avec divers propriétaire d'infrastructures souterraines. La collaboration du CIRANO et de Polytechnique Montréal au projet soutenu par Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines se décompose en plusieurs parties. Nous avons tout d'abord effectué une revue de la littérature et des théories existantes. Les diverses études nous ont permis de définir les différents coûts reliés aux bris d'infrastructures souterraines. Ces études nous ont ensuite permis de regrouper un grand nombre de méthodes de calcul. Ainsi, après avoir réactualisé les différents résultats d'études passées, nous avons pu définir une procédure d'estimation des coûts directs et

indirects qui allait être suivie lors de nos différentes études de cas. Le but était de trouver, quel que soit le coût, la méthode d'estimation la plus efficace, mais également la plus explicite.

À cette étude théorique sont donc venues s'ajouter 3 études de cas représentatives des bris d'infrastructures souterraines au Québec. Ces 3 études avaient comme principal objectif de regrouper un maximum de type de coûts, mais également être représentatives des préoccupations des différents propriétaires d'infrastructure. Ainsi, l'étude d'un bris d'une conduite de gaz, mais également l'étude d'un bris d'un câble souterrain de télécommunication et l'étude d'une rupture d'une canalisation d'eau potable ont été menées. À travers ces 3 études de cas, un grand nombre de coûts ont été étudiés : le coût des interventions de service d'urgence, les coûts propres à un bris de canalisation de gaz, les coûts d'interruption de service électrique, les coûts liés aux perturbations importantes sur le trafic routier, etc. Les études de cas ont ainsi illustré les notions préalablement développées afin de mettre en lumière l'importance que représentent les CI lors des bris. Nous verrons qu'il n'est pas rare de voir les CI représenter la majorité des coûts totaux. Dans certaines situations, nous montrerons également que les coûts indirects liés à un bris « mineur » peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers de dollars.

Ce projet a été effectué dans le cadre d'une étude plus large conduite au CIRANO par le groupe Risque. Cette étude a également permis d'évaluer les coûts indirects totaux pour les bris qui sont survenus au Québec en 2012. L'ensemble de ces résultats s'inscrit dans la politique de prévention défendue par Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines visant à promouvoir les bonnes pratiques d'excavation à suivre. Les résultats de l'étude illustrent l'importance de l'action menée par Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines. Car si pour un bris d'infrastructure souterraine, les coûts totaux peuvent rapidement atteindre plusieurs dizaines voir plusieurs centaines de milliers de dollars, le coût total annuel lié aux bris d'infrastructures souterraines au Québec pourrait s'élever à plusieurs millions voir plusieurs dizaines de millions de dollars de préjudice.

ABSTRACT

The primary objective of this study is to make an overview of societal costs related to buried infrastructure breakages in Québec. With five infrastructure breakages per day in 2012 for Québec, a study on social and economic costs appears to be a necessity.

The objective of the study is to assess the overall costs of a broken underground infrastructure, requires the definition of these costs. When we study costs related to buried infrastructure breakages, we have to discern two main types of costs. The first are called direct costs and represent all the costs necessary for the rehabilitation and the repairing of the affected infrastructures during breaking. These costs include replacement material, hardware, project management, and hourly cost related to labor. With these direct costs, it is important to add the presence of indirect costs. These costs correspond to the economic evaluation of all the disturbances. These disturbances may be linked to the breakage more or less. These costs are varied and can cover a large range of fields. For example, we discern the cost of product lost, service interruptions, and emergency services interventions. Also, we focus on the costs related to the disturbance of the grounds and those due to the disturbance of the road traffic (congestion, deviation, overconsumption, etc). Finally, we see the costs of environmental impacts (noise, vibrations, various pollutions etc.) and economic factors associated with a visible decrease of the life quality.

This study was conducted as part of a research project in partnership with the Alliance for the protection of underground infrastructures (Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines) as well as various underground infrastructure owners. The collaboration of CIRANO and Polytechnique Montreal for this project, supported by the Alliance, is divided into several parts. Firstly, we conducted a literature review of existing theories. These studies were then allowed us to gather a large number of estimation methods. After refreshing the different results of previous studies, we could define a procedure to estimate the direct and indirect costs that would be followed in our studies. The goal was to find, whatever the cost, the most effective method of estimation, but also the more explicit.

With this theoretical study, we added three case studies representative of breakages underground infrastructure in Québec. These 3 studies had as main objective to combine a maximum of such costs but also be representative of the concerns of the different infrastructure owners. Thus, the

study of a broken gas line, but also the study of a broken underground telecommunication cable and the study of a rupture of a drinking water pipeline were conducted. Through these three breakages, a lot of costs were studied: the cost of emergency service interventions, costs specific to a breakage of a pipeline, the costs of electrical service interruption, the costs related to traffic major disruptions, etc. The studies illustrate the concepts previously developed to highlight the importance of representing the indirect costs. We will see that it is not uncommon to find that indirect costs represent the majority of total costs. In some situations, we also show that indirect costs associated with a "minor" breach can reach several hundreds of thousands of dollars.

This project was conducted as part of a large study conducted by the CIRANO risk group. This study also assessed the total indirect costs for infrastructure breakages that occurred in Quebec in 2012. These results are part of the prevention policy advocated by the Alliance for the Protection of Underground Infrastructure in Québec to promote good excavation practices. The results of the study illustrate the importance of the Alliance action. As if for an underground infrastructure breakages, total costs can quickly reach several tens or hundreds of thousands of dollars, the total annual cost to breakage of underground infrastructure in Quebec could amount to several millions or several tens of millions of dollars in damage.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XIII

LISTE DES FIGURES XV

LISTE DES ANNEXES XVIII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE : DÉFINITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COÛTS RELIÉS À UN BRIS D'INFRASTRUCTURE SOUTERRAINE 4

1.1 Les bris d'infrastructures souterraines au Québec 4

1.2 Les coûts directs 5

1.3 Les coûts indirects 5

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 8

2.1 Les coûts directs, nécessaires à la remise en état des infrastructures souterraines touchées 8

2.1.1 Coûts des matériaux de remplacement 8

2.1.2 Coûts du matériel utilisé pour la remise en état des infrastructures 8

2.1.3 Coûts de la main-d'œuvre 9

2.1.4 Coûts administratifs et coûts de gestion de projet nécessaires 9

2.2 Les coûts indirects applicables aux bris d'infrastructures souterraines 10

2.2.1 Coûts des pertes de produits dues au bris 10

2.2.2 Interruption de service de l'infrastructure souterraine touchée et des diverses infrastructures parallèles 10

2.2.3 Coûts associés aux diverses interventions d'urgences 12

2.2.4 Perturbation des sols et réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes 13

2.2.5 Prolongement de la fermeture ou de la perturbation d'une section de route et impacts sur les déplacements et le trafic 14

2.2.6 Impacts environnementaux 19

2.2.7 Impacts économiques 25

2.2.8 Baisse de la qualité de vie 28

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CALCUL DES COÛTS INDIRECTS LIÉS À DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES 29

3.1 Ajustement des estimations de coûts en fonction des années 29

3.2 Calcul et estimation des coûts directs 30

3.3 Mesures et estimations des coûts indirects liés au bris 30

3.3.1 Pertes de produits dues 30

3.3.2 Estimation des coûts liés aux interventions d'urgence 31

3.3.3 Perturbation des sols et réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes 35

3.3.4 Prolongement de la fermeture ou de la perturbation d'une section de route et impacts sur les déplacements et le trafic 35

3.3.5 Les impacts environnementaux 46

3.3.6 Impacts économiques 49

CHAPITRE 4 DÉMARCHE SUIVIE LORS DU CHOIX ET DE L'ESTIMATION DES COÛTS DES ÉTUDES DE CAS 51

4.1 Choix des études de cas 51

4.2 Collecte des données pour les études de cas 51

4.2.1 Déplacements sur le lieu du bris si le cas est survenu durant notre étude.....51

4.2.2 Collecte de données *a posteriori*.....52

CHAPITRE 5 LES ÉTUDES DE CAS RETENUES.....55

5.1 Bris d'une conduite de gaz au cœur d'un quartier résidentiel montréalais : le cas de l'avenue Coloniale.....55

5.1.1 Localisation du bris.....55

5.1.2 Le bris.....56

5.1.3 Les causes du bris.....60

5.1.4 Les divers coûts engendrés.....60

5.1.5 Coûts directs.....61

5.1.6 Coûts indirects.....65

5.1.7 Conclusion.....72

5.2 Bris d'infrastructure souterraine de télécommunication, le cas du câble de télécommunication de la compagnie Bell au niveau du croisement Jean Talon – Côte-des-Neiges à Montréal.....75

5.2.1 Localisation du bris.....75

5.2.2 Les circonstances du bris.....76

5.2.3 Les coûts directs du bris.....77

5.2.4 Les conséquences du bris et les coûts indirects associés.....78

5.2.5 Conclusions.....89

5.3 Rupture d'une canalisation d'eau potable du réseau secondaire : bris quasi quotidien sur une artère principale dans l'agglomération de Gatineau.....92

5.3.1 Localisation du bris.....92

5.3.2 Déroulement du bris et intervention des services spécialisés : coûts de réparation des infrastructures touchées.....93

5.3.3 Les conséquences du bris et les coûts indirects associés.....95

5.3.4 Coûts finaux 97

DISCUSSION ET CONCLUSION.....100

BIBLIOGRAPHIE 105

ANNEXES 109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Coût horaire d'une coupure de service électrique (LaCommare & Eto, 2006) 11

Tableau 2.2 : Coût moyen par type d'accident (Manuilova et al., 2009) 18

Tableau 2.3 : Coûts métriques des matières polluantes (Gourvil & Joubert, 2004).....21

Tableau 2.4 : Table de facteurs de dépréciation sonore (Matthews & Allouche, 2010) 23

Tableau 2.5 : Taux horaires des différents véhicules d'intervention des services de sécurité publique 32

Tableau 2.6 : Équivalence des types de clients de service électrique Hydro-Québec (2013) - LaCommare and Eto (2006) 34

Tableau 2.7 : Taux horaire selon le type de camion (Gourvil & Joubert, 2004).....38

Tableau 5.1 : Coûts directs du bris de conduite de gaz facturés par Gaz Métro 64

Tableau 5.2 : Données significatives et coûts allouables au SIM 66

Tableau 5.3 : Chiffres et coûts liés à l'intervention des services du SPVM 67

Tableau 5.4 : Récapitulatif des clients impactés par la coupure d'électricité due au déclenchement d'artère 70

Tableau 5.5 : Estimation du coût total d'un bris de conduite de gaz dans une artère résidentielle 73

Tableau 5.6 : Estimation des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication 77

Tableau 5.7 : composition du trafic sur la rue Jean Talon 80

Tableau 5.8 : Congestion hebdomadaire sur la rue Jean Talon.....80

Tableau 5.9 : Coûts des détours dus au bris de la rue Jean Talon.....81

Tableau 5.10 : Récapitulatif des coûts horaires des automobilistes dus au bris.....81

Tableau 5.11 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (détours) 83

Tableau 5.12 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (congestion).....83

Tableau 5.13 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (totaux) 83

Tableau 5.14 : Montants des divers coûts indirects liés au bris 87

Tableau 5.15 : Rappel des divers coûts liés au bris.....91

Tableau 5.16 : Historique des bris du croisement rue d'Auvergne - rue des Flandres.....92

Tableau 5.17 : Coûts directs de remise en état des infrastructures touchées.....94

Tableau 5.18 : Coûts reliés au trafic automobile.....97

Tableau 5.19 : Ensemble des coûts imputables au bris de la canalisation au croisement des rues d'Auvergne et des Flandres.....98

Tableau 5.20 : Récapitulatif des coûts indirects relevés au cours des 3 études de cas.....102

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Indicateurs d'impacts et de coûts sociaux (Gilchrist & Allouche, 2005).....6

Figure 1.2 : Répartition des coûts sociaux pour Rahman et al. (2005) 7

Figure 2.1 : Coûts d'utilisation des véhicules en fonction de la vitesse en situation de congestion, hors coût du carburant, CA$1998 (Gourvil & Joubert, 2004) 19

Figure 2.2 : Facteur de réduction de la productivité en fonction du bruit (Gilchrist & Allouche, 2005).....26

Figure 2.3 : Taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec (d'après Gourvil and Joubert (2004)).....37

Figure 2.4 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion en fonction du temps.....40

Figure 2.5: Évolution du profil du nombre de véhicules perturbés (congestion et contournement) 41

Figure 2.6: Profil de la consommation moyenne d'un véhicule en fonction de la vitesse et du rapport de vitesse.....44

Figure 4.1: Méthodologie générale adoptée lors des études de cas 54

Figure 5.1 : Aperçu du 3459 Avenue Coloniale (source : Google Maps).....56

Figure 5.2 : Pelle mécanique responsable du bris (source Gaz Métro).....57

Figure 5.3 : Conduite de gaz touchée (source Gaz Métro).....58

Figure 5.4 : Table du poste de commandement des services de la SIM (source personnelle).....59

Figure 5.5 : Disposition type des équipes d'intervention lors d'un bris de gaz 62

Figure 5.6 : véhicule d'intervention de Gaz Métro (source personnelle) 63

Figure 5.7 : Coûts directs associés au bris survenu au 3459 Avenue Coloniale (GazMétro, 2012) 64

Figure 5.8 : Comparaison des coûts directs avec les coûts indirects liés aux services de première urgence 68

Figure 5.9 : Répartition des coûts directs et des coûts indirects liés au bris d'une canalisation de gaz dans une artère résidentielle....73

Figure 5.10 : Croisement Rue Jean-Talon-Ouest – Côte-des-Neiges (Montréal) (source : Google Maps)....75

Figure 5.11 : répartition des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication 78

Figure 5.12 : Comparaison des coûts dus à la perte de temps pour les automobilistes....82

Figure 5.13 : Évolution quotidienne des coûts de surconsommation....84

Figure 5.14 : Coûts de détours quotidiens de sur-utilisation des véhicules 85

Figure 5.15 : L'équipe d'intervention de Bell sur la rue Jean Talon (source personnelle)....86

Figure 5.16 : Répartition des coûts indirects liés au bris 87

Figure 5.17 : Engagement d'un véhicule ambulancier à contre sens lors des travaux de remise en état sur la rue Jean Talon (source personnelle) 89

Figure 5.18 : Répartition des coûts directs et indirects du bris survenu sur la rue Jean Talon 90

Figure 5.19 : Localisation du bris (croisement rue d'Auvergne - rue des Flandres) (source : Google Maps) 92

Figure 5.20 : Carrefour où les bris ont eu lieu (source : Google Maps)....93

Figure 5.21 : Répartition des coûts de remise en état des infrastructures touchées 94

Figure 5.22 : Répartition de l'ensemble des coûts imputables au bris de canalisation....99

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

dBA	Décibel audible
CD	Coût direct
CIRANO	Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations
CI	Coût indirect
SIM	Service de sécurité Incendie de Montréal
SPVM	Service de Police de la Ville de Montréal

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – VALEURS NUMÉRIQUES ESTIMÉES DU TAUX HORAIRE EN FONCTION DU SALAIRE ANNUEL AU QUÉBEC 109

ANNEXE B – DURÉE ESTIMÉE DU TEMPS DE PARCOURS SUPPLÉMENTAIRE DÛ À LA CONGESTION, FONCTION DU TEMPS 110

ANNEXE C – ÉVOLUTION ESTIMÉE DU NOMBRE DE VÉHICULES PERTURBÉS, FONCTION DU TEMPS 112

ANNEXE D – ÉVOLUTION ESTIMÉE D'UN FACTEUR DE DÉPRÉCIATION SONORE.. 114

ANNEXE E – ÉVOLUTION MENSUELLE DES FUITES DE GAZ MAJEURS (TYPE 10-09) DANS LA RÉGION DE MONTRÉAL 115

INTRODUCTION

En 2012 au Québec, environ 5 cas de bris d'infrastructures souterraines ont été recensés en moyenne par jour. À la vue de cette statistique, Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines a entrepris d'évaluer les coûts que représentaient ces bris. Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines est la seule organisation dont l'activité est entièrement dédiée à la promotion de la prévention des dommages sur les infrastructures souterraines pour la province du Québec. Sa mission principale est de participer au développement des bonnes pratiques d'excavation en ce qui concerne la prévention des dommages sur les infrastructures souterraines. Les objectifs principaux sont d'assurer la sécurité générale pour les travailleurs et pour les citoyens et de maintenir les services en place. Elle regroupe à ce jour un grand nombre de membres. La plupart des membres sont des propriétaires d'infrastructures souterraines sur le territoire québécois. Son rôle est central en ce qui concerne la protection des réseaux souterrains au Québec.

Avec les bris d'infrastructures souterraines s'accompagne inexorablement un certain nombre de coûts. Lorsqu'on évoque ces coûts, on omet très souvent une grande partie de ceux-ci. En plus du coût du matériel utilisé, du coût de la main-d'œuvre, de celui de la gestion du projet et du coût des matériaux de remplacement, nécessaires à la remise en état des infrastructures touchées, de nombreux autres coûts vont venir s'ajouter. On retrouve notamment les coûts dus à la perte de produit de l'infrastructure touchée, le coût des interventions des services d'urgence, le coût d'interruption de service de l'infrastructure endommagée et de certaines infrastructures parallèles, les coûts dus à la perturbation des sols et des infrastructures environnantes et les coûts dus à la perturbation du réseau routier (congestion, perte de temps, détours, surconsommation, etc.). À cela s'ajoutent les coûts liés aux impacts environnementaux (bruit, vibrations, pollutions en tous genres) et les coûts liés aux impacts économiques (perte du chiffre d'affaires, absentéisme et retard au travail, etc.). Tous ces coûts sont ainsi à l'origine d'une baisse remarquée de la qualité de vie des citoyens. Dans la plupart des cas, ces coûts additionnels sont supportés par la société. Nous verrons ainsi à combien les coûts de reconstruction s'élèvent par rapport aux autres coûts additionnels et également par rapport aux coûts totaux, fonction du type d'infrastructure touchée et de la taille de cette dernière.

Afin de calculer l'ensemble de ces coûts, c'est-à-dire les coûts totaux, notre étude s'est principalement basée sur des rapports et des études qui évaluent les coûts de mise en place d'infrastructure souterraine. L'étude a nécessité différentes expertises liées à plusieurs domaines (économique, civil, environnemental). L'aspect accidentel a été primordial et a été central tout au long de l'étude. Après avoir effectué une revue de littérature, nous avons développé une méthodologie propre aux particularités évoquées ainsi qu'une démarche à suivre lors de la réalisation de nos différentes études de cas.

C'est donc avec la participation d'Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines, mais également de divers propriétaires d'infrastructures souterraines que l'étude suivante a été menée. Ces collaborations ont permis de rendre possible l'estimation des coûts réels que représente un bris d'infrastructure souterraine au Québec. C'est avec le soutien de différents services internes des villes de Montréal et de Gatineau, mais également la collaboration d'entreprises telles qu'Hydro-Québec, Gaz Métro ou encore Bell que le travail a été réalisé. Ces collaborateurs, en plus de proposer des études de cas concrets permettant d'illustrer notre étude, ont proposé leur aide en ce qui concerne la collecte de diverses données.

Un dernier point est à signaler dès le début de cette étude. Au-delà des coûts monétaires liés aux bris d'infrastructures souterraines, il est également important de noter qu'au Québec, aucune victime due à un bris n'est encore à déplorer. Aux États-Unis et en Europe, plusieurs personnes décèdent chaque année à la suite de bris d'infrastructures souterraines. Cela ne fait que renforcer l'importance d'une telle étude. Ce texte vise à sensibiliser les lecteurs sur la dangerosité de ces bris d'infrastructures souterraines tout en exposant les coûts que ces bris représentent.

Problématique

La problématique principale est donc la suivante : quels sont les coûts totaux réels liés à un bris d'infrastructure souterraine au Québec ?

Il a été nécessaire de répondre à des objectifs plus spécifiques.

1. Faire un état de la littérature en ce qui concerne les coûts liés aux bris d'infrastructures souterraines au Québec.
2. Mettre à jour et développer une méthodologie ainsi que des modèles qui nous permettront de calculer ces coûts.

3. Identifier des cas de bris d'infrastructures souterraines qui illustreront les modèles développés précédemment.

4. Analyser les résultats obtenus afin de rendre compte de l'ampleur des coûts réels.

Plan général

Afin de parvenir aux objectifs fixés, nous avons dû définir une démarche particulière. Celle-ci se structure au travers des parties suivantes.

La première partie vise à définir les différents coûts qui seront abordés dans l'étude. Nous verrons ainsi ce qui différencie les coûts directs des coûts indirects.

La deuxième partie est une revue de la littérature existante en ce qui concerne les coûts liés à des bris d'infrastructure souterraine. Cette partie rassemble un certain nombre d'idées et de modèles issus de domaines divers.

Suite à la revue de littérature servant de support au rapport, une troisième partie axée sur la méthodologie adoptée pour le calcul des coûts sera exposée. Dans cette section, certains modèles existants seront repris ou modifiés, d'autres seront proposés.

Dans la quatrième partie, nous exposerons la démarche suivie dans la recherche et le choix des études de cas servant d'illustration à l'étude.

La cinquième et dernière partie présente l'ensemble des résultats des 3 études de cas menées en collaboration avec nos partenaires. Cela permettra d'évaluer l'importance que représentent les coûts indirects liés à un bris d'infrastructure souterraine, notamment au Québec.

CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE : DÉFINITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COÛTS RELIÉS À UN BRIS D'INFRASTRUCTURE SOUTERRAINE

1.1 Les bris d'infrastructures souterraines au Québec

En 2012 au Québec, plus de 5 bris d'infrastructure souterraine ont été recensés par jour. Cette statistique tirée de la base ORDI d'Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines nous renseigne quant à l'importance du nombre de ces bris. Les infrastructures touchées sont très diverses. Il s'agit principalement des infrastructures suivantes :

- infrastructures de télécommunication (câbles)
- conduites de gaz
- infrastructures électriques (câbles)
- conduites d'eau potable.

Ces bris s'accompagnent de divers coûts, pouvant rapidement selon le type d'infrastructure touchée, devenir très importants. Dans un premier temps, il est important de distinguer et de définir les différentes catégories de coûts existants en ce qui concerne les bris d'infrastructures souterraines. En effet, lors d'un bris d'infrastructure souterraine, les coûts qui peuvent être liés à l'évènement sont nombreux. Avant d'effectuer une revue de littérature détaillée, il est nécessaire d'apporter certaines définitions aux termes qui seront utilisés dans la suite de l'étude. Une fois ces premières bases établies, nous aborderons de manière plus spécifique l'ensemble des coûts reliés aux bris d'infrastructures souterraines.

Lorsque l'on regarde la littérature des quinze dernières années en ce qui concerne les coûts reliés aux bris ou aux remplacements des infrastructures souterraines, on remarque que de nombreuses définitions ont été proposées. Bien souvent, une grande partie des coûts était recensée dans l'ensemble des études, mais ces derniers étaient abordés de façon différente. Nous proposons de faire un résumé de ces différentes approches.

1.2 Les coûts directs

Lors de tous projets de construction ou de remise en état d'infrastructures, les coûts directs correspondent aux coûts liés à la conception, au développement ou encore à l'implantation sur les lieux (Ormsby, 2009). Les coûts directs correspondent aux coûts nécessaires à la remise en état des infrastructures touchées telles qu'elles étaient avant l'incident (Rahman, Vanier, & Newton, 2005). Ainsi, en ce qui concerne les bris d'infrastructures souterraines, les coûts directs sont les suivants :

- Les coûts des matériaux de remplacement utilisés
- Les coûts du matériel utilisé
- Les coûts de la main-d'œuvre
- Les coûts administratifs nécessaires à la remise en état des infrastructures endommagées

1.3 Les coûts indirects

Depuis la fin des années 90, de nombreuses études ont été menées dans le but de définir les coûts qu'engendre un bris, mais ne pouvant pas être considérés comme des coûts directs.

Les études se sont d'abord accordées pour qualifier les coûts qui ne peuvent être facturés comme des coûts sociaux ou indirects (Allouche, Ariaratnam, & AbouRizk, 2000), c'est-à-dire des coûts supportés par l'ensemble de la société. L'ensemble des autres coûts correspondait aux coûts supportés par les propriétaires d'infrastructures souterraines (Jones, 1999). Gilchrist and Allouche (2005) ont par la suite mis au point une première matrice plus précise. Celle-ci répartit les divers coûts sociaux selon 4 grandes catégories : le trafic, l'activité économique, les pollutions et le pôle écologie/social/santé (Figure 1.1).

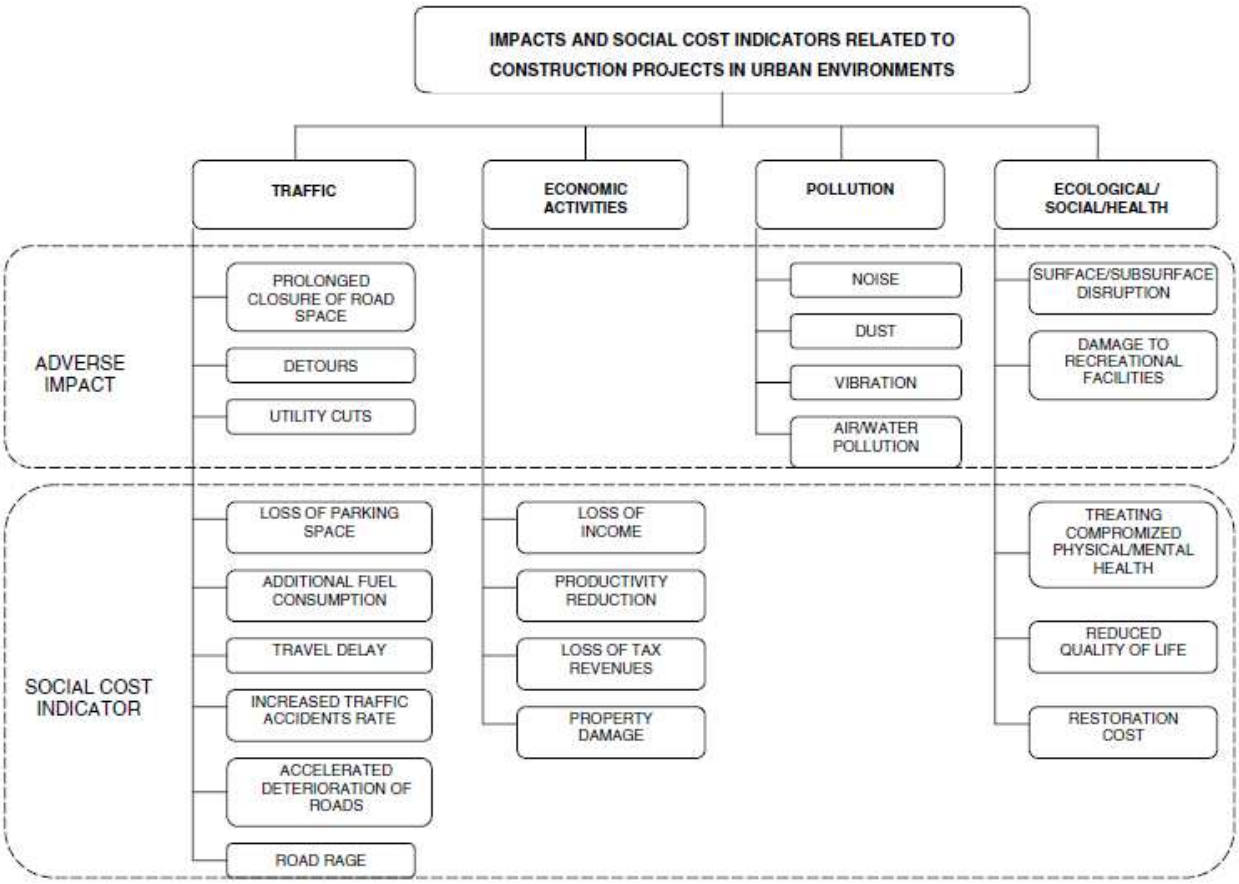
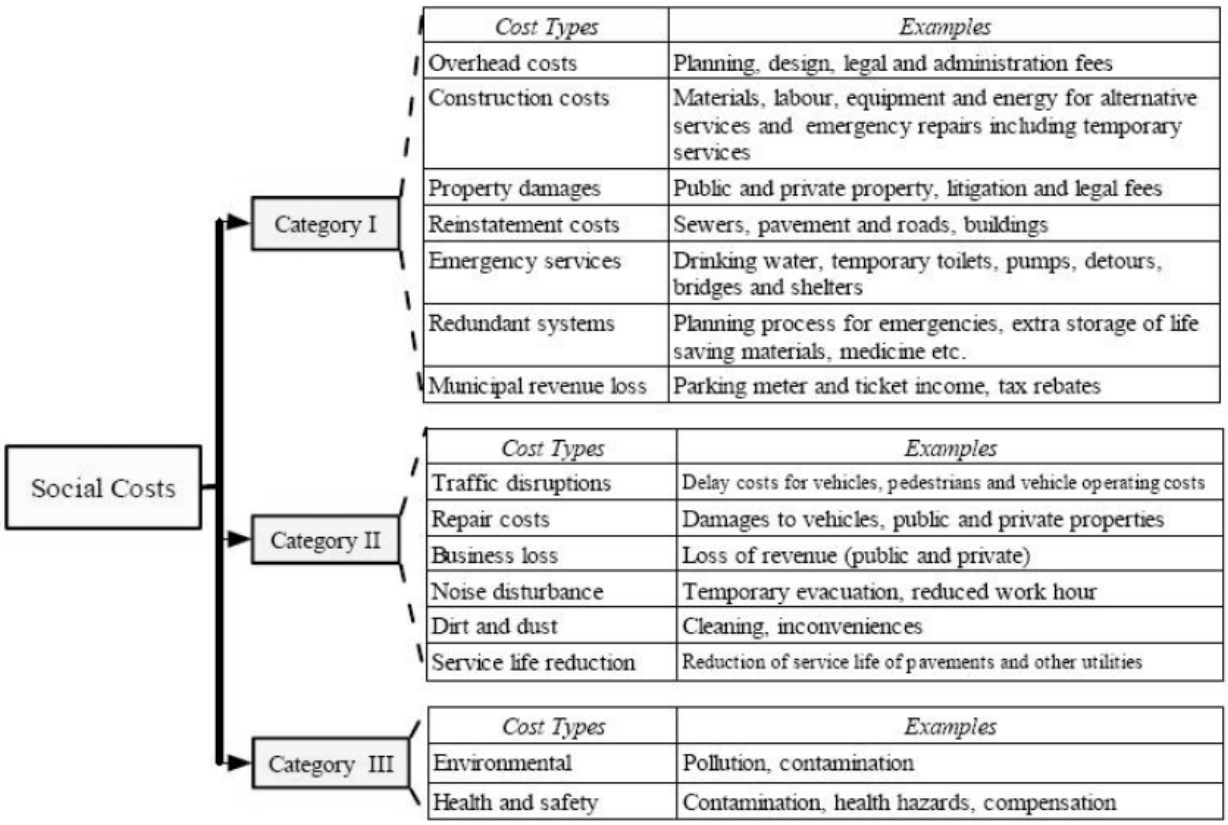


Figure 5.1 : Indicateurs d'impacts et de coûts sociaux (Gilchrist & Allouche, 2005)

D'autres études ont également été menées dans le but d'identifier les coûts sociaux (coûts non directs) et dans le but de les séparer des coûts de remise en état des infrastructures touchées (ou coûts directs). Tout comme Manuilova, Dormuth, and Vanier (2009), Rahman, Vanier, and Newton (2005) avaient séparé les coûts liés à la remise en état d'infrastructures endommagées non pas en 2, mais en 3 grandes catégories : les coûts directs, les coûts dits indirects et enfin les derniers coûts considérés comme immatériels. Ces coûts, respectivement appelés catégorie 1, 2 et 3 dans la Figure 1.2 constituaient l'ensemble des coûts appelés sociaux. Cette définition se rapproche d'une vision plus économique, mais celle-ci porte à confusion avec les définitions passées. Les coûts sociaux de Rahman et al. (2005) correspondent ainsi aux coûts totaux de Allouche et al. (2000).



Cost Types	*Examples*
Overhead costs	Planning, design, legal and administration fees
Construction costs	Materials, labour, equipment and energy for alternative services and emergency repairs including temporary services
Property damages	Public and private property, litigation and legal fees
Reinstatement costs	Sewers, pavement and roads, buildings
Emergency services	Drinking water, temporary toilets, pumps, detours, bridges and shelters
Redundant systems	Planning process for emergencies, extra storage of life saving materials, medicine etc.
Municipal revenue loss	Parking meter and ticket income, tax rebates

Cost Types	*Examples*
Traffic disruptions	Delay costs for vehicles, pedestrians and vehicle operating costs
Repair costs	Damages to vehicles, public and private properties
Business loss	Loss of revenue (public and private)
Noise disturbance	Temporary evacuation, reduced work hour
Dirt and dust	Cleaning, inconveniences
Service life reduction	Reduction of service life of pavements and other utilities

Cost Types	*Examples*
Environmental	Pollution, contamination
Health and safety	Contamination, health hazards, compensation

Figure 1.2 : Répartition des coûts sociaux pour Rahman et al. (2005)

Nous remarquons ainsi qu'il est très difficile de donner une définition précise en ce qui concerne les coûts non directs. Ceux-ci ont été appelés coûts indirects, sociaux, immatériels ou encore externes. C'est la raison pour laquelle nous aborderons l'analyse en prenant en compte les coûts directs ou de reconstruction dans un premier temps, puis en observant les autres coûts, que nous allons qualifier d'indirects. L'ensemble de ces coûts représente ainsi les coûts totaux attribuables à un bris d'infrastructure souterraine :

Coûts totaux liés à un bris d'infrastructure souterraine

$$= \text{Coûts directs (liés à la reconstruction)} + \text{Coûts indirects (autres coûts)}$$

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Nous allons effectuer une revue de la littérature et nous allons constater que plusieurs typologies existent. Cependant, dans le but de conserver une certaine continuité, nous allons nous baser sur l'attribution précédente des termes de coûts directs et de coûts indirects.

2.1 Les coûts directs, nécessaires à la remise en état des infrastructures souterraines touchées

Dans cette partie, nous allons donc nous pencher sur les coûts reliés directement à la remise en état des infrastructures souterraines touchées. Ceux-ci sont généralement les coûts considérés comme « classiques » lors de la remise en état d'infrastructures.

2.1.1 Coûts des matériaux de remplacement

Les premiers coûts auxquels il est possible de penser lorsque nous parlons de bris d'infrastructures souterraines sont ceux reliés aux matériaux nécessaires pour le remplacement et la remise en état des infrastructures touchées. Qu'il s'agisse d'un réseau d'aqueduc, d'une conduite d'égout, de gaz, d'un pipeline ou encore de câble de télécommunication, la rupture partielle ou totale nécessite une remise en état complète afin de permettre le retour du service initial.

Ces coûts peuvent donc être variés, allant des coûts de remplacement d'une canalisation en fonte, en passant par les coûts de conduites de gaz répondant à des normes de sécurité très particulières, ou encore aux coûts de câbles de fibre optique extrêmement coûteux, en raison de la concentration technologique qu'ils représentent (Khogali & Mohamed, 1999). Les coûts liés au remplacement des infrastructures souterraines peuvent donc être très élevés.

2.1.2 Coûts du matériel utilisé pour la remise en état des infrastructures

La remise en état de ces infrastructures nécessite l'utilisation de matériel plus ou moins spécialisé, et ainsi pouvant devenir coûteux (Rylska et al., 2006). Cela peut être dû à deux facteurs différents. Le premier est la valeur propre des équipements utilisés lors des travaux de réfection. Notamment pour les conduites de gaz, les pipelines ou les câbles de télécommunication, le matériel utilisé étant très onéreux, le coût horaire lié à l'amortissement de

ce dernier s'en trouve également élevé. Le second facteur déterminant, celui-ci d'avantage lié aux infrastructures de type aqueduc, est relatif à la taille des infrastructures touchées. En effet, la taille de ces dernières pouvant atteindre des dimensions très importantes, les équipements doivent d'être dimensionnés en proportion afin de permettre une remise en état correcte et efficiente.

2.1.3 **Coûts de la main-d'œuvre**

Les coûts attribués à la main-d'œuvre sont également importants. En plus de la prise en compte du temps de réparation et donc du nombre d'employés nécessaire à la remise en état des infrastructures souterraines touchées, il est important de prendre en compte l'aspect qualification de la main d'œuvre. Certaines personnes qui interviennent sur les lieux en cas de sinistre sont des personnes pouvant être qualifiées et ayant parfois dû suivre des formations spécialisées (technicien télécom (Bell, 2013)). Ces particularités ont un impact sur le coût horaire, alors plus élevé, faisant ainsi augmenter la facture totale des coûts directs. A cela, il faut également prendre de compte les conditions de réparation des infrastructures endommagées (Rahman et al., 2005). L'aspect urgence devient alors important. Il peut arriver que les heures de travail des employés présents sur les lieux du sinistre soient considérées comme des heures supplémentaires, augmentant une fois de plus les coûts de remise en état des infrastructures touchées.

2.1.4 **Coûts administratifs et coûts de gestion de projet nécessaires**

Il s'agit des coûts liés à la gestion du projet et des frais de suivi du dossier. Toute réparation, qui plus est en situation d'urgence, nécessite la mise en place d'un plan d'urgence par des équipes de gestion de projet. Ce plan a pour but d'assurer le bon déroulement des opérations malgré les conditions particulières (Khogali & Mohamed, 1999). Ces plans nécessitent la mise à disposition de ressources qualifiées (ingénieurs, gestionnaires de projets, etc.). À cela, il est important d'ajouter les frais relatifs au suivi des dossiers. Pour la plupart des propriétaires d'infrastructures, cela implique la création d'un service spécialisé.

Les coûts directs liés à la reconstruction de l'infrastructure souterraine, précédemment énoncés, sont facilement repérables, car ils correspondent pour la plupart aux coûts qui apparaissent communément sur les bordereaux (Modieli Amadou et al., 2010), hormis les coûts administratifs. Cela n'est en revanche pas le cas pour l'ensemble des coûts indirects.

2.2 Les coûts indirects applicables aux bris d'infrastructures souterraines

Cependant, les coûts cités précédemment ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. En effet, lors d'un bris d'infrastructure souterraine, de nombreux autres coûts peuvent être imputés à l'évènement. Et l'aspect de situation d'urgence ne fait qu'augmenter l'importance que représentent ces derniers.

2.2.1 Coûts des pertes de produits dues au bris

Le premier coût indirect pouvant être imputé à un bris d'infrastructure souterraine est celui relié à la perte de produit présent dans l'infrastructure (Rylska et al., 2006). Ce coût dépend fortement du type de l'infrastructure touchée. Si cela ne peut s'appliquer à des infrastructures de télécommunication ou électriques, il n'en est pas de même en ce qui concerne les infrastructures contenant du gaz (GazMétro, 2013) ou des hydrocarbures. Les exploitants d'infrastructures, également souvent propriétaires, n'hésitent pas à facturer ces pertes de produit. Pour d'autres infrastructures en revanche, les produits perdus ne sont pas, parfois parce qu'ils ne peuvent pas l'être, facturés. C'est notamment le cas de l'eau potable. Même si au Québec en général, l'eau potable n'est pas payante[1], celle-ci n'est pour autant pas sans coût. Avant sa distribution, cette eau a dû être traitée dans des usines spécialisées. Or, cela représente un coût réel pour la société. Et même si celui-ci semble très faible et particulièrement difficile à chiffrer (entre 0,22 et 0,55 dollar par mètre cube) il n'en reste pas moins qu'une fuite représente un coût réel pour la province du Québec (Gouvernement du Québec, 2013).

2.2.2 Interruption de service de l'infrastructure souterraine touchée et des diverses infrastructures parallèles

Lorsqu'un bris d'infrastructure souterraine survient, cela s'en suit toujours d'une interruption de service, quel que soit le type de l'infrastructure touchée. Il est important d'ajouter que le service

[1] Sauf pour certains très gros consommateurs (grosses industries) et dans certaines municipalités où des compteurs d'eau sont installés chez les citoyens.

de certaines infrastructures parallèles peut se retrouver également perturbé. Ces perturbations de service représentent un coût pour la société. Il existe plusieurs grandes méthodes servant à calculer ces coûts d'interruption de service de très grande envergure, notamment électrique (Cromwell & Pearson, 2002). La première consiste en une approche agrégée des données. Celle-ci se base sur une étude statistique macroéconomique des données. En prenant en compte le PIB par kilowatt/heure consommé, le salaire moyen, la moyenne du prix de l'électricité par kilowatt ou encore d'autres paramètres, cela permet d'établir une estimation pour un bris de très grande ampleur (ville ou pays de mêmes caractéristiques). La seconde vise à observer le comportement des clients. Plusieurs méthodes ont vu progressivement le jour, l'idée générale étant l'analyse du comportement sur la consommation et la bonne volonté du consommateur à accepter le désagrément. Enfin, la dernière approche vise à réaliser une étude de marché.

Cependant, pour les études qui seront exposées par la suite, il semblerait qu'une étude prenant en compte le coût horaire moyen par type d'infrastructure touchée soit préférable. Ainsi, en se basant sur les études de LaCommare and Eto (2006), il est possible d'estimer le coût que représente une interruption de service électrique selon le type de client touché :

Tableau 2.1 : Coût horaire d'une coupure de service électrique (LaCommare & Eto, 2006)

Type de client	Coûts horaires moyens (US$ 2002)
Résidentiel	2,70 $/h
Commence	886,00 $/h
Industrie	3253,00 $/h

D'autres études (RTE, 2012) confirment qu'il est possible d'attribuer un coût pour une interruption de service électrique. Cela est également le cas pour des interruptions liées à d'autres services, telles que l'eau, le gaz ou encore les services de télécommunication (Modieli Amadou et al., 2010).

2.2.3 Coûts associés aux diverses interventions d'urgences

L'aspect accidentel peut être à l'origine d'une intervention de la part des services d'urgences, spécialisés et par conséquent coûteux. Il parait donc important de regarder point par point les différents coûts associables à ce type de services (Rylska et al., 2006).

2.2.3.1 Intervention des services publics de sécurité

Un coût supplémentaire à prendre en compte est celui des services publics mis à disposition lors d'un bris. Ces services publics peuvent être mobilisés lorsque la vie des citoyens est mise en danger, quelle qu'en soit la cause (Service de sécurité incendie de Montréal, 2012). Ainsi, pour tout ce qui concerne les bris d'infrastructures gazières, de pipeline, ou de canalisation provoquant de fortes inondations, certaines interventions types sont préétablies (selon différents degrés de danger). Il existe à ce titre des manuels qui préconisent pour chaque situation (milieu urbain, proche d'habitation, présence de substances dangereuses) un service minimum requis.

De plus, lors d'une intervention des services de pompiers, il est pratiquement indispensable de dépêcher sur les lieux d'autres services de sécurité (Service de Police de la Ville de Montréal, 2013). L'un des premiers à être sur les lieux est le service de police. Il s'avère que dès les premières minutes du bris, un service minimum d'unités de police est réquisitionné sur place afin de sécuriser les lieux et de réguler les flux de circulation environnants. Il s'avère même que pour un nombre important de cas, des unités de police supplémentaires sont nécessaires afin d'assurer une sécurité plus élargie.

Dans tous les cas, que cela soit pour le service incendie, le service de police ou pour les services hospitaliers (intervention des véhicules ambulanciers), les coûts reliés à l'utilisation de ces ressources sont importants. Cela peut par exemple atteindre plus de 700 $ par heure pour l'intervention de certains véhicules spécialisés (Service de sécurité incendie de Montréal, 2012).

2.2.3.2 Mise en place d'infrastructures de substitution

Suite à l'interruption de service liée à un bris d'infrastructure souterraine, la mise en place d'un service de substitution peut être nécessaire. Cela est notamment le cas pour les coupures de longue durée et pour les services dont on ne peut pas se passer. Car si pour certains services tels que l'eau potable, une substitution est possible au cas par cas pour les utilisateurs victimes du bris

(achat de bouteilles d'eau), cela est impossible pour d'autres services comme l'électricité ou le gaz (Modieli Amadou et al., 2010). Ainsi, pour ces bris particuliers, la mise en place d'infrastructures parallèles de substitution va venir augmenter le coût général lié au projet.

2.2.4 Perturbation des sols et réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes

Lors d'un bris d'infrastructure souterraine, il se peut que certaines perturbations aient un impact sur les infrastructures adjacentes. De nombreuses études font référence à la réduction de la durée de service de la chaussée, cela suite aux travaux de Khogali and Mohamed (1999). Cependant, il est important d'ajouter que ces perturbations peuvent avoir lieu sur d'autres types d'infrastructures (Rahman et al., 2005), qu'elles soient personnelles, professionnelles ou publiques.

Un bris d'infrastructure souterraine oblige son propriétaire ou son exploitant à remettre en état ses infrastructures, mais oblige également parfois les propriétaires d'infrastructures adjacentes ainsi que les municipalités à remettre en état leurs infrastructures endommagées elles aussi. Pour cela, il existe plusieurs techniques possibles, soit en réalisant des coupes « traditionnelles » dans la chaussée, soit en ayant recours à des « tranchées », ce qui permet de ne pas trop perturber l'activité environnante (Modieli Amadou et al., 2010). Cependant, ces 2 techniques ont des effets pratiquement semblables au niveau des infrastructures adjacentes. Elles provoquent dans un nombre de cas assez important l'affaissement voir la chute des parois latérales, ou moins la fragilisation du sol. Cela augmente le risque d'effondrement de la zone considérée et ainsi la déstabilisation des réseaux adjacents. Intuitivement, on remarque que plus l'infrastructure est proche de la zone du sinistre, plus elle risque d'être touchée. Ce phénomène est par ailleurs accentué par la présence des machineries. Bien que ces dernières soient nécessaires pour la remise en état des infrastructures touchées, elles modifient les contraintes mécaniques et accélèrent les éboulements et la diminution de la durée de vie des infrastructures du secteur.

Il est également important de noter que la réparation de ces infrastructures souterraines induit fortement sur la perte de valeur des infrastructures, notamment routières. Force est de constater que les pratiques d'excavation ne sont pas sans certains risques pour la chaussée. En effet, de nombreuses études conduites dans des villes américaines, dont New York et Cincinnati

démontrent un effet négatif sur la performance de la chaussée dont l'amplitude dépend du climat, de la densité du trafic, de la méthode et des conditions de remblai (Shahin & Crovetti, 1987). Par conséquent, les dommages provoqués par ces travaux réduisent la durée de vie de la chaussée et augmentent la fréquence des programmes de maintenance engendrant ainsi la prise en charge de nouveaux coûts.

2.2.5 Prolongement de la fermeture ou de la perturbation d'une section de route et impacts sur les déplacements et le trafic

Nombreux sont les bris qui ont un impact sur le trafic routier. Qu'il s'agisse d'une fermeture partielle ou totale de la section de route, ces dernières donnent lieu à de nombreux coûts (Gourvil & Joubert, 2004). Dans les paragraphes suivants, nous allons énoncer l'ensemble des coûts applicables à un bris d'infrastructure souterraine.

2.2.5.1 Difficultés d'accès pour les véhicules d'urgence

Dans leur étude, Modieli Amadou et al. (2010) mentionnent un point important relié à l'encombrement du réseau routier lors de congestion même si cela ne peut être chiffré de façon monétaire. En effet, la congestion du trafic est un facteur de ralentissement pour les véhicules d'intervention d'urgence (pompiers, ambulances, services de police …). Cet aspect impacte ainsi la qualité des services de secours et peut le cas échéant devenir déterminant, selon la situation considérée (Rylska et al., 2006).

2.2.5.2 Perte d'espaces de stationnement

Lors de la remise en état d'infrastructures souterraines localisées à proximité d'une voie urbaine, il peut être important de prendre en compte l'aspect réduction de l'espace disponible sur la chaussée. Cela se répercute donc sur les voies de circulation, mais également sur les espaces dédiés au stationnement de véhicules (Boyce & Bried, 1994). Ainsi, cette perte d'espace représente un manque à gagner certain pour les municipalités et peut être chiffrée comme un coût indirect.

Les coûts sont visibles à plusieurs niveaux. Le premier correspond à la perte de revenus liée à l'impossibilité de stationner sur les lieux. Cette perte d'espace impacte immédiatement le taux

d'occupation total et donc les gains liés au stationnement des véhicules. Il est possible de calculer ce coût à partir du modèle de Pucker, Allouche, and Sterling (2006) suivant :

$$\begin{aligned}\text{Coût de la perte d'espaces de stationnement} \\ &= \text{Nombre de places de stationnement non accessibles} \\ &\times \text{Taux du parcomètre (\$/h)} \\ &\times \text{Nombre d'heures opérationnelles par jour (h/jour)} \\ &\times \text{Taux d'occupation de l'espace concerné (\%)} \\ &\times \text{Durée de l'intervention (jour)}\end{aligned}$$

De plus, toute zone de stationnement ouverte au public, que celle-ci soit payante ou non, est régie par une règlementation locale. Cependant, il arrive souvent que cette dernière soit enfreinte laissant place à la distribution de sanctions, telles que des amendes de stationnement (McKim, 1997). Ces amendes représentent également une source de revenus pour les municipalités, et la perte d'espace de stationnement signifie donc une perte directe de revenus, assimilable à un coût. Tout comme pour le premier coût lié à la perte d'espace de stationnement, Pucker et al. (2006) ont mis en place un modèle :

$$\begin{aligned}\text{Coût des pertes dues à l'absence d'amendes de stationnement} \\ &= \text{Coût moyen d'une amende (\$)} \times \text{fréquence des amendes (nombre/h)} \\ &\times \text{Nombre d'heures opérationnelles par jour (h/jour)} \\ &\times \text{Durée de l'intervention (jour)} \\ &\times \frac{\text{espaces de stationnement interdit perdus (m}^2\text{)}}{\text{espaces de stationnement interdit totaux (m}^2\text{)}}\end{aligned}$$

Afin d'illustrer les modèles précédemment énoncés, nous proposons l'exemple d'une remise en état d'infrastructure souterraine durant une période de 10 jours. Estimons une zone supprimant, en raison de la fermeture d'une des 2 voies, un nombre de 60 stationnements dont le taux horaire se chiffre à 2 $ par heure de 9 h à 18h étant occupé aux 2 tiers. On considère que le tiers de cette

zone correspond à une interdiction de stationnement. Avec une fréquence de 2 amendes par heure au coût de 52 $ par amende (Service de Police de la Ville de Montréal, 2013), le coût total de la perte de revenu est le suivant :

$$\text{Coût de la perte de stationnement}$$
$$= 60\ (\text{stationnements}) \times 2(\$/\text{h}) \times 9\ (\text{h}) \times 2/3\ (\%) \times 10(\text{j}) = 7200\ \$$$

$$\text{Coût des pertes dues aux amendes de stationnement}$$
$$= 52\ (\$) \times 2\ (\text{billets/h}) \times 10\ (\text{j}) \times 9\ (\text{h/jour})$$
$$\times\ 0{,}5(\%\ \text{des espaces de stationnement interdit perdus}) = 4680\ \$$$

$$\text{Coût total} = 7200\ \$ + 4680\ \$ = 11880\ \$$$

On remarque ainsi que pour un bris qui nécessite une remise en état de la chaussée d'une dizaine de jours, la somme totale perdue atteint plus d'une dizaine de milliers de dollars.

2.2.5.3 **Perte de temps et augmentation de la distance à parcourir pour les véhicules et les piétons**

Le point crucial lié à la perturbation du trafic routier lors d'une étude de bris d'infrastructures souterraines est celui de la congestion du trafic. De nombreuses études font ainsi l'état de ce problème. Il apparait plusieurs grandes méthodes permettant de calculer les coûts de congestion. La première analyse possible se situe au niveau du choix de l'itinéraire (Cromwell & Pearson, 2002). Cela consiste à opter pour un parcours de substitution plutôt que pour celui impacté par le bris. Mais cette solution nécessite une très bonne connaissance de l'état du trafic. Or bien souvent, lors d'un bris d'infrastructure, il n'est pas évidement voire impossible de connaitre en temps réel la situation. Cette option ne peut donc être applicable qu'au-delà de plusieurs jours et uniquement pour les automobilistes et piétons utilisant fréquemment cet itinéraire.

La deuxième façon d'appréhender le problème est d'adopter une analyse s'appuyant sur le choix de vitesse (Cromwell & Pearson, 2002). Le fait qu'un automobiliste tente de récupérer le temps perdu dans les congestions en adoptant une conduite plus rapide est un postulat facilement envisageable et acceptable. Cependant, cela dépend de nombreux facteurs : la distance restante à

parcourir, le type de voies empruntées, les conditions météorologiques et surtout le comportement du conducteur[2].

La dernière analyse est celle utilisant le temps supplémentaire nécessaire pour parcourir la même distance. Très souvent utilisée ((Boyce & Bried, 1994; Rahman et al., 2005) entre autres), elle est la plupart du temps très proche de la réalité et nous permet de chiffrer correctement et facilement les coûts de congestion d'un bris d'infrastructure. En effet, dans la majorité des cas, les automobilistes ou les passagers de transports en commun ne sont pas au courant qu'un bris est survenu sur leur parcours. Cette méthode peut également s'appliquer à la perte de temps de piétons (Zhang, Boardman, Gillen, & Waters, 2004).

2.2.5.4 **Augmentation du risque d'accidents de la circulation**

Les changements de comportement au volant dus à la congestion peuvent être la cause d'accident de la circulation. Cela représente ainsi un coût, qu'il soit à la charge de la victime ou de la société (frais d'hospitalisation). Manuilova et al. (2009) établirent une estimation des coûts relatifs à différents types d'accident, ces derniers pouvant aller des quelques milliers de dollars à presque cent mille dollars.

---

[2] Cromwell and Pearson (2002) évoquent également l'option du choix du logement (en fonction du lieu de travail). Ici, il est impossible, dans le cas de bris accidentel d'appliquer cette approche. On comprendra aisément qu'en aucun cas, les automobilistes n'adopteront un tel comportement lorsqu'un bris d'infrastructure survient entre leur lieu de domicile et leur travail.

Une autre approche intéressante est celle reposant sur le choix du mode de transport. Cependant, en cas de congestion routière, seul le réseau de transport souterrain (métro) reste épargné par la congestion. Une autre partie de la population semble être épargnée en partie par la congestion à savoir les cyclistes. Cependant, cela ne représente qu'une très faible partie du transport et ne concerne que les déplacements de faible distance.

Tableau 2.2 : Coût moyen par type d'accident (Manuilova et al., 2009)

Accidents	Coût (CA$ 2006)
Dommage véhicule	3 500 $
Blessure	16 000 $
Décès	96 000 $

Il est important de noter que ces coûts ne prennent en compte que les aspects matériels et la mobilisation de ressources lors d'accident. Ces coûts ne prennent pas en compte l'aspect moral que représente un décès ou encore les coûts impliquant une perte partielle ou totale de mobilité suite à un accident.

2.2.5.5 **Augmentation des coûts de maintenance et de la consommation de carburant des véhicules**

La congestion est à l'origine d'une augmentation des coûts d'utilisation des véhicules ((Rahman et al., 2005). Cela prend en compte les véhicules ayant recours à des détours. En effet, la consommation et la maintenance des véhicules étant proportionnelles à la distance parcourue, l'augmentation de cette dernière entraine une inévitable augmentation des coûts liés aux 2 facteurs cités précédemment.

Ainsi, il est possible selon la vitesse et le type de véhicules d'établir un coût moyen d'entretien au kilomètre (Gourvil & Joubert, 2004). On remarque sur la figure suivante que les coûts d'utilisation sont plus importants pour les faibles vitesses (ce qui correspond à une situation de congestion). Ce phénomène est marqué pour les automobiles, mais il est surtout visible pour les véhicules lourds, comme les camions.

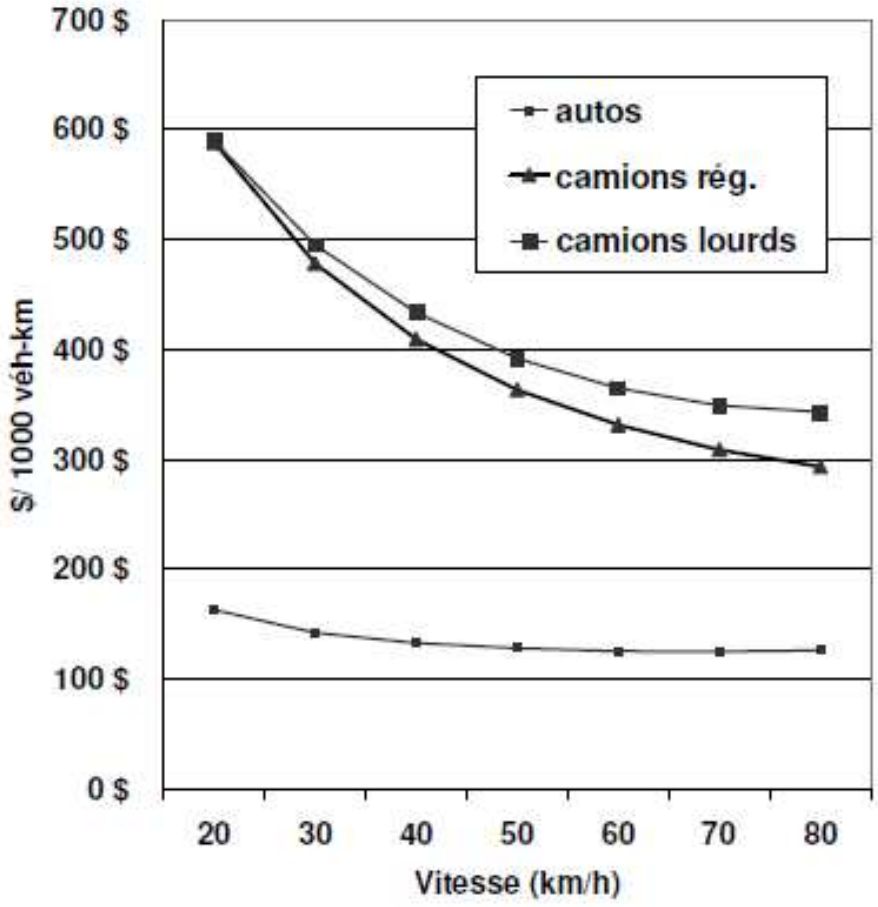


Figure 2.1 : Coûts d'utilisation des véhicules en fonction de la vitesse en situation de congestion, hors coût du carburant, CA$1998 (Gourvil & Joubert, 2004)

Il convient d'ajouter la consommation moyenne des différents types de véhicule, présents sur l'ensemble du trafic. Cette augmentation de la consommation représente une autre grande partie des coûts liés aux perturbations du réseau routier.

2.2.6 **Impacts environnementaux**

Au-delà des perturbations ayant un impact visible sur les citoyens, de nombreux autres impacts n'ont pas une répercussion sur la société à première vue. Pourtant, il s'avère que les perturbations au niveau environnemental sont importantes. Nous allons ainsi développer cela au travers des paragraphes suivants.

2.2.6.1 **Impacts de la pollution de l'air et des gaz nocifs**

Un des coûts indirects est celui lié à la pollution de l'air et à l'augmentation des gaz à effet de serre. Ces derniers sont le produit des activités liées aux opérations de construction, mais également à la surconsommation liée soit aux détours, soit à la congestion (Rahman et al., 2005). Nous séparerons cette pollution en deux parties. La première traitera de la pollution due aux différents gaz émis par le trafic, l'autre partie sera axée sur la pollution des particules de poussières.

2.2.6.1.1 Augmentation de l'émission de particules et de gaz nocifs

La surconsommation des véhicules en situation de congestion ou de détour provoque une augmentation de l'émission de particules et de gaz nocifs. Ces produits se différencient en plusieurs familles. Outre les émissions de dioxyde de carbone (CO2), on note également la présence d'autres substances toxiques telles que le méthane (CH4), les oxydes d'azote (NOx), les oxydes de soufre (SOx) et d'autres particules. On y retrouve entre autres des composés organiques dits volatils (COV), du monoxyde de carbone et des particules de matières (PM) de divers hydrocarbures (HC) (Gilchrist and Allouche (2005)). Cependant, dans le but d'harmoniser les différents coûts de ces substances, des grilles d'équivalence ont été mises au point. Il est possible de comparer les différents gaz ainsi que leurs effets. Les équivalences suivantes sont donc communément admises. Un gramme de méthane sera alors équivalent à 21 grammes de CO2 et un gramme de N2O sera quant à lui comparé à non moins de 310 g de CO2 (Gourvil & Joubert, 2004).

Il est donc possible de répertorier le coût de chaque matière. Ceux-ci se retrouvent dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : Coûts métriques des matières polluantes (Gourvil & Joubert, 2004)[3]

	CO2	CO	HC	NOx	SOx	PM
$CA 1998 par tonne métrique	29,97	1359	4945	6307	2687	3740

Ainsi, il devient possible de calculer le coût des émissions en prenant en compte les différents gaz et particules rejetés dans l'atmosphère.

2.2.6.1.2 Émission de particules poussiéreuses

Lors d'un bris d'infrastructure souterraine, la remise en état des équipements impliquant des travaux est à l'origine d'émission de poussières et de saletés en tous genres. Cela oblige les résidents, commerçants ou entrepreneurs locaux à faire soit appel à des sociétés de nettoyage, soit de nettoyer eux-mêmes les lieux. Ces coûts peuvent se calculer de différentes façons. Ceux-ci seront récapitulés sur une facture en cas de sollicitation de professionnel ou correspondront au temps passé à nettoyer pour un particulier (Ormsby, 2009)[4].

2.2.6.2 **Effets de la pollution des eaux et des sols**

Lors de certains bris de canalisation d'eau potable ou d'une pipeline d'hydrocarbure, il est possible qu'une pollution des eaux ou des sols environnants soit avérée (Gilchrist & Allouche, 2005). Cela peut engendrer de nombreuses complications, tant environnementales que sanitaires. Ainsi, Gilchrist and Allouche (2005) montrent que ces effets engendrent des coûts de dépollution, mais également des coûts médicaux. Malgré les mesures de précaution vis-à-vis de la

[3] Lors du bris d'une conduite de gaz, le coût des gaz à effet de serre est déjà inclus dans la facture de l'éventuelle perte de produit. (Source : Gaz Métro) Ces coûts ne seront donc pas ajoutés aux coûts de pollution dus à la surconsommation des véhicules.

[4] À ces coûts de nettoyage, il est important d'ajouter les coûts liés à la santé des personnes se trouvant sur les lieux. Ainsi, il arrive qu'un excès de poussière devienne dangereux pour la santé générale. Cela implique donc un contrôle pour l'ensemble des lieux touchés, mais également le coût des personnes affectées et hospitalisées (Modieli Amadou et al., 2010).

consommation de l'eau ou de l'utilisation des sols, cette pollution peut provoquer des maladies ou infections de toutes sortes, étant à l'origine d'une hausse des frais de santé.

2.2.6.3 **Impacts sur la valeur immobilière en raison du bruit et des vibrations**

Les derniers facteurs environnementaux que nous allons prendre en compte sont le bruit et les vibrations. Ceux-ci peuvent représenter une source notable de désagréments, pouvant aussi bien affecter les citoyens qui résident aux alentours des lieux du bris que les personnes travaillant dans un environnement proche. Ainsi, le bruit et les vibrations sont la source de la perte de valeur, entre autres pour les habitations environnantes, mais il représente surtout une diminution de la qualité de vie et un facteur de réduction de la productivité au travail (Gilchrist & Allouche, 2005). Les bruits sont d'origines différentes. Ils proviennent principalement de la circulation et de l'augmentation du trafic, mais peuvent également provenir de l'activité des machineries de construction (Gilchrist, Allouche, & Cowan, 2003). Ainsi, on remarque qu'une augmentation de bruit de l'ordre d'un dBA peut représenter pour une propriété une perte de valeur estimée entre 0,2% et 1% (Gilchrist & Allouche, 2005) selon la durée des travaux. Certaines personnes sont même prêtes à payer pour ne pas avoir à souffrir du bruit des machineries (Kolator, 1998).

Comme le notent Gilchrist, Cowan, and Allouche (2002) le niveau sonore résidentiel maximum d'acceptation est estimé à 75 décibels (dBA). On estime que le bruit d'une machinerie ordinaire se situe pour sa part entre 75 et 95 dBA. En ce qui concerne le facteur de dépréciation sonore ajusté, il dépend de la durée du projet et ainsi de l'habitude des individus vis-à-vis des nuisances sonores. En reprenant les travaux de Matthews and Allouche (2010), plusieurs hypothèses furent posées ou ajoutées. La première est qu'au-delà d'un an, le facteur de dépréciation sonore devient constant, la perte de valeur due au bruit n'augmentant plus. Également, ce dernier évolue symétriquement entre les six premiers mois et les six derniers mois de la première année.

Cela nous donne les résultats suivants :

Tableau 2.4 : Table de facteurs de dépréciation sonore (Matthews & Allouche, 2010)

Durée du projet	Facteurs de dépréciation sonore (%/dBA) pour différentes valeurs finales			% de réduction
2 semaines	0,001	0,002	0,003	0%
4 semaines	0,003	0,008	0,014	1%
6 semaines	0,006	0,019	0,031	3%
2 mois	0,011	0,033	0,056	6%
3 mois	0,025	0,075	0,125	13%
4 mois	0,044	0,133	0,222	22%
5 mois	0,069	0,208	0,347	35%
6 mois	0,100	0,300	0,500	50%
7 mois	0,131	0,392	0,653	65%
8 mois	0,156	0,467	0,778	78%
9 mois	0,175	0,525	0,875	88%
10 mois	0,189	0,567	0,944	94%
11 mois	0,197	0,592	0,986	99%
12 mois	0,200	0,600	1,000	100%

L'annexe D expose une représentation graphique du facteur de dépréciation sonore pour une valeur finale de 0,60%/dBA.

En prenant en compte ces différents paramètres, il est possible d'estimer un facteur de réduction de valeur ou de dépréciation dépendant du bruit pour l'immobilier dans un projet de construction (Matthews and Allouche (2010)). Celui-ci servira alors à estimer le coût relatif du bruit, ce dernier pouvant être exprimé sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}&\text{Coûts (ou perte de valeur) dus à la pollution sonore sur la valeur des propriétés}\\&= \big(\text{Bruit lors des travaux de remise en état (dBA)}\\&- \text{Bruit hors période de remise en état (dBA)}\big)\\&\times \text{Facteur de dépréciation sonore ajusté (\%/dBA)}\\&\times \sum_{i=1}^{N} (\text{Valeur de la propriété i (\$)}\\&\times \text{Pourcentage d'ajustement conservateur pour la propriété i affectée (\%))}\end{aligned}$$

Ces coûts sont très visibles en ce qui concerne la location. Afin d'illustrer cette perte de valeur, nous allons prendre l'exemple d'une location d'appartement dans un milieu résidentiel. Le loyer mensuel est de 2000 $. Durant 6 mois, des travaux de remise en état vos provoquer une augmentation du volume sonore de 10 dBA. La perte valeur de l'appartement sera la suivante :

$$\begin{aligned}&\text{Coût de la pollution sonore sur la valeur de l'appartement}\\&= 10\ (\text{dBA}) \times 0{,}010\ (\%/\text{dBA}) \times \big(2000\ (\$) \times 6\ (\text{mois})\big) \times 0{,}50\ (\%) = \ 600\ \$\end{aligned}$$

Ces 600 dollars représentent une perte qui sera à la charge du locataire habitant l'appartement ou à la charge du loueur si ce dernier est contraint de diminuer le prix du loyer.

On remarque ainsi que le bruit représente déjà un important coût pour la société. Nous allons par ailleurs étudier dans la partie suivante les coûts que celui-ci engendre en ce qui concerne la baisse de productivité des employés.

2.2.7 **Impacts économiques**

Un autre point très important lorsqu'on parle de coûts indirects est celui relié à l'activité économique. Que cela se répercute au niveau des clients ou bien des employés, l'activité générale des commerces ou des industries se voit très souvent impactée par ces bris et leurs perturbations.

2.2.7.1 **Baisse de la productivité**

En lien direct avec ce que nous avons cité précédemment quant à la perte de valeur immobilière en cas d'augmentation du bris, il en est de même avec la productivité des employés des commerces ou des entreprises touchés. L'augmentation ponctuelle de l'activité environnante est le premier facteur d'augmentation du niveau sonore. Il devient alors possible d'établir une estimation quant au coût que représente cette pollution sonore sur le lieu de travail (Gilchrist & Allouche, 2005):

$$\begin{aligned}&\text{Coût de la pollution sonore dans le milieu professionnel}\\&\quad = \text{Durée du projet (h)}\\&\quad \times \sum_{i=1}^{N} (\text{Facteur de réduction de productivité pour un travailleur i}\\&\quad \times \text{Taux horaire moyen d'un travailleur i (\$/h)}\\&\quad \times \text{Nombre de travailleurs i affectés)}\end{aligned}$$

N étant le nombre de types de travailleurs affectés

Il est important de noter que le facteur de réduction de productivité s'avère être très important dès la première augmentation du volume sonore.

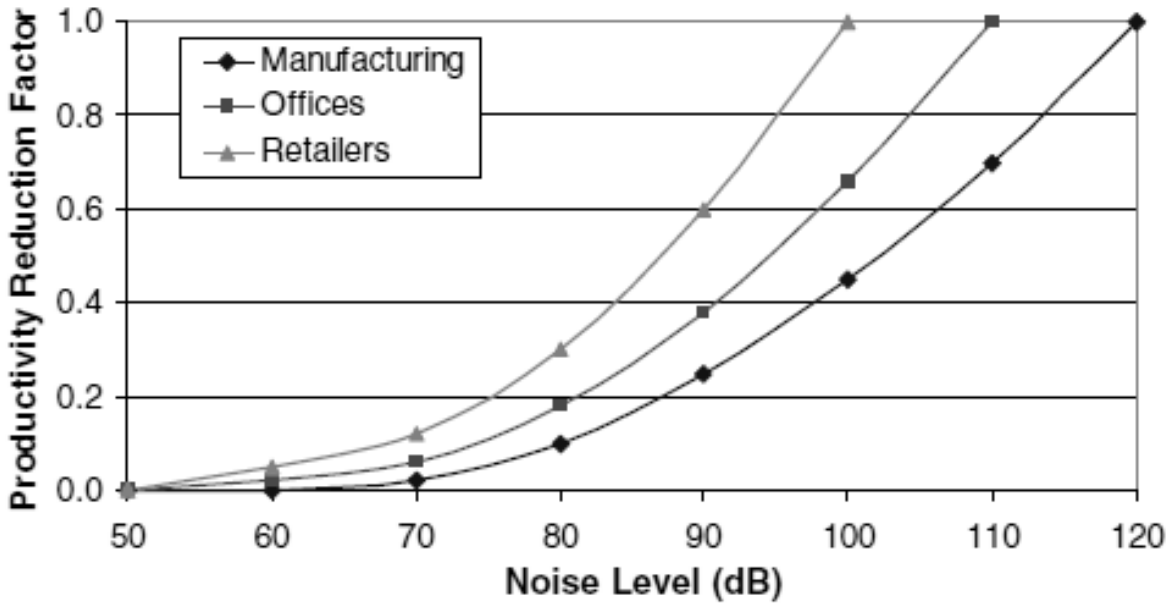


Figure 2.2 : Facteur de réduction de la productivité en fonction du bruit (Gilchrist & Allouche, 2005)

Un autre désagrément s'accompagne avec le bruit. Il s'agit des vibrations dues aux travaux de remise en état et de l'activité des machineries utilisées, mais aussi à cause des vibrations dues au trafic routier, principalement les camions et autres véhicules lourds. Ces vibrations sont un véritable fléau pour le bien-être et la productivité des employées. Elles représentent une irritation et un désagrément certains pouvant être à la base de gênes fonctionnelles (perturbation du sommeil, productivité au travail, etc.). En reprenant les travaux déjà établis de Gilchrist and Allouche (2005) une estimation du coût des vibrations serait la suivante :

Coût des vibrations sur les travailleurs

$$= \text{Durée du projet (h)} \times \text{Nombre de personnes affectées}$$
$$\times \text{Facteur de réduction de productivité} \times \text{Taux horaire moyen (\$/h)}$$

On remarque que tout comme pour la baisse de productivité due au bruit, celle due à la présence de vibrations impacte la productivité du travail dès le début de la remise en état des infrastructures.

2.2.7.2 **Retards et absences au travail**

Les retards et absences au travail sont également à la base de divers coûts. En plus de la valeur du temps perdu par les employés, il est important de prendre en compte le préjudice moral. Goetzel et al. (2004) ont évalué que la perte de productivité liée à un trouble de la santé, notamment les troubles psychologiques, pouvait être évaluée à 348 $ par employé et par an. À cela, il ajoute que le présentéisme coûte également, entre 8% et 60% de plus que les soins médicaux nécessaires.

2.2.7.3 **Pertes de revenus**

Un bris d'infrastructure souterraine s'accompagne fréquemment d'une baisse du chiffre d'affaires des commerces localisés à proximité de la zone du sinistre (Gilchrist & Allouche, 2005). L'activité des commerçants se retrouve fortement impactée par de nombreux aspects cités précédemment. Cela est principalement dû à l'accessibilité des lieux. En effet, comme nous l'avons vu, un évènement du type bris d'infrastructure souterraine entraine à différents niveaux une congestion. Et que cela se répercute au niveau de la circulation ou au niveau des piétons, le manque d'accès aura un impact très fort.

2.2.7.4 **Pertes de taxes**

Avec cette perte du chiffre d'affaires s'accompagne une inévitable perte de taxes provenant des revenus générés par l'activité locale. Dépendamment de l'activité, de l'importance du commerce ou de l'entreprise (etc.) les taxes varient (Lefebvre & Mayer, 1991). Une baisse de l'activité économique représente une baisse de rentrée d'argent pour l'exécutif en place et donc représente un coût réel. Au Québec, cela représente des pertes en ce qui concerne la taxe de vente du Québec (TVQ) et la taxe sur les produits et services (TPS) s'élevant respectivement à 9,975% et 5% du prix hors taxes (RevenuQuébec, 2013).

2.2.7.5 **Retards pour les travaux à venir**

Lorsque l'on étudie les coûts indirects d'un incident mettant en cause des infrastructures souterraines, il est important de regarder les étapes postérieures à celle du bris. Ainsi, bien que les perturbations immédiates soient les plus importantes, il reste nécessaire de prendre en compte les perturbations se faisant ressentir ultérieurement (Rahman et al., 2005). Ces perturbations se font notamment ressentir au niveau de la gestion des travaux prévus avant l'accident, notamment au

niveau de l'immobilisation des ressources, que ces dernières soient matérielles ou humaines. Ces retards peuvent ainsi s'appliquer à l'entreprise excavatrice, mais également aux corps de métiers dont les travaux étaient prévus à postériori, étant à l'origine de pénalités de retard.

2.2.8 **Baisse de la qualité de vie**

Tous ces facteurs ont comme impact en plus des coûts énumérés précédemment une baisse de la qualité de vie des citoyens impactés (Gilchrist & Allouche, 2005). De la perte de temps à l'énervement, en passant par les maladies et les désagréments occasionnés, nombreux sont les coûts attribuables à un bris d'infrastructure souterraine. Mais il n'est pas forcément possible de chiffrer monétairement cette diminution de bien-être général pour les populations affectées. Il apparait donc que l'aspect moral est à prendre en compte à côté de l'aspect plus financier que représente ce type de perturbations.

Après avoir effectué une revue de la littérature des coûts directs et indirects liés aux bris d'infrastructures souterraines, il devient à présent nécessaire d'établir une méthodologie permettant d'établir une estimation précise des coûts réels occasionnés.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR LE CALCUL DES COÛTS INDIRECTS LIÉS À DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES

Suite à la revue de littérature, il nous a paru important de redéfinir certaines méthodes de calcul de coûts. Les raisons sont diverses. Cela va de l'absence de données pertinentes à la découverte de phénomènes nouveaux. Les méthodes de calcul pertinentes déjà énoncées dans la revue de littérature ne seront pas redéveloppées.

3.1 Ajustement des estimations de coûts en fonction des années

À de nombreuses reprises, les rapports ou études font état de données datant de plusieurs années et provenant de pays différents. Afin de pouvoir utiliser les données de ces précédentes études, il est important de les convertir afin d'apporter plus de justesse aux études.

Quand nous parlons de conversion, nous ne parlons pas uniquement de la valeur intrinsèque du dollar, mais plutôt de la valeur qu'il représente pour un citoyen. Il est donc nécessaire de convertir la valeur d'une devise par rapport à une autre, mais également de regarder l'évolution de la devise à travers le temps. Ainsi, nous ne prendrons pas en compte le taux de change de valeur, mais ce qu'on appelle le « GDP Deflator ». Cet indice permet d'évaluer la valeur d'une devise au court du temps. Il prend en compte l'inflation du pays, le pouvoir d'achat changeant, etc. Nous allons pour cette étude nous baser sur les données de la banque mondiale.

Afin d'illustrer la méthode qui sera adoptée dans la suite de l'étude, l'illustration suivante est proposée. Soit un coût estimé à 1000 dollars pour un américain en 2002. En reprenant les données de la banque mondiale, ayant une base 100 pour l'année 2005, le coût pour un Canadien en 2012 sera le suivant :

$$\text{Coût réel pour un canadien } (\$2012) = \text{Coût initial pour un américain réajusté } (\$2002)$$

$$= \text{Coût initial}(\$2002) \times \frac{\text{GDP Deflator } (2012, \text{Canada})}{\text{GDP Deflator } \left(2002, \text{États} - \text{Unis}\right)}$$

$$= 1000 \times \frac{119{,}6346}{92{,}1985} = 1297{,}58\ \$$$

Si l'on applique l'ajustement, un coût de 1000 $ pour un Américain en 2002 représente un coût réel de 1297,58 $ pour un Canadien en 2012.

Ainsi, pour l'ensemble de l'étude, le réajustement des différentes données se fera de la façon énoncée précédemment.

3.2 Calcul et estimation des coûts directs

Comme nous avons pu le citer précédemment, les coûts directs représentent les coûts nécessaires à la remise en état des infrastructures endommagées. La vraie difficulté consiste à répertorier l'ensemble des données. En ce qui concerne les calculs exacts des coûts, ceux-ci sont quasi systématiquement réalisés sur les bordereaux ou sur les factures, que ces dernières soient transmises ou non à l'excavateur.

Ainsi, les coûts des matériaux de remplacement utilisés, les différents taux horaires, ou encore les frais de gestion et de suivi de dossier se trouvent dans la plupart des cas sur le même document, détenu par le propriétaire de l'infrastructure ayant subi un bris. Cette première partie ne relève donc pas de calculs ou d'estimation à proprement parlé, mais plutôt de récoltes de données auprès des différents intervenants lors de la remise en état des infrastructures.

En revanche, pour ce qui est des coûts indirects reliés à l'accident, ceux-ci ne peuvent être calculés aussi facilement que les coûts directs.

3.3 Mesures et estimations des coûts indirects liés au bris

Comme nous avons pu le constater dans la revue de littérature, un certain nombre de formules existe pour quantifier les coûts liés à un bris d'infrastructures souterraines, notamment en milieu urbain. Selon les coûts observés, il existe plusieurs méthodes possibles pour calculer la somme totale de ces derniers. Toutefois, dans certains cas, l'absence totale de données ou l'observation de phénomène sur le terrain vont nous nous obliger à avoir recours à de nouvelles hypothèses et à mettre en place certaines formules d'estimation.

3.3.1 Pertes de produits dues

Les pertes de produits lors de bris d'infrastructure représentent un coût réel relié au bris, comme nous l'avons mentionné précédemment dans la revue de littérature. Que ces pertes soient

facturées ou non, elles représentent une somme que l'on doit estimer. Pour cela, la façon la plus efficiente est la mesure du débit observé pour l'infrastructure brisée durant la période précédant l'interruption du flux.

Le volume perdu peut ainsi être estimé de la façon suivante :

$$\text{Volume de fluide perdu } (m^3) = \text{Débit de la conduite } (m^3/h) \times \text{temps avant intervention } (h)^5$$

En utilisant le prix volumique de chaque fluide, cela nous permet d'obtenir une estimation du premier coût occasionné :

$$\text{Coût de la perte de fluide} = \text{Volume de fluide perdu } (m^3) \times \text{prix volumique du fluide } (\$/m^3)$$

En ce qui concerne les prix volumiques utilisés dans la suite des études de cas, le taux volumique pour l'eau potable sera de 0,40 $\$/m^3$ (Ville de Gatineau, 2013). Pour le gaz de ville, le coût que représente la perte de produit est visible directement sur les factures transmises par le propriétaire d'infrastructure gazière.

3.3.2 Estimation des coûts liés aux interventions d'urgence

3.3.2.1 Interventions des services publics de sécurité

Lors de certaines interventions liées à des bris d'infrastructures souterraines mettant la vie des citoyens en danger, un déploiement des services de sécurité de la localité peut être avoir lieu. C'est notamment le cas pour certaines fuites de gaz ou lors d'inondations de grande ampleur. Les

[5] Dans certains cas, la conduite n'est pas complètement sectionnée. Il faudra alors prendre en compte la quantité de produit perdue et non la quantité maximale de produit pouvant être perdue.

principaux services publics pouvant être appelés sont le service incendie, le service de police et les ambulances.

Il devenait donc nécessaire d'estimer le coût que représentent ces interventions. Pour cela, il fallait déterminer à la fois le taux horaire et le temps d'intervention de chaque unité d'intervention. Après avoir pris contact avec les services considérés à Montréal (Service de sécurité incendie de Montréal (SIM) et Service de police de la ville de Montréal (SPVM), nous avons obtenu pour chaque type de véhicule les taux horaires d'utilisation suivants :

Tableau 2.5 : Taux horaires des différents véhicules d'intervention des services de sécurité publique

Type de véhicule	Taux horaire d'utilisation[6]
Véhicule de chef aux opérations (SIM)	49 $/h
Véhicule d'assistance (SIM)	200 $/h à 400 $/h
Véhicules autopompe (SIM)	515 $/h
Véhicule d'élévation (SIM)	728 $/h
Véhicule d'intervention (SPVM)	62 $/h

Il est important de noter que le taux horaire d'utilisation des véhicules cités précédemment prend également en compte le taux horaire des personnes présentes à bord du véhicule. Si on prend l'exemple d'un véhicule autopompe du Service de sécurité incendie de Montréal (SIM), le taux horaire de 515 $/h prend en compte le salaire des 4 pompiers présents à bord du véhicule.

---

[6] Le taux horaire prend en compte les salaires des employés et l'amortissement des véhicules d'intervention.

Sources : Service de sécurité Incendie de Montréal et Service de Police de la Ville de Montréal.

Ainsi, pour chaque intervention, il devient possible, en prenant en compte le temps passé sur le terrain, de calculer le coût total.

$$\text{Coût total d'intervention des services publics de sécurité} = \sum_{i=1}^{N} (\text{Taux horaire d'un véhicule de type i (\$/h)} \times \text{Temps d'intervention d'un véhicule de type i (h)})$$

avec N le nombre de véhicules d'intervention déployés lors de l'accident

3.3.2.2 **Interventions de sociétés privées et des propriétaires d'infrastructures adjacentes**

En plus des interventions des services publics tels que le service de police ou celui de sécurité incendie, certaines sociétés privées peuvent être appelées lors de l'intervention. Il est donc important lors d'une intervention de récupérer le maximum d'informations afin de ne pas oublier des coûts additionnels. Cela fut notamment le cas lors d'une intervention sur une fuite de gaz ou un serrurier et une dépanneuse furent contactés pour avoir accès au lieu du sinistre.

Il en est de même pour les propriétaires d'infrastructures adjacentes. Même si le bris principal n'est pas à relever sur l'une de leurs infrastructures, il est possible que par mesure de prévention, une intervention de services spécialisés soit nécessaire et ordonnée. Cela engendre des surcoûts à ajouter à l'ensemble de l'accident.

3.3.2.3 **Interruptions de services pour les infrastructures touchées**

Comme nous l'avons constaté dans la revue de littérature, les interruptions de service peuvent être particulièrement couteuses, notamment en ce qui concerne le service électrique, dépendamment du type de clients touchés. Ainsi, comme le mentionnent LaCommare and Eto (2006), les coûts peuvent aller de quelques dollars à plusieurs milliers de dollars par heure d'interruption. Dans les études qui suivront, nous utiliserons ces résultats afin d'estimer le préjudice engendré par la coupure d'électricité. Cependant, dans le but de ne pas surestimer les coûts engendrés, nous établirons des équivalences entre les différentes catégories de client. En effet, pour le principal prestataire de service électrique au Québec, Hydro-Québec, les clients sont

répertoriés selon 3 grandes catégories : les clients mineurs, moyens et majeurs (Hydro-Québec, 2013). Le tableau suivant présente les équivalences établies :

Tableau 2.6 : Équivalence des types de clients de service électrique Hydro-Québec (2013) - LaCommare and Eto (2006)

Types de clients Hydro-Québec (2013)	Type de clients LaCommare and Eto (2006)	Coûts horaires moyens (US$ 2002)	Coûts horaires moyens (CA$ 2012)
Client mineur	Clients résidentiels	2,70 $/h	3,50 $/h
Client moyen	Commerces, entreprises de petite taille	886,00 $/h	1149,65 $/h
Client majeur	Entreprises et industries de taille importante	3253,00 $/h	4221,01 $/h

Il est important de noter que les données précédentes ne tiennent pas compte des mesures d'atténuation en place pour certains clients (génératrice ou système auxiliaire pour des infrastructures sensibles comme les hôpitaux). Cependant, à partir de ces équivalences, il devient possible, en déterminant la durée d'interruption de service, d'établir une estimation du coût que représente cette coupure de service électrique :

$$\text{Coût d'une interruption de service électrique} = \text{Durée de l'interruption (h)} \times \sum_{i=1}^{N} (\text{Coût horaire moyen i (\$/h)} \times \text{Nombre de clients i touchés})$$

N étant le nombre de types de clients touché.

3.3.3 Perturbation des sols et réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes

Comme nous l'avons vu dans la revue de littérature, un bris d'infrastructure souterraine peut être à l'origine d'une perturbation générale des sols enivrements et en raison de ce fait entrainer une réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes. Les conséquences sont très variables dépendamment du lieu, du type de sol, des conditions externes, etc. C'est la raison pour laquelle une étude générique ne peut être réalisée.

Afin d'estimer les coûts de ces perturbations et de la réduction de la durée de vie des infrastructures adjacentes, il est nécessaire d'étudier au cas par cas les réparations qui vont suivre un bris d'infrastructure souterraine. Pour cela, il sera nécessaire d'adopter la même méthode que celle utilisée pour déterminer les coûts directs liés à un bris d'infrastructure.

3.3.4 Prolongement de la fermeture ou de la perturbation d'une section de route et impacts sur les déplacements et le trafic

Dans cette partie, nombreuses sont les méthodes pour calculer le coût des perturbations affectant le trafic routier. Nous allons au fur et à mesure revisiter ces différentes techniques et dans certains cas, nous tenterons d'y apporter certaines améliorations.

3.3.4.1 Pertes d'espace de stationnement

Comme nous avons pu le voir dans la revue de littérature, il existe déjà des méthodes très efficientes permettant de calculer les coûts applicables à la perte d'espaces de stationnement, qu'il s'agisse de la perte de revenus au niveau du stationnement en lui-même ou au niveau des contraventions. En ce qui concerne la perte d'espace, aucune amélioration ne semble judicieuse, voire possible.

3.3.4.2 Pertes de temps pour les véhicules et les piétons et augmentation de la distance à parcourir en cas de détour

Dans les paragraphes suivants, nous allons aborder le coût que représentent les pertes de temps pour les véhicules et piétons en raison des perturbations sur le réseau routier. En plus de l'impact certain sur la qualité de vie des citoyens impactés, les pertes de temps durant certains périodes ont

été perçues comme critiques (le matin, aux heures de pointe, etc.). Elles ont donc été considérées comme un préjudice monétaire certain.

Contrairement à ce que nous avons pu voir dans différentes études relatives à la congestion du trafic routier, nous aborderons une analyse « hybride » menant de front la perte de temps et l'augmentation de la distance de parcours en cas de congestion. Deux cas de figure se présentent pour ce type d'étude. Soit une section de route s'avère être totalement fermée, ce qui entraine un inévitable détour pour l'ensemble des personnes circulant (voitures et piétons), soit une partie de voie reste ouverte, mettant en avant des phénomènes particuliers.

Dans le premier cas, les formules reprises par Modieli Amadou et al. (2010) permettent un calcul simple et efficace des coûts engendrés par le bris en appliquant de la formule suivante :

$$\begin{aligned}&\text{Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules}\\&= \sum_{i=1}^{N} (\text{Nombre de véhicules de type i par jour}\\&\times \text{Taux d'occupation des véhicules de type i}\\&\times \text{Taux horaire d'un passager présent dans un véhicule de type i (\$/h))}\\&\times \text{Temps de détour (h)} \times \text{Nombre de jours}\end{aligned}$$

avec N le nombre de types de véhicules.

Parmi les différents types de véhicules, on retrouve les bus, les véhicules de particulier (voitures), les camions de livraison, les camions lourds, les taxis, etc.

De la formule précédente découle une formule semblable pour les piétons :

$$\begin{aligned}&\text{Coût de la perte de temps dû au détour des piétons}\\&= \text{Taux horaire moyen d'un piéton (\$/h)} \times \text{Temps de détour (h)}\\&\times \text{Nombre de piétons par jour} \times \text{Nombre de jours}\end{aligned}$$

Cela amène un nouveau problème quant à l'estimation du taux horaire des différents types de véhicules ainsi que sur le taux de remplissage de ces derniers. En ce qui concerne le taux horaire, il est important comme le mentionnent Gourvil and Joubert (2004) de prendre en compte l'ensemble des facteurs tels que le salaire annuel, le nombre d'heures travaillées, le type d'emploi, les impôts sur le revenu, etc. Ainsi, d'après son étude, il devient possible d'obtenir une formule définissant le taux horaire à partir du revenu annuel des passagers :

$$\text{Estimation du taux horaire en fonction du revenu annuel } (\$/\text{h}) = 4{,}15 \times 10^{-3}(\text{h}^{-1}) \times \text{Revenu annuel}^{\,0{,}783}\ (\$)$$

Nous obtenons graphiquement la courbe suivante en ce qui concerne le taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec :

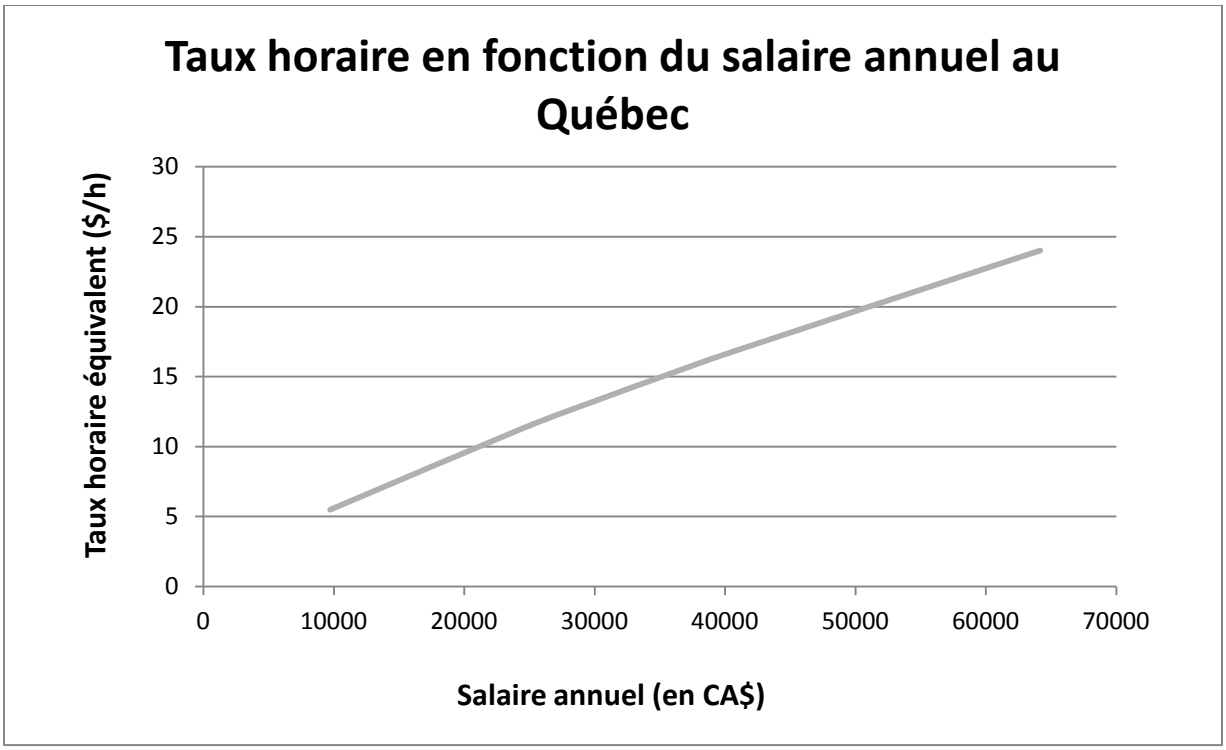


Figure 2.3 : Taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec (d'après Gourvil and Joubert (2004))

L'annexe A présente certaines valeurs numériques en ce qui concerne le taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec.

En ce qui concerne le taux horaire des véhicules lourds, nous nous baserons sur les chiffres de Gourvil and Joubert (2004). Les estimations sont les suivantes :

Tableau 2.7 : Taux horaire selon le type de camion (Gourvil & Joubert, 2004)

Type de camion	Taux horaire (CA$1998/h)	Taux horaire (CA$2012/h)
Camion régulier	26,50 $/h	37,80 $/h
Camion lourd	28,90 $/h	41,23 $/h

L'autre configuration lors d'une congestion de trafic est la fermeture partielle de la chaussée permettant de laisser place à des travaux de remise en état. En ce qui concerne les piétons, le temps perdu est négligeable, ces derniers n'ayant dans la plupart des cas qu'à traverser la voie pour avoir accès au côté de la chaussée dégagé.

En revanche, en ce qui concerne le trafic automobile, le calcul semble plus complexe. En effet, lors de congestion de grande ampleur, nous avons pu constater qu'un phénomène d'apprentissage des automobilistes était visible. Ce phénomène est hybride entre une congestion totale et des détours. Nous avons remarqué à la suite de cueillettes de données sur le terrain qu'aux mêmes heures, le temps d'attente était moins long d'une semaine sur l'autre. En effectuant des mesures sur le terrain, nous nous sommes aperçus que le temps d'attente suivait de près la loi suivante :

$$\mathrm{Tc}\ (\mathrm{t}) = \frac{\mathrm{Tc}(\ \mathrm{t}_{-5}) + \mathrm{Tdminimum}}{2}$$

avec Tc(t) le temps de parcours supplémentaire dû à la congestion à l'instant t et Tdminimum le temps de parcours supplémentaire minimum pour un détour.

Il devient alors nécessaire d'introduire des conditions limites au modèle que nous désirons mettre en place. Tout d'abord, nous considèrerons qu'au bout d'un mois de travaux, c'est-à-dire 20 jours travaillés en semaine, le temps de congestion est égal au temps de détour minimum, les automobilistes ayant pris connaissance des perturbations présentes sur les lieux. Les temps de congestion le jour de l'accident et le temps de parcours supplémentaire pour le détour minimum sont des données connues. Ainsi, le temps de parcours supplémentaire dû à la congestion en fonction du temps peut suivre la loi suivante :

$$\text{Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion(t)} = \text{Tc (t)} = A + B \times (T_0 - t)^{\alpha}$$

Avec pour conditions limites :

$$\text{Tc (t)} = \frac{\text{Tc}(\, t_{-5}) + \text{Tdminimum}}{2}$$

$$\text{Tc}(t = 1) = \text{Temps de parcours maximum mesuré pour les véhicules congestionnés}$$

$$\text{Tc}(t \geq 20) = \text{Tdminimum}$$

$$T_0 = 20 \text{ jours}$$

$$\text{Tc}'(t = 20) = 0 \text{ avec } \text{Tc}'(t) = \frac{dTc(t)}{dt}$$

En prenant comme exemple un temps de congestion initial de 8 minutes et un temps de détour minimum de 5 minutes, cela nous donne pour les temps de parcours supplémentaire dû à la congestion les profils suivants :

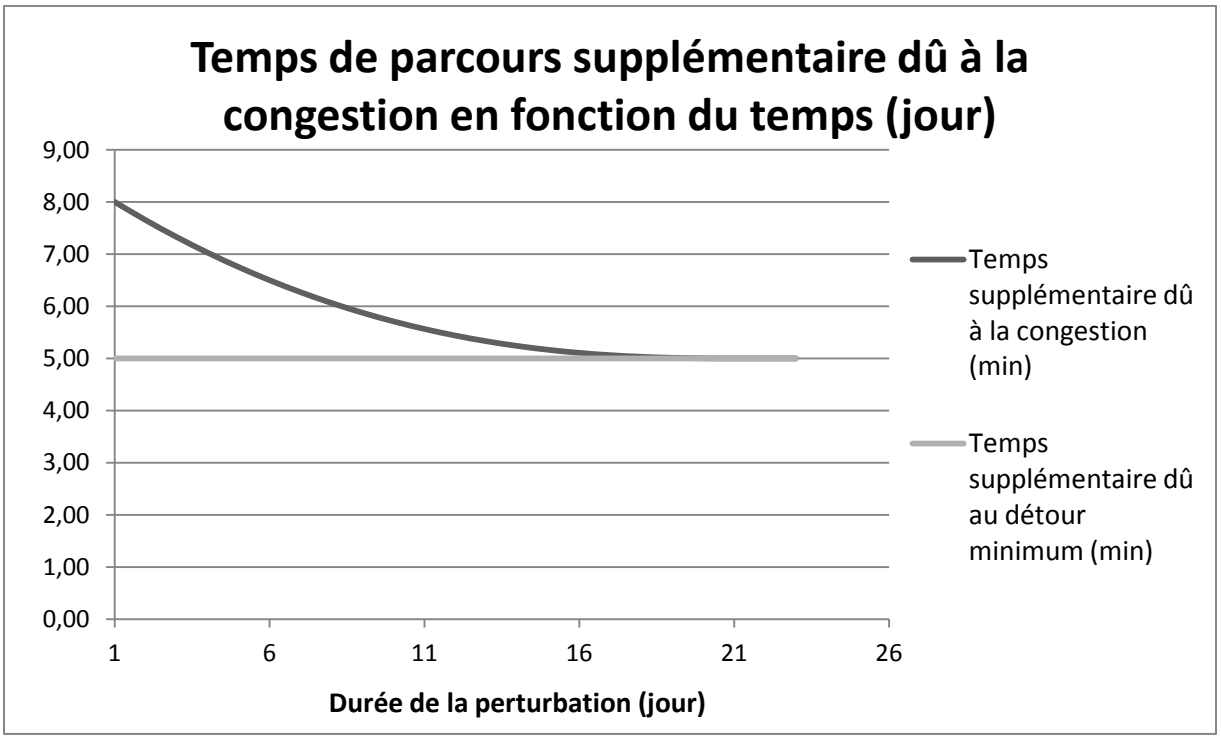


Figure 2.4 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion en fonction du temps

En annexe B se trouvent les données numériques pour le même exemple.

Cependant, une telle diminution du temps de parcours supplémentaire dû à la congestion est conjuguée avec une diminution partielle du trafic local. Ainsi, en prenant comme référence le nombre de véhicules circulant sur l'axe lors du bris, le profil du trafic suivra le modèle suivant :

$$\text{Nombre de véhicules impactés par la congestion (t)} = \text{Nombre de véhicules impactés par la congestion } (t_{-1}) \times \frac{\text{Temps de parcours dû à la congestion (t)}}{\text{Temps de parcours dû à la congestion } (t_{-1})}$$

Intuitivement, nous pouvons rapidement remarquer que ce modèle suppose un nombre constant de véhicules au cours du temps. D'ailleurs, la relation suivante est applicable quel que soit l'instant considéré :

Nombre de véhicules perturbés (t)

$$= \text{Nombre de véhicules congestionnés (t)}$$

$$+ \text{Nombre de véhicules détournés (t)} = \text{constante}$$

Le reste des véhicules non congestionnés utilisera un itinéraire de substitution, voyant ainsi son nombre grandir au fur et à mesure du temps. En reprenant l'exemple précédent et en supposant un trafic de 7000 véhicules par jour, cela nous donne le profil suivant :

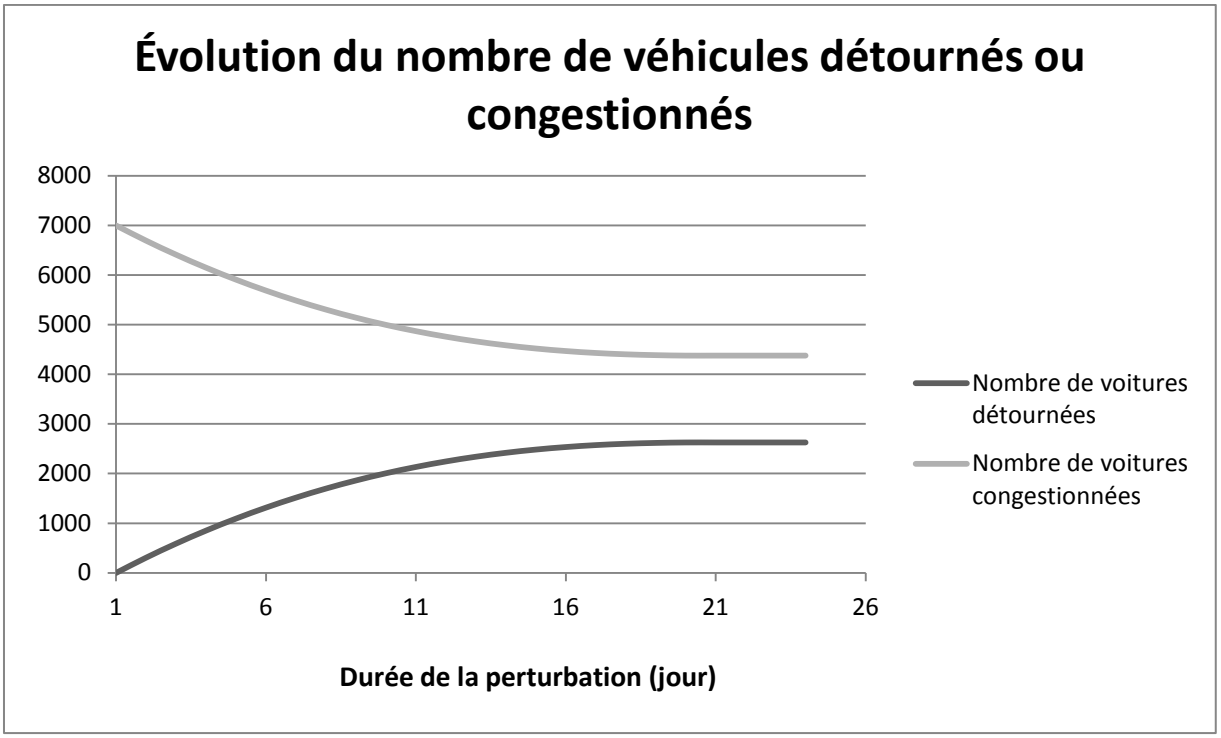


Figure 2.5: Évolution du profil du nombre de véhicules perturbés (congestion et contournement)

En annexe C se trouvent les données numériques pour le même exemple.

Ainsi, il est possible d'évaluer le coût que représente la congestion au niveau de la perte de temps, tant pour les véhicules congestionnés que pour ceux effectuant un contournement de la zone sinistrée.

Tout d'abord, il est important de calculer le coût que représente la perte de temps pour les véhicules victimes de la congestion.

$$\text{Coût de la perte de temps dû à la congestion des véhicules}$$
$$= \sum_{j=1}^{M} (\text{Nombre de véhicules le jour j}$$
$$\times \text{Temps de parcours supplémentaire dû}) \sum_{i=1}^{N} (\text{Pourcentage de véhicules de type i}$$
$$\times \text{Taux horaire des véhiculesde type i (\$/h)})$$

avec N le nombre de types de véhicules et M le nombre de jours pour la durée des travaux.

Ensuite, il est important de calculer le coût de la perte de temps pour les véhicules qui ont recours à un détour.

$$\text{Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules (perte de temps) (\$/h)}$$
$$= \sum_{j=1}^{M} \text{Nombre de véhicules le jour j} \times \text{Temps de détour (h)}$$
$$\times \sum_{i=1}^{N} (\text{Pourcentage de véhicules de type i}$$
$$\times \text{Taux horaire des véhicules de type i (\$/h)})$$

avec N le nombre de types de véhicules et M le nombre de jours pour la durée des travaux.

3.3.4.3 **Coûts de surconsommation et de maintenance des véhicules**

Lorsque l'on parle d'augmentation de parcours ou de conduite en situation de congestion, il est donc important de prendre en compte l'augmentation de la consommation et de la maintenance des véhicules. Afin d'évaluer ces coûts, nous étudierons dans un premier temps les coûts

supplémentaires d'utilisation des véhicules, puis nous étudierons comment calculer les coûts de surconsommation.

Afin de calculer les coûts supplémentaires d'utilisation des véhicules, plusieurs paramètres sont essentiels. En conjuguant la distance supplémentaire parcourue, les coûts d'utilisation des véhicules, le nombre de véhicules et la durée des travaux, cela nous donne la formule suivante :

$$\begin{aligned}&\text{Coûts supplémentaires d'utilisation des véhicules}\\&\quad=\text{distance supplémentaire minimum parcourue (km/véhicule)}\\&\quad\times\sum_{i=1}^{N}(\text{coûts d'utilisation au kilomètre des véhicules de type i (\$/km)}\\&\quad\times\sum_{j=1}^{M}\text{nombre de véhicules de type i impactés le jour j (véhicules/jour))}\end{aligned}$$

avec N le nombre de types de véhicules et M le nombre de jours pour la durée des travaux.

Ainsi, en reprenant les chiffres de (CAA) datant de 2012, on apprend que pour un Honda Civic LX, le coût d'utilisation kilométrique est de 11,06 cents/km (en prenant une distance annuelle parcourue de 18 000 km). En prenant en compte un détour d'un kilomètre pour 2000 véhicules légers pendant 3 jours, cela nous donne :

$$\begin{aligned}&\text{Coûts supplémentaires d'utilisation des véhicules}\\&\quad=1\ (\text{km/véhicule})\times\ 0{,}1106\ (\$/\text{km})\times 2000\ (\text{véhicules/jour})\times 3(\text{jours})\\&\quad=663{,}60\ \$\end{aligned}$$

Un détour à priori anodin représente en réalité un coût s'élevant à plusieurs centaines de dollars. Une fois encore, si le coût unitaire parait dérisoire, ce facteur se doit d'être pris en compte quand on regarde plus largement un incident sur une voie urbaine.

À cela, il est important d'ajouter le facteur de la surconsommation pour des véhicules. Cela se constate dans un premier temps pour les véhicules dans une situation de congestion du trafic. En effet, pour des vitesses très réduites, le graphique suivant nous montre les différences de consommations moyennes visibles d'un régime à un autre.

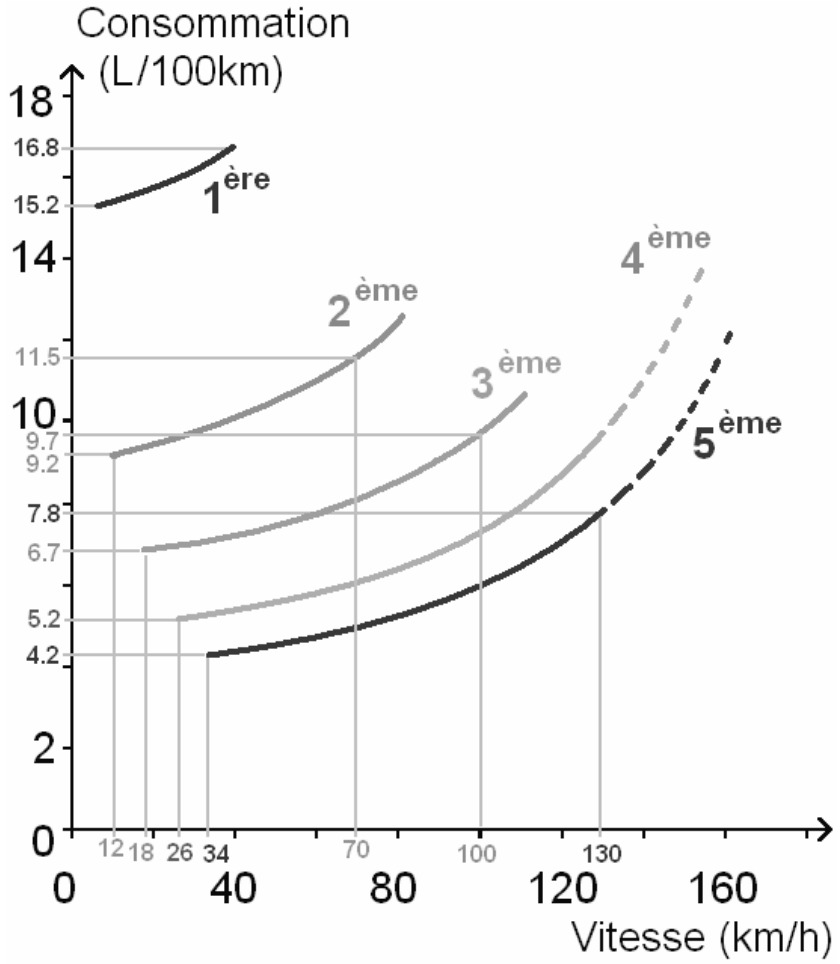


Figure 2.6: Profil de la consommation moyenne d'un véhicule en fonction de la vitesse et du rapport de vitesse

Ainsi, nous remarquons pour une vitesse inférieure à 15 km/h, la consommation sera forcément plus importante que pour des vitesses comprises entre 10 et 90 km/h (changement de régime). Différentes méthodes d'évaluation de la consommation existent. Cependant, la plus intuitive est celle visant à comparer la quantité de carburant consommée dans les deux types de situation (Michielsen, 2006). Ainsi, en appliquant la formule suivante, il est possible pour une situation définie de calculer l'augmentation de la consommation générale.

$$\text{Coût de la surconsommation dû à la congestion}$$
$$= \text{Consommation en régime perturbé} - \text{Consommation initiale}$$
$$= \text{Distance perturbée (km)} \times \text{prix du carburant (\$/L)}$$
$$\times \sum_{i=1}^{N} (\text{CPi} - \text{CIi})(\text{L/km})$$
$$\times \sum_{j=1}^{M} \text{véhicules de type i impactés le jour j (véhicules/jour)}$$

avec N le nombre de types de véhicules, M le nombre de jours pour la durée des travaux, CPi la consommation moyenne par kilomètre en régime perturbé pour un véhicule de type i et CIi la consommation moyenne par kilomètre initiale pour un véhicule de type i.

Ainsi, on considérant une perturbation durant 3 jours, impactant en moyenne 2000 véhicules par jour (axe mineur) sur 500 mètres et obligeant les automobilistes de réadapter leur vitesse de 40km/h à 10km/h (congestion significative) cela nous donne :

$$\text{Coût de la surconsommation due à la congestion (\$)}$$
$$= \text{Consommation en régime perturbé} - \text{Consommation initiale}$$
$$= 0{,}5\ (\text{km}) \times 1{,}3\ (\$/\text{L}) \times (0{,}152 - 0{,}053)(\text{L/km}) \times 3\ (\text{jours})$$
$$\times 2000\ (\text{véhicules/jour}) = 386{,}10\ \$$$

On remarque ainsi que pour une perturbation pouvant être considérée comme mineure, le coût total dû à la surconsommation s'élève déjà à plusieurs centaines de dollars. Il devient nécessaire de prendre en compte l'aspect surconsommation dans le calcul des coûts indirects.

Également, le facteur surconsommation se fait ressentir lorsqu'on aborde l'aspect augmentation de la distance parcourue. Ainsi, la formule applicable sera la suivante :

$$\text{Coût de la surconsommation due aux détours}$$
$$= \text{Consommation avec un détour} - \text{Consommation initiale sans détour}$$
$$= \text{Distance supplémentaire parcourue (km)} \times \text{prix du carburant (\$/L)}$$
$$\times \sum_{i=1}^{N} (\text{consommation moyenne par kilomètre des véhicules de type i (\$/km)}$$
$$\times \sum_{j=1}^{M} \text{nombre de véhicules de type i impactés le jour j (véhicules/jour))}$$

avec N le nombre de types de véhicules, M le nombre de jours pour la durée des travaux.

En reprenant l'exemple précédent (partie augmentation des coûts d'entretiens) avec une vitesse moyenne de 30km/h (trafic urbain), nous obtenons le coût de surconsommation suivant :

$$\text{Coût de la surconsommation due à un détour (\$)}$$
$$= \text{Consommation avec un détour} - \text{Consommation initiale (sans détour)}$$
$$= 0{,}08\ (\text{L/km}) \times 1\ (\text{km}) \times 1{,}3\ (\$/\text{L}) \times 3\ (\text{jours}) \times 2000\ (\text{véhicules/jour})$$
$$= 624\ \$$$

Encore une fois, la facture s'élève à plusieurs centaines de dollars. Et en additionnant les différents coûts de surconsommation, le montant total est le suivant :

$$\text{Coût de la surconsommation totale}$$
$$= \text{Coûts de surconsommation due à la congestion}$$
$$+ \ \text{Coût de la surconsommation due au détour} = 386{,}10 + 624 = 1\,010{,}10\ \$$$

3.3.5 **Les impacts environnementaux**

3.3.5.1 **Pollution air et poussières**

En ce qui concerne le calcul du coût des particules émises et des gaz rejetés dans l'atmosphère, nous avons vu précédemment que l'estimation du coût de chaque particule pouvait être établie en fonction de leur degré de nuisance pour l'atmosphère, des moyens nécessaires à leur élimination, etc. (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement de la Faune et des Parc). La

formule suivante semblerait donc être la plus juste pour calculer le coût que représente la pollution de l'air ainsi que le coût des émissions de différentes matières :

$$\text{Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz et de particules}$$
$$= \sum_{i=1}^{N} (\text{Coût volumique de l'élément i (\$/tonne métrique)}$$
$$\times \text{Volume de l'élément i émis (tonne métrique)})$$

avec N le nombre total d'éléments émis.

Cependant, il est très difficile, même impossible d'évaluer l'ensemble des particules émises et ainsi de calculer de cette façon le coût que représentent la pollution de l'air et l'émission des gaz à effet de serre.

En nous basant sur d'autres études, il est possible d'appréhender différemment le problème. Il est facile d'établir un réel lien entre ces émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'atmosphère avec la surconsommation des véhicules, que celle-ci soit due à l'augmentation de la distance parcourue ou aux différents phénomènes de congestion. On sait ainsi que les coûts des carburants (sans taxes) représentent à eux seuls 1,4 % des coûts socio-économiques annuels que l'on peut attribuer à la congestion récurrente sur le réseau routier de Montréal (Gourvil & Joubert, 2004). De leur côté, les émissions de polluants de l'atmosphère et des gaz à effet de serre représentent respectivement 0,8% et 0,4% de cette même facture. Ainsi, une méthode de substitution pour le calcul de ces coûts pourrait être la suivante :

$$\text{Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz à effet de serre}$$
$$= \text{Coûts totaux dus à la surconsommation des véhicules}$$
$$\times \frac{\text{Pourcentage des coûts attribuables aux diverses émissions}}{\text{Pourcentage des coûts attribuables à la surconsommation totale}}$$
$$= \text{Coûts totaux dus à la surconsommation des véhicules} \times \frac{0{,}8 + 0{,}4}{1{,}4}$$
$$= \frac{6}{7} \times \text{Coûts totaux dus à la surconsommation des véhicules}$$

Cette méthode apparait comme la plus pertinente étant donné le fait que les mesures effectuées par Gourvil and Joubert (2004) se basent sur une étude de très grande ampleur et donc censée ne pas représenter un phénomène particulier, mais plutôt un phénomène général.

3.3.5.2 **Pollution des eaux et des sols**

Les bris d'infrastructures souterraines sont également à l'origine de pollution des eaux et des sols. Pour ce qui est de la pollution des eaux, un avis d'ébullition peut être décrété. Celui-ci peut être déclenché quand les risques liés à une baisse trop importante de la qualité de l'eau sont élevés. Cette mesure est prise dans certaines régions dans un quart des cas de bris de conduites d'eau. Cela nécessite des coûts de laboratoire et implique un temps d'attente lié à l'incubation en laboratoire. Durant ce temps, la distribution de l'eau est bloquée. Les citoyens sont obligés de trouver des moyens de substitution, comme l'achat de bouteilles d'eau provoquant des dépenses supplémentaires, ou doivent porter à ébullition l'eau courante, ce qui fera augmenter leur consommation d'électricité. Ces changements de comportement s'accompagnent d'une inévitable perte de temps pour l'ensemble des citoyens. Il est donc nécessaire pour chaque cas de relever les différents coûts liés à un avis d'ébullition. Ces coûts dépendent du lieu où les analyses sont faites ainsi que du nombre d'analyses réalisées.

Il est important de mentionner que ces cas de pollution de l'eau peuvent entrainer d'autres coûts. Il existe plusieurs situations au sein desquelles des maladies peuvent survenir. Si l'avis d'ébullition n'a pas été décrété alors que cela était pourtant nécessaire, si celui-ci a été décrété trop tard, ou encore si la communication n'a pas été assez complète, il est probable que les citoyens soient victimes de différentes maladies ayant une cause hydrique. On peut notamment

penser à des maladies dermatologiques ou encore digestives. Dans tous les cas, les coûts d'hospitalisation et de prise en charge des patients malades viendront s'ajouter à la précédente liste des coûts.

3.3.6 **Impacts économiques**

Les coûts indirects aux impacts économiques sont particuliers, mais également parfois difficiles à évaluer.

3.3.6.1 **Retard et absence au travail**

Le coût du retard et de l'absence au travail est calculable de la façon suivante :

$$\begin{aligned}&\text{Coût de l'absence au travail}\\&= \sum_{i=1}^{N} (\text{Taux horaire d'un employé de type i } (\$/h)\\&\times \text{nombre d'employés de type i}\\&\times \text{temps d'absence au travail moyen des employés de type i(h))}\end{aligned}$$

avec N le nombre de types d'employés

Ce coût peut devenir très élevé lorsque l'accès à un bâtiment se trouve bloqué en raison d'un bris d'infrastructure souterraine. Le blocage peut être dû à différentes raisons : mise en place de mesure de sécurité, bâtiments présents dans une zone de congestion, etc.

3.3.6.2 **Pertes de revenus diverses et pertes de taxes**

Ce coût indirect très difficile à évaluer, surtout lorsqu'on regarde de façon macroscopique la situation lors d'un bris d'infrastructure souterraine. Lors d'un bris d'infrastructure souterraine, certains commerces peuvent être victime d'une baisse de leur chiffre d'affaires. Cependant, lorsqu'on regarde plus largement, on peut considérer que cette baisse de chiffre d'affaires va être répercutée dans d'autres commerces par une hausse égale de ce chiffre d'affaires, l'activité économique étant déplacée.

Les seules pertes qui seront comptabilisées en ce qui concerne les pertes de chiffre d'affaires pour les commerçants sont les pertes dues à une destruction partielle ou totale de leurs produits et de

leurs marchandises (pertes de nourritures, etc.). C'est la raison pour laquelle, seules les pertes de revenus qui ont donné suite à des réclamations valables et qui seront indemnisées seront considérées comme des réelles pertes de revenus.

Après avoir mis en place la méthodologie adoptée pour le calcul des coûts directs et indirects liés à des bris d'infrastructures souterraines, nous allons définir la démarche suivie lors du choix et de l'estimation des coûts des études de cas de bris d'infrastructures souterraines.

CHAPITRE 4 DÉMARCHE SUIVIE LORS DU CHOIX ET DE L'ESTIMATION DES COÛTS DES ÉTUDES DE CAS

4.1 Choix des études de cas

Les études de cas qui vont suivre dans cette étude n'ont pas été prises au hasard, mais correspondent à un choix de situations particulières identifiées avec nos divers partenaires. En ce qui concerne les cas de la ville de Gatineau, de Bell ou encore de Gaz Métro, ces cas correspondent à des bris typiques fréquents et récurrents. L'étude de ces cas permet ainsi de couvrir une large palette de faits réels auxquels les propriétaires ou exploitants d'infrastructure sont confrontés.

Au sein de ces différents cas, il existe deux configurations possibles :

- Les études de cas de bris *a posteriori* (qui ont eu lieu avant notre étude et pour lesquels nous avons recueilli des données)
- Les études de cas de bris qui ont eu lieu lors de notre étude (« en direct ») et pour lesquels nous avons nous-mêmes collecté certaines données.

4.2 Collecte des données pour les études de cas

Lors de la réalisation de nos études de cas, nous avons décidé dans un premier temps de procéder à des entrevues ainsi qu'à des cueillettes d'informations fréquentes dans le but d'obtenir le maximum d'informations provenant des acteurs qui étaient alors sur les lieux. Une fois l'ensemble des intervenants et des personnes en charge des différents dossiers consultés, nous avons complété les éventuels coûts additionnels en nous basant sur les différents coûts indirects énoncés tout au long de la revue de littérature. Cependant, selon le type d'infrastructures touchées, nos investigations ne se sont pas dirigées vers le même type de personne.

4.2.1 Déplacements sur le lieu du bris si le cas est survenu durant notre étude

Lors d'une collecte d'information et de données à propos d'un bris, il est tout d'abord très important de se familiariser avec les lieux du sinistre. En effet, l'environnement proche est très important dans la suite de l'étude à mener. Zone de forte activité ou non, point déterminant d'une

agglomération ou place sans distinction particulière, etc., cette première approche est primordiale, car elle conditionne ainsi une grande partie des analyses futures.

Parmi les premières actions menées, on retrouve les entrevues avec les différents services d'intervention présents sur place. Qu'ils soient des services de sécurité incendie, des services de police ou bien des équipes d'intervention spécialisées rattachées à une entreprise, il est très important de rentrer le plus rapidement en contact avec ces équipes. En effet, celles-ci détiennent un grand nombre d'informations cruciales et très rapidement perdues si personne ne les répertorie immédiatement. C'est la raison pour laquelle un guide d'entrevue préalablement élaboré permettait de rassembler un maximum d'informations nécessaires pour la suite.

Il est également important d'effectuer certains relevés qui ne pourront plus être effectués après. On pense notamment au comptage des véhicules présents dans la congestion, mais également à l'agencement de la circulation, aux nouveaux délais, etc. Ces relevés peuvent être nombreux et variés, mais sont nécessaires afin de se rapprocher au plus près de la réalité lors des études qui seront menées par la suite. Également, des entrevues sont menées avec les commerçants et les résidents impactés. Une fois encore, des guides d'entrevue furent développés dans le but de récolter le maximum d'informations.

4.2.2 **Collecte de données *a posteriori***

Il a également fallu mener des enquêtes pour des bris qui ont eu lieu dans le passé. La démarche à adopter est quelque peu différente de celle énoncée précédemment, tant sur le déroulement de la recherche de données que sur la nature des informations recherchées auprès des différents interlocuteurs.

4.2.2.1 **Données concernant les interventions des services et des entreprises**

Lors des collectes *a posteriori*, la première des démarches à adopter consiste à rentrer en contact avec les services qui sont intervenus lors du bris. Qu'il s'agisse des services publics d'urgence tels que les pompiers ou la police, ou des autres services (services de voirie, département d'intervention d'urgence de diverses entreprises), les informations liées au déroulement du bris, les circonstances, les mesures d'urgence ou encore les plans d'intervention adoptés permettront de comprendre en détail la situation alors présente sur les lieux du sinistre.

4.2.2.2 **Données concernant les causes du bris**

La prise de contact avec les différents services permet très rapidement de connaitre la cause principale du bris. Ces informations seront ainsi utiles par la suite pour déterminer l'impact de ce bris dans l'environnement considérer et ainsi de valider ou non certaines hypothèses de coûts, imputables ou non. Prenons l'exemple d'une rupture d'infrastructure souterraine de télécommunication lors d'une réfection de chaussée. Celle-ci ne pourra engendrer des coûts supplémentaires de congestion ou de détour. Nous pouvons en effet considérer que la présence de travaux avant l'apparition du bris était déjà la source d'une congestion. La connaissance des causes et circonstance du bris permet ainsi d'appréhender de façon juste les coûts applicables ou non.

4.2.2.3 **Données concernant les commerçants situés aux alentours du bris**

Un autre point essentiel pour l'analyse de la situation est le retour avec les commerçants et les habitants situés aux alentours du lieu du bris. Au-delà des chiffres estimatifs de la perte de revenu due aux perturbations, qui sont utilisables pour le calcul final des coûts, ces témoignages nous renseignent sur le degré d'importance du bris comme la durée des perturbations ainsi que leur ampleur, ces données étant parfois difficiles à recenser par l'intermédiaire des différents services d'interventions.

4.2.2.4 **Autres données secondaires pouvant être utilisées pour l'évaluation des coûts**

Enfin, le reste des données importantes pour l'étude doivent être récupérées par plusieurs sources. Cela peut notamment être le cas en ce qui concerne les données liées à la circulation (Ville de Montréal, 2013) puis en utilisant certains profils de répartition observés au jour le jour. C'est par exemple le cas pour ce qui est des profils de redistribution du trafic automobile lors de congestion trop importante.

La figure 4.1 récapitule les différentes démarches suivies lors de nos différentes études de cas.

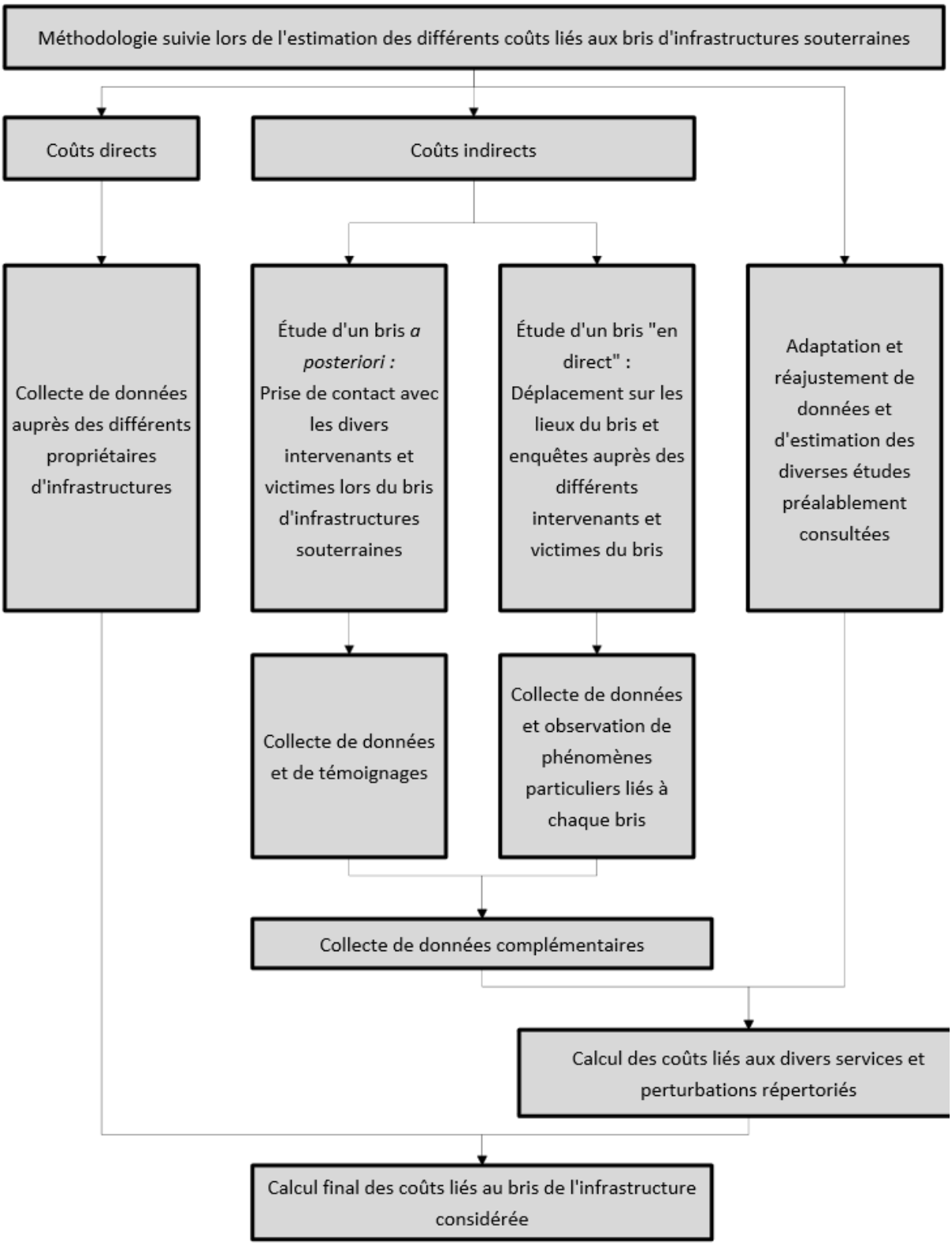


Figure 4.1: Méthodologie générale adoptée lors des études de cas

CHAPITRE 5 LES ÉTUDES DE CAS RETENUES

Dans les études de cas qui vont suivre, nous allons faire appel aux diverses formules énoncées et expliquées dans les paragraphes précédents. Par souci de clarté, la totalité de ces formules ne sera pas réécrite pour toutes les études de cas.

5.1 Bris d'une conduite de gaz au cœur d'un quartier résidentiel montréalais : le cas de l'avenue Coloniale

L'étude de cas suivante fait état d'un bris survenu sur une canalisation de gaz de ville lors d'une remise en état de la chaussée. Ce bris a lieu en milieu résidentiel au début du mois de novembre 2012, à Montréal.

5.1.1 Localisation du bris

La section de l'avenue Coloniale considérée se situe dans le quartier du Plateau-Mont-Royal de la ville de Montréal, entre la rue Sherbrooke Est, l'avenue des pins, la rue Saint-Denis et le Boulevard Saint-Laurent. Étant un quartier résidentiel, cette partie de la rue regroupe un grand nombre d'habitations (de type triplex pour la plupart) mais également quelques commerces et petites entreprises (dentiste, restauration, etc.). Cette rue s'avère être une artère assez peu empruntée, mais également assez difficile d'accès, celle-ci étant en sens unique (de l'avenue des pins vers la rue Sherbrooke). Elle correspond ainsi à l'exemple parfait d'une rue au sein d'un quartier résidentiel de Montréal ou d'une ville à forte densité démographique. Ce cas représente donc un fort intérêt. Beaucoup de bris d'infrastructures gazières sont provoqués dans des situations semblables.

Figure 5.1 : Aperçu du 3459 Avenue Coloniale (source : Google Maps)

5.1.2 **Le bris**

Aux environs de 11 h, le mardi 6 novembre 2012, le Service de sécurité incendie de Montréal (SIM) a reçu un appel pour une fuite de gaz de type 10.09 pour une catégorie 3, signal spécifique lié à une fuite de gaz majeure sur le territoire montréalais. Nous nous sommes alors immédiatement rendus sur les lieux aux côtés du Chef aux Opérations et membre de la direction de la planification stratégique. Cela nous a permis d'accéder à la zone de sinistre, au sein des équipes d'intervention, moins de 10 minutes après que l'alerte a été déclenchée.

Le bris a été causé par une entreprise d'excavation qui a accroché les installations souterraines de Gaz Métro[7] avec une pelle mécanique. Il s'agissait d'une conduite principale de 2 pouces de diamètre, alimentée des 2 côtés et dont la pression intérieure atteignait 400kPa.

[7] Principal distributeur de gaz naturel de ville au Québec

Figure 5.2 : Pelle mécanique responsable du bris (source Gaz Métro)

À notre arrivée sur les lieux du bris, les équipes d'intervention spécialisées du SIM ainsi que le Service de police de la ville de Montréal (SPVM) étaient déjà sur place. Ils avaient eu le temps de fermer la section de rue au sein de laquelle les risques étaient considérés comme élevés. Toutes formes de circulation ou d'activité humaine y étaient interdites. L'une de leurs premières missions a été l'évacuation de l'ensemble de la population civile présente dans cette zone de danger soit environ une trentaine de personnes. Aucun bâtiment sensible –école, hôpital, etc.- ne se trouvait à proximité[8].

[8] Contrairement au cas survenu la semaine du 1 au 5 avril 2013

Figure 5.3 : Conduite de gaz touchée (source Gaz Métro)

Un aspect important de ce bris est que les équipes de Gaz Métro ne pouvaient intervenir sans une coupure générale de l'électricité, les risques d'ignition du gaz étaient trop grands.. En effet, le gaz peut s'enflammer et causer un incendie, voir une explosion dans certains situations particulières. Une simple étincelle peut ainsi être à l'origine d'une catastrophe de bien plus grande ampleur (pour les cas de fuite en milieu confiné). Les services de la SIM étaient alors en charge de la supervision des opérations durant la période de gestion de crise[9], ont demandé aux services d'Hydro Québec de procéder à un « déclenchement d'artère ». Cette opération vise à couper l'ensemble du service électrique pour tout un secteur autour de la zone du bris afin d'éviter tous les risques possibles liés à l'électricité.

[9] Procédure habituelle pour tous les évènements de fuite de gaz qui surviennent à Montréal

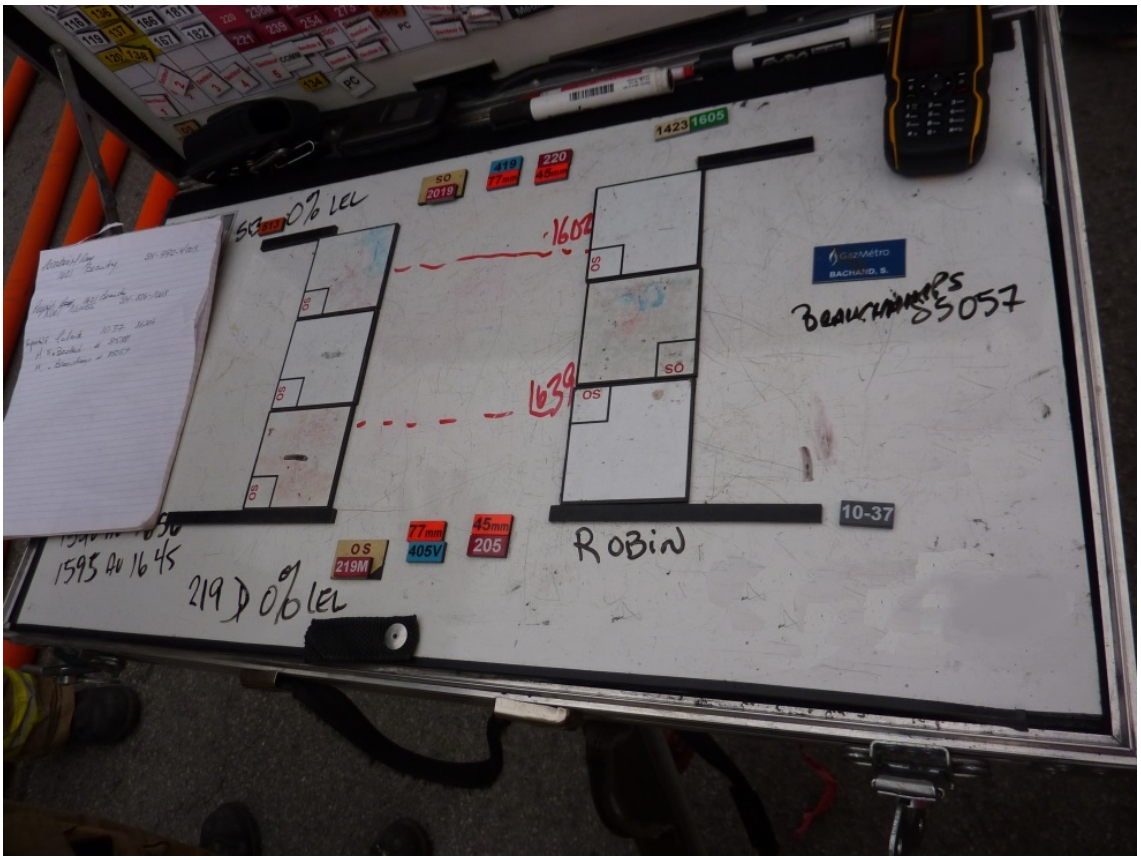


Figure 5.4 : Table du poste de commandement des services de la SIM (source personnelle)

C'est avec l'appui des pompiers, placés en soutien pour une éventuelle intervention en cas d'explosion, que les services d'intervention d'urgence de Gaz Métro ont commencé leur progression vers la fuite de gaz. L'alimentation de la conduite endommagée étant coupée, il était tout de même nécessaire de vérifier si les concentrations dans les habitations voisines étaient sécuritaires. En effet, si la concentration de gaz dans l'air se situe entre 5 et 15% et qu'une source d'ignition est présente, le gaz peut s'enflammer et causer un incendie voir une explosion dans certaines conditions particulières. À cela, il est également important d'ajouter les risques d'intoxication mettant en danger la santé des citoyens et des résidents.

5.1.3 **Les causes du bris**

L'entreprise d'excavation, qui effectuait les travaux de remise en état de la chaussée sur l'avenue Coloniale, avait effectué une demande de localisation auprès de l'organisme spécialisé au Québec – Info Excavation[10]. À la suite de cette demande, les services d'Info Excavation ont transféré cette demande aux différentes sociétés propriétaires d'infrastructures souterraines et présentes sur les lieux des travaux. La localisation de leurs réseaux souterrains a été ainsi complétée sous la responsabilité des différents propriétaires. Conformément aux pratiques habituelles, Gaz Métro avait localisé sur les lieux la position des installations gazières afin que l'excavateur puisse procéder en toute sécurité aux travaux prévus. Il est toutefois important de prendre en compte lors d'une excavation **l'aspect tridimensionnel,** et donc de ne pas oublier la profondeur à laquelle est enterrée la conduite. Ainsi, dans le cas à l'enquête, bien que les marquages de peinture au sol aient été effectués correctement, la profondeur à laquelle se situait la conduite était inconnue de la part des équipes d'excavation au moment du bris. En effet, les plans de localisation n'avaient pas été amenés sur le chantier, mais avaient été oubliés dans les bureaux. L'excavation avait donc été réalisée **« à l'aveugle »** comme le stipule le rapport d'intervention. La pelle mécanique a heurté l'infrastructure gazière, ce qui a provoqué une interruption de service de gaz pour **9 clients de Gaz Métro** présents dans le secteur.

5.1.4 **Les divers coûts engendrés**

À la suite de cet évènement, une réclamation a été déposée par l'entreprise Gaz Métro à l'encontre de la ville de Montréal. Comme pour une grande majorité des réclamations, elle a été reçue dans un premier temps par les services des réclamations de la ville de Montréal. Cette particularité repose sur les conditions de procédure d'une réclamation. En effet, toute réclamation mettant en cause la ville de Montréal doit être déposée au cours des 10 jours ouvrables suivant le bris. Si tel n'est pas le cas, la réclamation sera rejetée. Afin de se protéger en cas de responsabilité de la ville, Gaz Métro a donc transféré sa réclamation aux services de la ville. Ce n'est qu'une fois la non-implication de la municipalité avérée que la réclamation a été transmise à l'entreprise d'excavation.

---

[10] Mentionné dans le rapport d'intervention des équipes de Gaz Métro

5.1.5 **Coûts directs**

Dans cette partie, nous allons répertorier l'ensemble des coûts liés à la réparation de la fuite de gaz qui apparurent dans la réclamation déposée par Gaz Métro. Dans un premier temps, ce type de coûts est absorbé par l'entreprise de distribution de gaz. Cependant, si Gaz Métro considère que sa responsabilité n'est pas engagée dans le bris, l'entreprise se retourne alors vers l'excavateur qu'elle juge fautif afin que les coûts dus lui soient remboursés et que le préjudice subi soit réparé.

Les coûts directs facturés par Gaz Métro pour les bris de conduite de gaz se répartissent en 3 catégories :

- La main d'œuvre nécessaire sur place ainsi que le matériel utilisé
- Les matériaux utilisés pour la réfection des infrastructures
- Les coûts administratifs pour l'ensemble de la gestion du dossier

5.1.5.1 **Les coûts de la main d'œuvre et des équipements**

Dans un premier temps, une estimation de la main d'œuvre mise à disposition (service d'urgence ainsi que les équipes de remise en état) est faite. Ce poste budgétaire constitue le plus élevé, compte tenu du nombre important de personnes nécessaires pour les interventions en raison du risque généré par les conditions de travail. En cas d'intervention, au moins 3 personnes de Gaz Métro sont dépêchées sur les lieux, un superviseur auquel il convient d'ajouter deux opérateurs effectuant les mesures dans la « zone chaude ». Cette dernière correspond à la zone à l'intérieur de laquelle le risque d'explosion est élevé et où les dommages matériels ainsi que les dangers pour les personnes seraient importants.

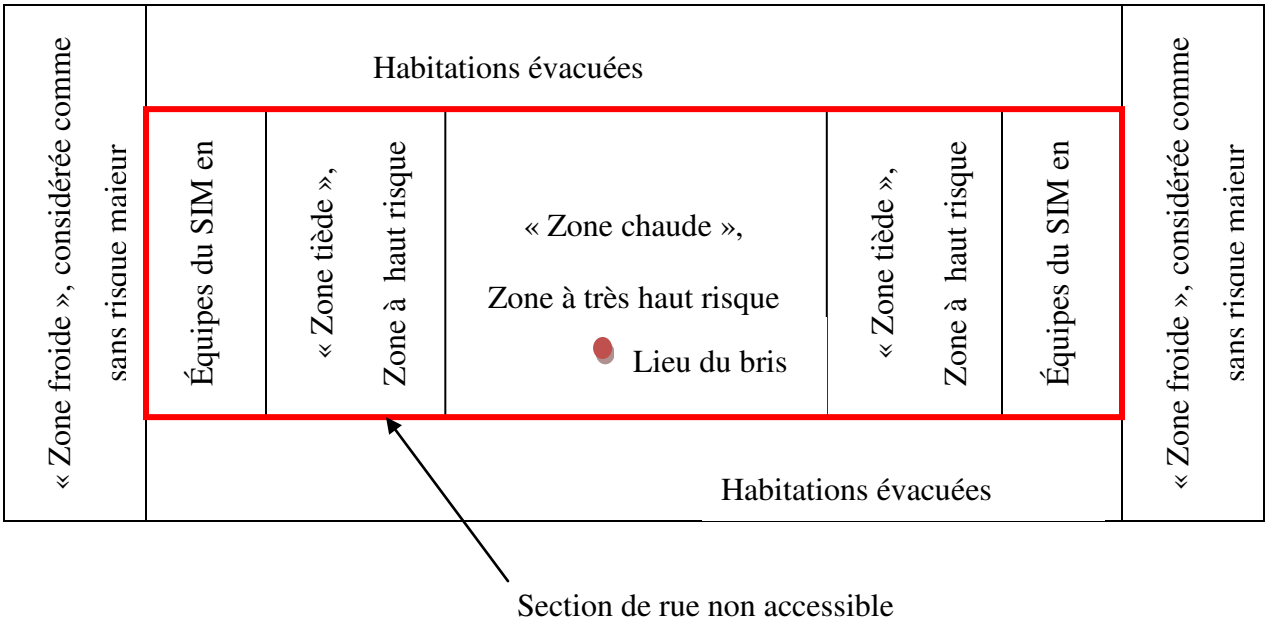


Figure 5.5 : Disposition type des équipes d'intervention lors d'un bris de gaz

A cela, il est également important d'inclure **les coûts d'entretien** des véhicules, les coûts du **renouvellement du parc automobile** des véhicules d'intervention[11] et les coûts du matériel spécialisé utilisé durant ces interventions. Au sein de ces coûts on peut retrouver par exemple des coûts totalement externes à l'entreprise, tels que l'appel d'un serrurier lorsque les équipes d'urgence doivent s'introduire à l'intérieur d'un logement ou encore la sollicitation d'une entreprise de remorquage afin de permettre un meilleur accès à la zone considérée.

Ainsi, pour cette intervention, ce sont 5 employés de Gaz Métro (1 chef de groupe et 4 techniciens) qui ont été dépêchés sur les lieux.

5.1.5.2 **Les coûts des matériaux**

Cette catégorie de coût est généralement la moins dispendieuse, correspondant dans la plupart des cas au coût des matériaux de remplacement, ici une canalisation en polyéthylène. En effet, la

[11] Les véhicules d'intervention doivent être remplacé régulièrement afin d'assurer les meilleurs résultats possibles, tant d'un point de vue performance que sécurité lors des interventions

majorité des cas de bris d'infrastructures sont des petits bris touchant des canalisations en polyéthylène, peu coûteuses, mais fragiles.

Figure 5.6 : véhicule d'intervention de Gaz Métro (source personnelle)

5.1.5.3 **Les coûts administratifs**

Dans cette section est regroupé l'ensemble des coûts reliés à la gestion du dossier. Ils correspondent aux coûts liés à la constitution et au suivi du dossier de réclamation mis en place par Gaz Métro et au suivi de ce dernier. Ils peuvent éventuellement lors de réclamations importantes absorber d'autres coûts, tels que les prestations d'experts ou de juristes externes.

5.1.5.4 **Bilan des coûts directs**

Pour le bris survenu sur l'avenue coloniale, les coûts directs se sont ainsi répartis de la façon suivante :

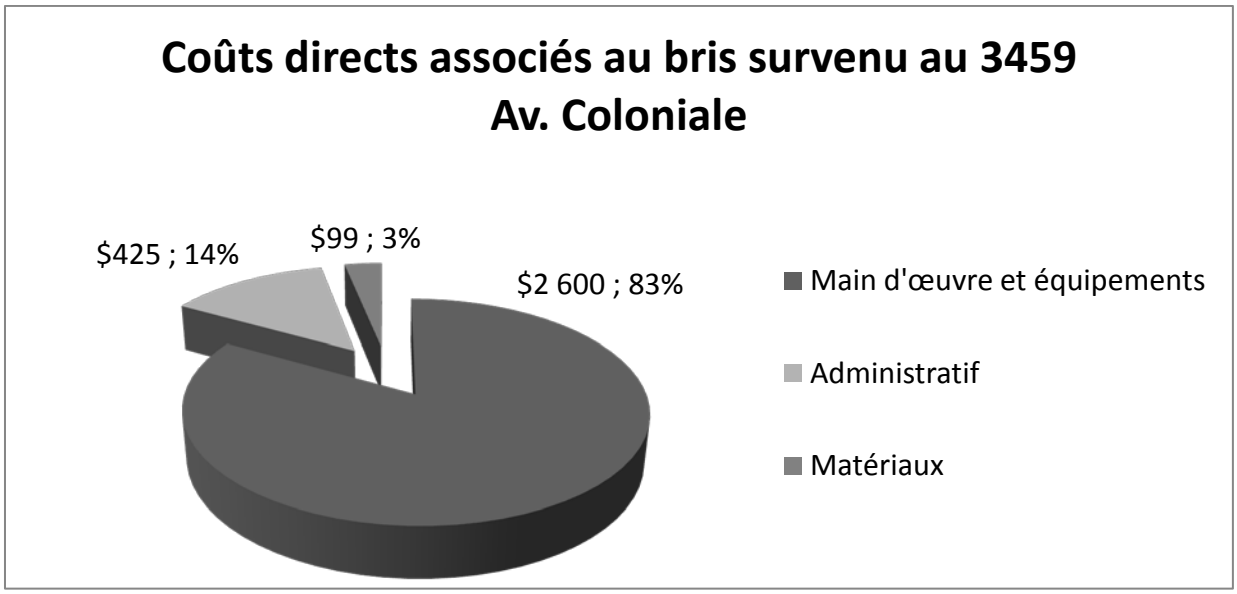


Figure 5.7 : Coûts directs associés au bris survenu au 3459 Avenue Coloniale (GazMétro, 2012)

On remarque ici que la plus grosse part des coûts est due à la main d'œuvre utilisée sur place. En effet, le retour à la situation initiale durant plusieurs heures, il n'est pas étonnant de voir ce coût s'élever à 83% de la facture totale. Finalement, **le coût total facturé** de la part de Gaz Métro à l'entreprise excavatrice s'élève à :

Tableau 5.1 : Coûts directs du bris de conduite de gaz facturés par Gaz Métro

Coûts directs du bris de conduite de gaz	Montant
Coûts directs totaux	3 124 $
Coûts de main-d'œuvre et des équipements	2 600 $
Coûts administratifs	425 $
Coûts des matériaux	99 $

Il est important de noter que d'après une base de données fournie par les services de Gaz Métro, le montant de cette facture est du même ordre de grandeur que la majorité des cas de bris répertoriés par l'entreprise.

5.1.6 Coûts indirects

Il devient à présent intéressant de se pencher sur les coûts indirects qu'un tel bris peut engendrer. Comme nous avons pu l'appréhender au sein de la revue de littérature, nous savons qu'une intervention de ce type peut être à l'origine de **nombreuses perturbations** et donc de nombreux coûts pour la société, que cela se répercute au niveau de la ville, des commerçants ou des citoyens environnants.

Nous allons à présent aborder chronologiquement les différents coûts rattachés aux différentes interventions ayant eu lieu le 6 novembre 2012.

5.1.6.1 Le Service de sécurité Incendie de Montréal

Le premier service qui a été présent sur les lieux, si l'on exclut Gaz Métro, a été le SIM. Il s'agissait ici d'une intervention de type 10-09 pour une catégorie 3. Cela correspond à une fuite de gaz en milieu résidentiel avec demande d'un premier niveau de renforts en comparaison avec le niveau d'alerte de base. Immédiatement, les véhicules présents et disponibles aux alentours ont été dépêchés sur les lieux. Ainsi, 4 chefs aux opérations (superviseurs lors des interventions), 7 autopompes, 2 véhicules d'élévation, et 2 camions d'assistance ont été sollicités. Dans ce genre d'opération, la difficulté est de sécuriser la zone dans son intégralité. Pour cela, il est indispensable de bloquer les 2 côtés de la rue afin que personne ne puisse se rendre dans la « zone chaude » et ainsi mettre **sa santé voir sa vie** en péril. Dans une telle situation, l'ensemble des services doit être d'une certaine façon doublé afin d'assurer la sécurité de part et d'autre de la rue. **Cela représente en tout et pour tout un dispositif de 41 pompiers, présents pendant 1h40 et même jusqu'à 2h30 pour certaines équipes.**

Tout comme pour les alertes incendies non fondées, toute intervention de la part des services du SIM peut être estimée d'un point de vue comptable. Ici, c'est en reprenant les estimations déjà utilisées par le SIM que notre étude se basera.

Afin d'illustrer nos précédents propos, nous proposons un rapide récapitulatif des moyens mis en place par les services de la SIM, tant au niveau des équipements qu'au niveau du personnel mis à disposition.

Tableau 5.2 : Données significatives et coûts allouables au SIM

Catégories	Chiffres clés
Nombre de pompiers	41 personnes
nombre de pompiers prêts à intervenir [12]	37 personnes
Nombre de véhicules	15 véhicules
nombre de véhicules d'intervention	11 véhicules d'intervention
Temps total humain cumulé de l'intervention	88 h et 19 min
Coût total de l'intervention	12 845 $

On remarque donc aisément que les coûts directs de réparation énoncés précédemment dans ce rapport ont été largement dépassés. On note également que les seuls coûts liés au service d'intervention du SIM représentent à eux seuls plus de **4 fois les coûts directs**.

Bien évidemment, il est indéniable **qu'un service pouvant être considéré comme minimum** doit être maintenu en place dans le but d'assurer la sécurité de l'ensemble des citoyens. Cependant, on ne peut nier qu'une sollicitation trop importante des ressources, humaines comme matérielles, représente un coût supplémentaire pour la société. Il est également important d'ajouter les coûts d'opportunité que représentent de telles interventions. En effet, les unités mobilisées sont autant de ressources en moins pour tous les autres types d'intervention. Ces interventions ne font donc **qu'affaiblir le service de sécurité mis en place**. On peut donc

[12] Certains pompiers sont affectés à la gestion des opérations sur place et ne sont pas présents à des fins d'intervention. C'est notamment le cas des différents chefs aux opérations.

conclure qu'un très grand nombre de ressources pourraient être utilisées pour d'autres interventions moins facilement évitables.

Comme dans la majorité des interventions du SIM, ces derniers font appel au **Service de police de la ville de Montréal** (SPVM) afin de les aider dans la protection des citoyens dans un large rayon ainsi que la régulation du trafic routier environnant[13].

5.1.6.2 **Intervention du Service de police de la ville de Montréal (SPVM)**

Quelques minutes après leur arrivée sur les lieux, le SIM a donc demandé l'assistance des équipes du SPVM. Même si, pour ce qui est de la zone d'action proche de l'intervention, c'est-à-dire la zone chaude et la zone froide, la prévention est assurée par les pompiers neutralisant le secteur à risque, le Service de police s'occupe de redistribuer les flux, notamment la circulation des véhicules pour un périmètre plus large. En fonction des aléas, leur travail consiste à réguler l'activité environnante autour de la zone d'intervention tout en réduisant voir en interdisant l'accès à certaines zones proches du lieu du bris.

Mais une **intervention liée au gaz peut très rapidement prendre de l'ampleur**. Et même si cette dernière n'a pas excédé 3 heures, les chiffres suivants nous renseignent sur les moyens mis en place lors de cet évènement :

Tableau 5.3 : Chiffres et coûts liés à l'intervention des services du SPVM

Catégories	Chiffres clés
Nombre total de policiers sollicités	22 personnes
Temps total humain cumulé de l'intervention	22 h et 3 min
Coût total de l'intervention	1 367 $

[13] Communications personnelles avec le SIM

Une fois encore, il est important de préciser, tout comme il l'a été fait pour le SIM, que les ressources mises à disposition pour ce bris existaient de toute façon. Cependant, ces unités étaient probablement allouées à d'autres taches.

Le total s'élève donc à plus de 14 000 dollars en prenant uniquement en compte les services de sécurité de première urgence ce qui représente plus de 4 fois et demie les coûts directs facturés par Gaz Métro.

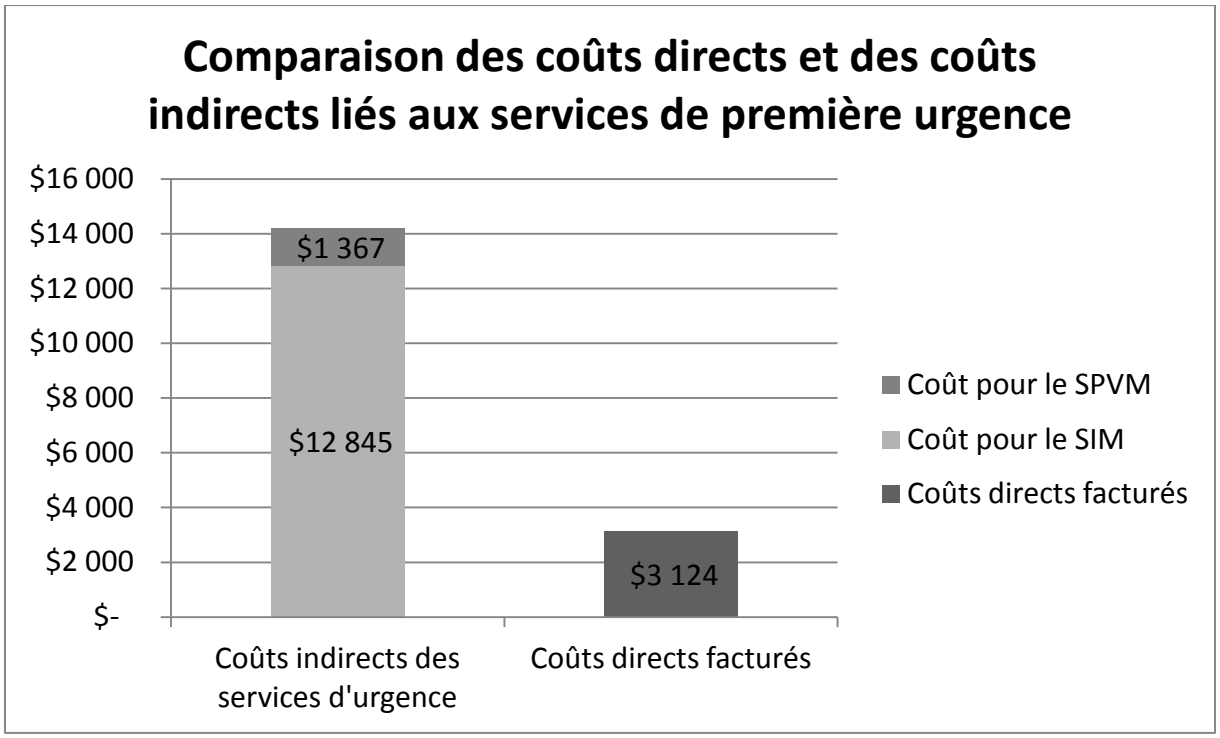


Figure 5.8 : Comparaison des coûts directs avec les coûts indirects liés aux services de première urgence

5.1.6.3 **Coûts liés aux diverses interruptions de services**

Un autre point important à prendre en compte est l'interruption de plusieurs services pour les utilisateurs. En effet, que cela soit au niveau du service de gaz ou d'électricité, tout cela peut être estimé et chiffré.

5.1.6.3.1 Interruption du service de transport en commun de la ville de Montréal

La particularité de ce cas réside en partie dans sa localisation. En effet, le numéro 3459 de l'avenue Coloniale à Montréal, entre les rues Sherbrooke et Prince-Arthur, se situe dans une **section de rue exigüe**. Cette portion, à sens unique, n'accueille aucune ligne de bus et aucune sortie de station de métro. Cependant, même si ce n'est pas le cas dans notre étude, il arrive parfois que les services de transport soient également touchés par ce genre de bris, amplifiant encore les coûts indirects totaux. Car même en supposant qu'un autobus d'une société de transport telle que la STM (Société de Transport de la ville de Montréal) ne soit rempli qu'en partie, le nombre de personnes impactées peut rapidement dépasser 25, entrainant une perte de temps cumulée considérable. À cela, il faut rajouter qu'en cas de congestion, le déplacement d'un autobus ne fait qu'amplifier le phénomène énoncé, sa taille l'empêchant de sortir rapidement de la zone de congestion.

5.1.6.3.2 Interruption des services de gaz et d'électricité

Lors d'une rupture de canalisation, particulièrement pour une conduite principale, toute l'alimentation en aval, et parfois en amont pour des problèmes de sécurité, se retrouve hors service. Or, on sait qu'au Québec, et particulièrement dans les grandes agglomérations telles que Montréal, le gaz naturel est une source d'énergie couramment utilisée.

Nous pouvons extrapoler et considérer qu'une coupure de gaz entraine une coupure du chauffage pour les utilisateurs et donc les foyers touchés. D'après le rapport de Gaz Métro, 30 personnes ont été évacuées durant l'intervention des services d'urgence. Mais nous savons également que 9 foyers ont été touchés par cette interruption de service. On peut donc imaginer que des personnes qui n'ont pas été évacuées ont quand même subi un désagrément, surtout qu'on sait qu'au mois de novembre 2012, dans la région de Montréal, les températures étaient négatives (entre -14,2°C et -8,2°C (Government of Canada & Meteorological Service of Canada, 2013)).

Même si l'incident a touché une canalisation de gaz, par mesure de sécurité, **un déclenchement d'artère** a été décrété par les équipes du SIM afin d'éviter les risques d'ignition du gaz durant l'intervention. Cependant, lorsqu'un déclenchement d'artère est décrété, c'est l'ensemble d'un quartier qui est privé de courant durant le temps de l'intervention (ce qui correspond à plusieurs blocs). Cette coupure, bien que très dérangeante pour les utilisateurs résidentiels, est surtout très préjudiciable pour les commerçants se trouvant dans le secteur considéré. Et bien que la rue soit à forte majorité résidentielle, il n'en reste pas moins qu'elle se situe à quelques dizaines de mètres

du boulevard Saint-Laurent et donne accès à la rue Sherbrooke, deux des principaux axes et zones commerciales de la ville.

Après avoir communiqué avec les services d'Hydro Québec[14], les informations suivantes sur le nombre et le type de clients touchés nous furent communiquées :

Tableau 5.4 : Récapitulatif des clients impactés par la coupure d'électricité due au déclenchement d'artère

Type de client	Nombre
Mineurs	1 201
Moyens	484
Majeurs	35
Total des clients touchés par l'incident	1 720

D'après la même source, nous savons que l'interruption a duré de 11h45 à 13h28, soit plus d'une heure et demie.

D'après l'équation présentée précédemment au chapitre 3, le coût d'une interruption de service électrique se calcule de la façon suivante :

$$\text{Coût d'une interruption de service électrique} = \text{Durée de l'interrutpion (h)} \times \sum_{i=1}^{N} \text{Coût horaire moyen i (\$/h)} \times \text{Nombre de clients i touchés}$$

[14] Principal distributeur d'électricité au Québec

En appliquant le modèle développé dans la méthodologie, les coûts indirects liés à l'interruption de service se chiffrent à 1 031 506 $[15]. Ce montant, qui représente les préjudices subis par les différents utilisateurs du service électrique, est donc plus de 400 fois supérieur aux coûts directs facturés par Gaz Métro et transmis à l'entreprise pour un remboursement.

5.1.6.4 **Réclamations extérieures liées au bris**

Un autre volet important consiste à explorer la partie relative aux réclamations extérieures liées au bris. En effet, lorsqu'un incident survient, il n'est pas rare que les citoyens, résidents et commerçants, déposent des réclamations auprès du bureau des réclamations. Ici, après investigation aux côtés des services spécialisés du bureau des réclamations de la ville de Montréal, il s'est avéré que seule la plainte de Gaz Métro avait été déposée. Les raisons sont variées. La plus probable est qu'aucun commerçant ou habitant n'ait fait le lien entre un quelconque préjudice et la fuite de gaz survenue sur l'avenue Coloniale compte tenu de la localisation du bris et la taille du quadrilatère impacté par la coupure d'électricité.

Le fait est que la réclamation déposée par Gaz Métro se chiffrait à la base à **2500 dollars**. Cependant, cette demande préliminaire basée sur une estimation forfaitaire, fonction du type d'installation touchée fût adressée à la municipalité dans l'éventualité d'une responsabilité de leur part. Cela n'étant pas le cas, la réclamation fût transmise à l'entreprise de travaux.

Ainsi, aucun coût indirect supplémentaire ne s'est ajouté dans le cas du bris survenu sur l'avenue Coloniale. Cependant, il se peut que des sommes d'argent soient réclamées, ce qui le cas échéant augmenterait la part des coûts indirects dans la facture totale liée au bris.

5.1.6.5 **Préjudices et autres coûts**

Contrairement à de nombreux autres bris d'infrastructures souterraines, on ne peut imputer à celui-ci d'autres coûts que ceux énoncés précédemment. En effet, étant donné que des travaux de

---

[15] Ce montant n'inclus pas les pertes de chiffre d'affaires de la compagnie de production ou de distribution d'énergie électrique liées à une perturbation de la demande.

longue date étaient déjà en cours sur les lieux (ce sont d'ailleurs ces travaux qui sont à l'origine du bris), **les coûts générés par le bris lui-même ne représentent pas d'augmentation des coûts de congestion, de pollution sonore ou de pollution visuelle, ces derniers étant présents à cause des travaux**.

Les seuls coûts éventuels que nous pourrions prendre en compte seraient ceux dus **aux délais** que le bris a entrainés sur le déroulement des travaux de construction pour les autres entreprises que l'entreprise d'excavation. Mais étant donné la taille du chantier (la quasi-totalité de la rue), on peut considérer qu'il n'y a pas eu d'impact réel de ce bris sur le **délai total du projet.**

On pourrait également ajouter d'autres coûts auxquels on ne pense pas dans un premier temps, mais qui sont pourtant bien réels. Parmi ces coûts, l'un des plus importants représente **les coûts de déplacement des véhicules.** Dans des cas similaires à celui survenu sur l'avenue Coloniale, il a parfois été nécessaire de déplacer des véhicules afin de permettre l'accès pour les services d'intervention de Gaz Métro et du SIM. Dans ces cas-là, une entreprise de remorquage est sollicitée et cela généralement **aux frais à la charge de la municipalité**. On remarque donc une fois encore que les coûts indirects liés à un bris d'infrastructures souterraines peuvent s'étendre à de nombreux niveaux et ainsi représenter de très importantes sommes.

5.1.7 Conclusion

Nous pouvons dire que le bris survenu le 6 novembre 2012 au 3459 de l'avenue Coloniale à Montréal montre assez bien les coûts indirects présents lors d'un bris d'infrastructure gazière souterraine dans un milieu à forte densité résidentielle. Lorsqu'on récapitule l'ensemble des coûts directs et indirects qui sont reliés à ce bris, le constat est le suivant :

Tableau 5.5 : Estimation du coût total d'un bris de conduite de gaz dans une artère résidentielle

Coûts	Montant	Pourcentage du montant total
Coûts indirects totaux	1 045 718 $	99,70 %
Coût pour le SIM	12 845 $	1,22 %
Coût pour le SPVM	1 367 $	0,13 %
Coût de l'interruption de service électrique	1 031 506 $	98,35 %
Coûts directs totaux	3 124 $	0,30 %
Coût total du bris	1 048 842 $	

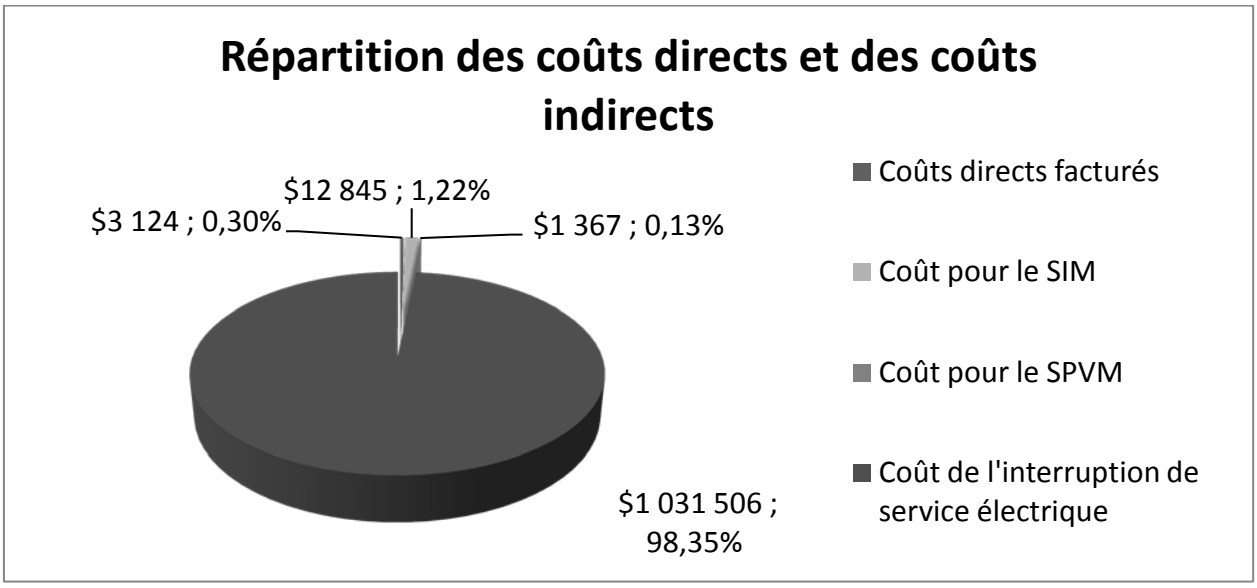


Figure 5.9 : Répartition des coûts directs et des coûts indirects liés au bris d'une canalisation de gaz dans une artère résidentielle

On remarque que la valeur des coûts directs ne représente même pas 0,5% des coûts totaux (directs et indirects), soit 3 124 $, alors que la simple coupure d'électricité correspond à

pratiquement 98,5% des coûts totaux, pour une somme de 1 031 506 $. De plus, l'absence d'un certain nombre de coûts indirects additionnels (congestion non présente, pas de transport en commun, etc.) nous permet d'estimer assez convenablement le coût minimum que représente un bris de gaz pour la société. Le fait est que pour cette intervention, seuls 3 124 $ sur 1 048 842 $ ont été payés, laissant à la société 1 045 718 $ à sa charge, soit 99,70 % du montant total. Ces estimations sont cependant à considérer avec un certain nombre de réserves. Tout d'abord, il est nécessaire de noter le caractère temporel de cette estimation. En effet, il est possible qu'une partie de ces 1 031 506 dollars n'ait pas été totalement perdue. Si on considère qu'une partie de l'activité économique de la zone touchée a été déplacée vers les zones environnantes et qu'une autre partie de cette même activité économique a eu lieu quelques heures après l'accident, on peut envisager une réduction des coûts liés à l'interruption du service électrique. Cependant, la majorité des coûts étant liés au nombre important de foyers touchés durant l'interruption de service, ce coût restera très important et bien supérieur aux coûts directs reliés au bris de la canalisation de gaz.

Le problème de ce genre de bris n'est pas le coût qu'il représente de façon individuelle. En prenant en compte les statistiques annuelles liées aux fuites de gaz majeures à Montréal, on remarque qu'entre 2009 et 2011, le nombre de fuites majeures est passé de 390 à 414, les données de 2012 restant sur la même tendance (voir annexe E). On peut ainsi envisager un coût total annuel important pour tout ce qui concerne les coûts indirects liés à des bris d'infrastructures **gazières souterraines**.

5.2 Bris d'infrastructure souterraine de télécommunication, le cas du câble de télécommunication de la compagnie Bell au niveau du croisement Jean Talon – Côte-des-Neiges à Montréal

Au croisement fréquemment emprunté à Montréal, le cas du bris de câble de télécommunication sur la rue Jean Talon permettra d'étudiant entre autres les effets d'un bris d'infrastructure souterraine sur le trafic automobile.

5.2.1 Localisation du bris

Placée au croisement de la rue Jean Talon Ouest, des Chemins de la Côte-des-Neiges et Saint Clare et du boulevard Laird, l'intersection où a eu lieu le bris du câble de télécommunication est un carrefour important en ce qui concerne la circulation automobile à Montréal. Chaque jour, 4800 véhicules circulent de l'Ouest vers l'Est sur la rue Jean Talon aux heures de pointe. Si l'on regarde plus largement cette intersection, ce sont près de 14 000 véhicules qui traversent chaque jour cette intersection aux heures de pointe (Ville de Montréal, 2013).

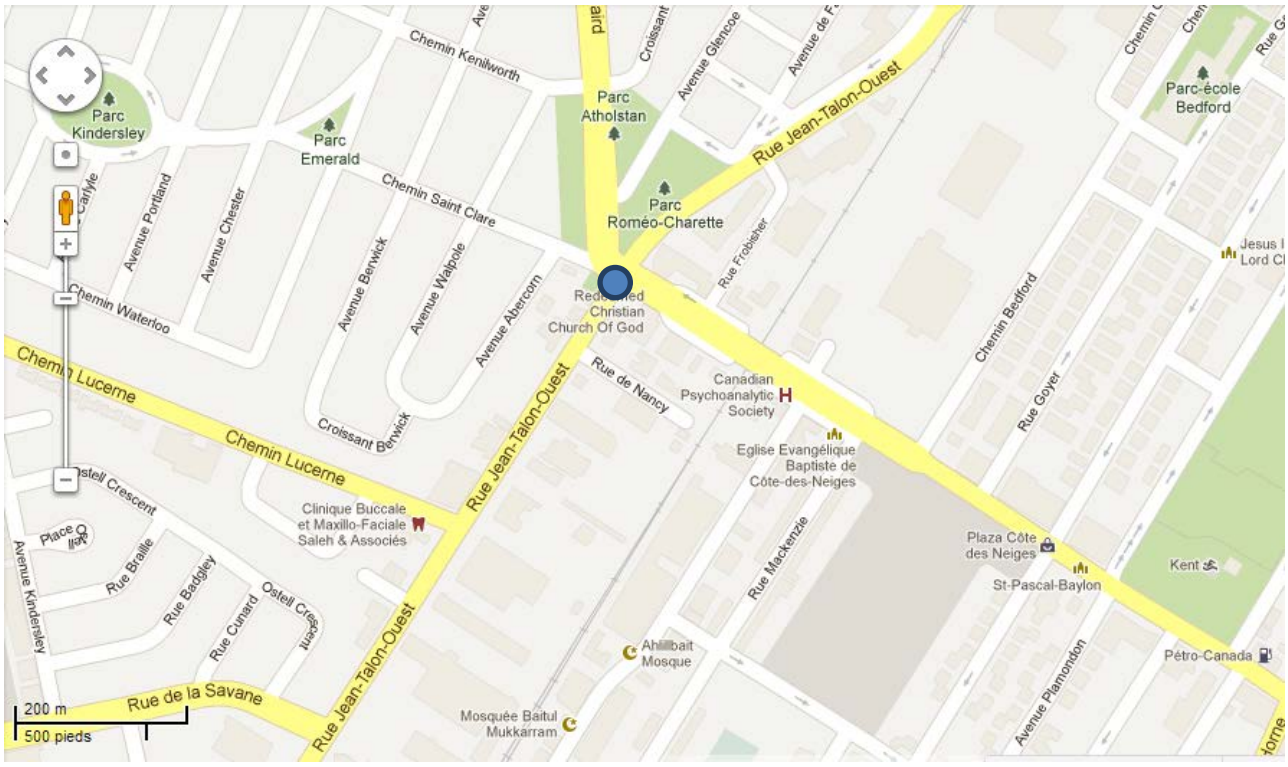


Figure 5.10 : Croisement Rue Jean-Talon-Ouest – Côte-des-Neiges (Montréal) (source : Google Maps)

Cependant, outre le fait que cet axe soit une voie assez communément empruntée, cette zone présente certaines particularités, notamment celle d'abriter de nombreux commerces. Et parmi ces commerces, en plus de compter des agences de location, des services spécialisés (carrossier, détaillant de pièces automobiles, etc.) ou encore des restaurants, il y a aussi un certain nombre de concessionnaires de voitures de luxe. Ces particularités seront à prendre en compte lors de l'évaluation des coûts. Après une brève description du bris, nous étudierons dans une seconde partie les impacts qui sont survenus en raison de ce bris, notamment sur la circulation et sur les commerces environnants.

5.2.2 **Les circonstances du bris**

Le bris est survenu le samedi 13 octobre 2012 aux alentours de 14h00, lorsqu'une entreprise d'excavation effectuait des travaux de forage sur la rue Jean Talon. Bien que l'excavateur a suivi les pratiques requises avant d'excaver (contacter préalablement le service d'Info-Excavation pour connaitre la localisation des infrastructures souterraines locales et se référer aux plans communiqués par les propriétaires d'infrastructures souterraines) ce dernier a heurté un câble de la compagnie de télécommunications Bell présent sous la chaussée. En raison de la fragilité de ce genre d'installations de télécommunications (des câbles de fibre optique), ces dernières ont immédiatement rompu lors du contact avec les machineries excavatrices, entrainant la coupure instantanée des services de Bell pour les clients environnants du quartier.

Ce bris a donc obligé la compagnie Bell à mettre en place un service de réparation d'urgence dans le but premier de fournir à nouveau et dans les plus brefs délais un service convenable à ses clients, mais également de remplacer l'infrastructure sectionnée. Cependant, cette remise en état ne pouvait se faire aussi simplement et aussi rapidement qu'espéré. Avant de lancer toute opération de réparation, il est nécessaire pour l'entreprise d'obtenir un permis d'entrave auprès de la ville de Montréal. Une fois ce permis d'entrave obtenu, Bell a ainsi pu commencer la remise en état de son réseau en remplaçant la partie sectionnée. Mais un problème majeur s'est présenté lors de cette remise en état. La zone de travail se situait en plein milieu de la rue Jalon Talon, juste avant le feu de signalisation situé au sud-ouest du croisement du Chemin de la Côte-des-Neiges.

5.2.3 **Les coûts directs du bris**

Le tout premier impact monétaire à prendre en compte est bien évidemment le cout de remplacement des infrastructures touchées, à savoir les câbles de télécommunication. Une opération de ce type nécessite différentes ressources, qu'elles soient humaines ou encore matérielles. Après avoir pris contact avec l'administration de l'entreprise Bell, plusieurs chiffres relatifs à ce bris nous ont été communiqués.

Le premier coût était relatif à la main d'œuvre utilisée pour les travaux. Plusieurs équipes ont été sollicitées pour la remise en état des installations. Cependant, le bris ayant eu lieu le samedi et la situation présentant un certain état d'urgence, les équipes ont travaillé nuit et jour ce qui a occasionné de nombreuses heures supplémentaires. Sur 328 heures travaillées, pratiquement 50% (151 heures) ont ainsi été comptabilisées de cette façon. La main d'œuvre a représenté pour cette intervention environ 61% des coûts totaux de remise en état.

Autres coûts importants, ceux reliés au matériel et aux véhicules automobiles utilisés. Pour une intervention de ce type, il est nécessaire d'avoir recours à du matériel de hautes technologies, très coûteux. Celui-ci, présent dans les camions d'intervention, entraine ainsi l'immobilisation des véhicules et de tout autre matériel présent à l'intérieur de ceux-ci. En raison ce fait, 38% des coûts des travaux ont été associés à cette utilisation ou cette immobilisation de matériel, nécessaire pour la remise en état des infrastructures touchées lors de l'excavation.

Tableau 5.6 : Estimation des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication

Coûts directs	Montants
Coûts de la main d'œuvre	29 600 $
Coûts des matériaux utilisés	15 200 $
Coûts d'utilisation de véhicules spécialisés	3 200 $
Total	48 000 $

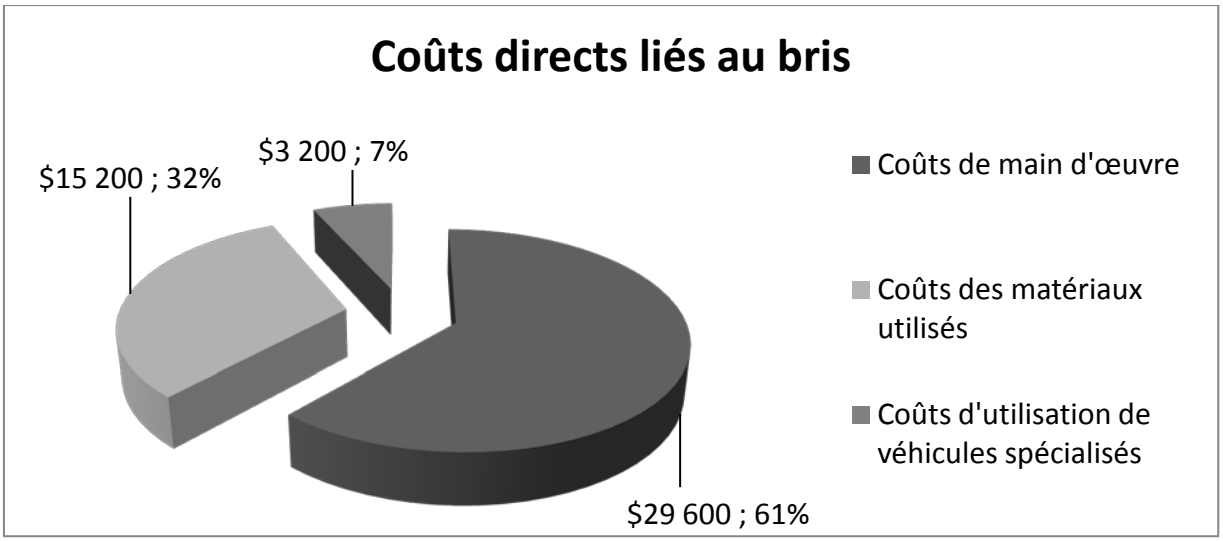


Figure 5.11 : répartition des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication

5.2.4 **Les conséquences du bris et les coûts indirects associés**

5.2.4.1 **Coûts reliés à la perturbation de la circulation**

5.2.4.1.1 Baisses de la sécurité sur la route

Nous savons d'après certaines informations de Bell que la réfection définitive des infrastructures brisées a été complétée le 05 novembre 2012, soit plus de 23 jours (dont 3 semaines complètes) après le bris. Les impacts se sont donc fait ressentir à plusieurs niveaux.

Ce bris a ainsi fortement perturbé la circulation. En effet, la chaussée, à la base constituée de 5 voies de circulation (3 dans le sens ouest-est et 2 dans le sens est-ouest), était réduite d'une voie dans chacun des sens (ne restait alors que 2 pour le parcours ouest-est et 1 pour celui allant d'est en ouest). Ouverte à 50% de ses possibilités, cette artère était donc devenue un point important de congestion (de surcroît, des travaux d'entretien d'une conduite de gaz pour un bâtiment voisin étaient en cours, ce qui réduisait encore un peu plus l'espace disponible pour la circulation). Tous ces éléments se présentaient donc au même moment faisant régner une sorte de désordre général au niveau du croisement considéré. Celui-ci pouvait se remarquer de différentes manières. La première était l'énervement et la tension dégagés par les automobilistes alors pris dans un trafic

dense et quasiment immobile. Ces deux facteurs ont provoqué des actions pour le moins dangereuses de la part de certains individus. Il était ainsi fréquent de remarquer des voitures faire demi-tour en plein milieu de la circulation, sans aucune protection, mettant ainsi les automobilistes empruntant la voie opposée en danger. Il a même été possible de remarquer, lors d'une visite sur les lieux de l'accident, un véhicule ambulancier s'engager sur la voie opposée, une fois encore sans la moindre visibilité. Au-delà du risque pris par le conducteur de l'ambulance vis-à-vis de sa propre santé, ce dernier a également mis en danger la santé des automobilistes se présentant en face de lui (cette partie de la route ne possédant qu'une seule voie de circulation) mais aussi celle des ambulanciers et du patient probablement à bord.

5.2.4.1.2 Coûts liés à la perte de temps

Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette partie de la rue Jean Talon accueille un grand nombre de concessionnaires d'automobiles de luxe. Au premier abord, cela pourrait paraitre secondaire, mais cette information est très importante. Lors de nos venues sur les lieux, nous avons remarqué qu'un grand nombre de voitures de luxe circulaient sur la section impactée par le bris. Ce qui est important de prendre en compte ici, ce n'est pas le fait qu'une telle voiture puisse prendre plus de place, ou que le concessionnaire perde beaucoup de chiffres d'affaires en raison d'une baisse de la clientèle, mais plutôt que le salaire horaire d'une personne possédant une telle voiture n'est pas comparable au salaire moyen de l'ensemble des automobilistes. Compte tenu du nombre assez important de voitures de luxe vues sur les lieux, cette notion est importante.

Plusieurs hypothèses de calcul ont été adoptées dans le calcul des coûts de congestion. Tout d'abord, nous avons considéré le phénomène d'apprentissage. Pour cela, nous avons supposé que le temps d'attente était réduit d'une semaine sur l'autre en raison d'une réduction du trafic total sur cette portion de route. En effet, nous pouvons considérer que jour après jour, les conducteurs réguliers décident un à un d'utiliser un itinéraire différent afin d'éviter ce point de congestion. Également, dans le but de ne pas surestimer la valeur du temps perdu, nous avons pris en compte uniquement la circulation durant les heures de pointe, la perte de temps pouvant alors être assimilée à du temps de travail. Ainsi, aucun trafic durant les fins de semaines ne sera comptabilisé. La perturbation ayant duré 3 semaines, les coûts ont été séparés en 3 temps. Le coût horaire des automobilistes prend en compte plusieurs facteurs, fonction des salaires moyens au

Québec et des différents types de véhicules circulant sur cet axe, mais également des différentes dépréciations dues aux diverses taxes. Les estimations proposées se veulent conservatrices. D'après l'équation de l'estimation du taux horaire en fonction du salaire annuel, nous obtenons les taux horaires suivants :

Tableau 5.7 : composition du trafic sur la rue Jean Talon

Type de véhicule	Part du trafic total	Taux horaire	Justification
Voitures classiques	85%	15,25 $/h	Basé sur le salaire moyen au Québec
Taxi	3%	59,37 $/h	Taux horaire moyen au Québec plus surcoût dû à la tarification du taxi
Camions	10%	41,23 $/h	Réactualisation du coût horaire d'un camion (2012) (**Gourvil & Joubert, 2004**)
Voitures de luxe	2%	46,70 $/h	Basé sur un salaire annuel de 150 000 $

Il nous est à présent possible d'appliquer les formules évoquées précédemment dans le rapport :

Tableau 5.8 : Congestion hebdomadaire sur la rue Jean Talon

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Véhicules impactés	21 000	17 087	15 364	53 452
Temps supplémentaire maximum	8 min	6 min 30 sec	5 min 40 sec	/
Coûts dus à la congestion	58 371 $	38 506 $	31 090 $	127 967 $

Nous pouvons donc conclure que les coûts dus à la congestion sont plus de deux fois supérieurs aux coûts directs, déjà très élevés en raison de l'infrastructure souterraine touchée (concentration de technologies). Ces coûts représentent ainsi la première partie immergée de l'iceberg.

5.2.4.1.3 Coûts reliés aux détours engendrés

Pour les véhicules qui ont emprunté un itinéraire de substitution, il est indéniable qu'une perte de temps est toujours effective. En se basant sur les données du site Google Maps, on observe que le temps de détour minimum s'élève à 5 minutes par trajet. Ainsi, en reprenant les formules précédentes et en prenant en compte ce nouvel aspect, de nouveaux coûts apparaissent. En appliquant les formules développées précédemment, nous obtenons les résultats suivants

Tableau 5.9 : Coûts des détours dus au bris de la rue Jean Talon

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Véhicules impactés	2 340	6 253	7 975	16 568
Coûts dus aux détours	4 493 $	12 006 $	15 313 $	31 090 $

Cela donne donc d'un point de vue comptable final :

$$\text{Coûts totaux pour les automobilistes} = \text{Coûts dus à la congestion} + \text{Coûts dus aux détours}$$

Tableau 5.10 : Récapitulatif des coûts horaires des automobilistes dus au bris

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts dus à la perte de temps totale	62 864 $	50 512 $	46 403 $	159 779 $
Coûts dus à la perte de temps (congestion)	58 371 $	38 506 $	31 090 $	127 967 $
Coûts dus à la perte de temps (détours)	4 493 $	12 006 $	15 313 $	31 812 $

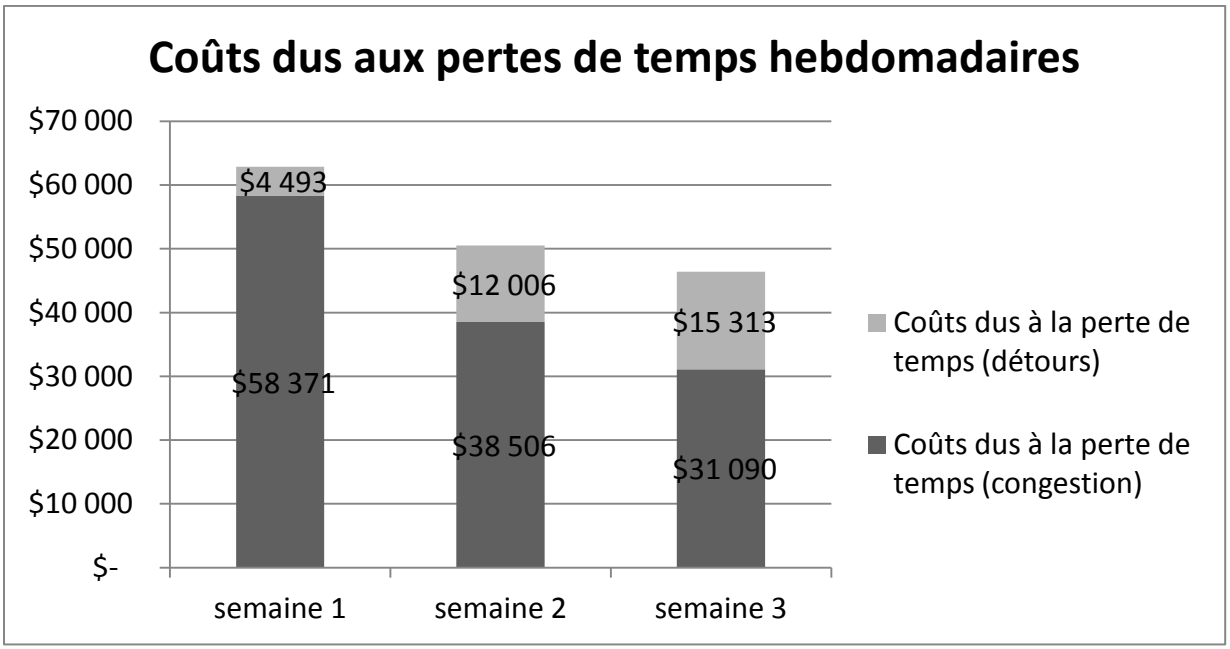


Figure 5.12 : Comparaison des coûts dus à la perte de temps pour les automobilistes

On remarque donc que les coûts indirects dus à la congestion et aux détours représentent à eux seuls plus de 3 fois et demie les coûts directs liés à la réparation.

5.2.4.1.4 Coûts liés à la surconsommation des véhicules

Un autre point important pour une congestion et des détours d'une telle ampleur est celui lié à la surconsommation des véhicules. Cette surconsommation peut dans un premier temps être séparée selon deux grandes causes. La première, évidente, est celle liée aux détours occasionnés. Mais celle-ci s'accompagne d'une surconsommation due à la conduite en situation de congestion. En ce qui concerne la distance parcourue par les automobilistes, une inévitable hausse de la consommation s'en découle. Ainsi, au fur et à mesure du temps, le fait de voir de plus en plus de véhicules emprunter un parcours de substitution va entrainer une hausse croissante de la consommation de carburant.

Ainsi, en prenant comme hypothèse une vitesse moyenne de 40km/h entrainant une consommation de 0,08 litre par kilomètre, avec une augmentation de parcours minimum de 1 kilomètre et avec un prix moyen du carburant avoisinant les 130 cents par litre, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 5.11 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (détours)

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts dus à la surconsommation (détours)	244 $	650 $	829 $	1 723 $

Cependant, il est également important de prendre en compte les coûts dus à la surconsommation liée à une conduite en situation de congestion. Les accélérations et décélérations à bas régime ainsi que le changement fréquent de rapport de vitesse entrainent une augmentation importante de la consommation instantanée. Ainsi, en reprenant les données énoncées précédemment dans ce rapport, et en l'adaptant à notre étude de cas, les résultats obtenus sont :

Tableau 5.12 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (congestion)

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts dus à la surconsommation (congestion)	1 351 $	1 100 $	989 $	3 440 $

En faisant un rapide récapitulatif, nous pouvons établir une première estimation du coût que représente la surconsommation lors du bris survenu sur la rue Jean Talon :

Tableau 5.13 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (totaux)

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts totaux dus à la surconsommation	1 595 $	1 750 $	1 818 $	5 163 $

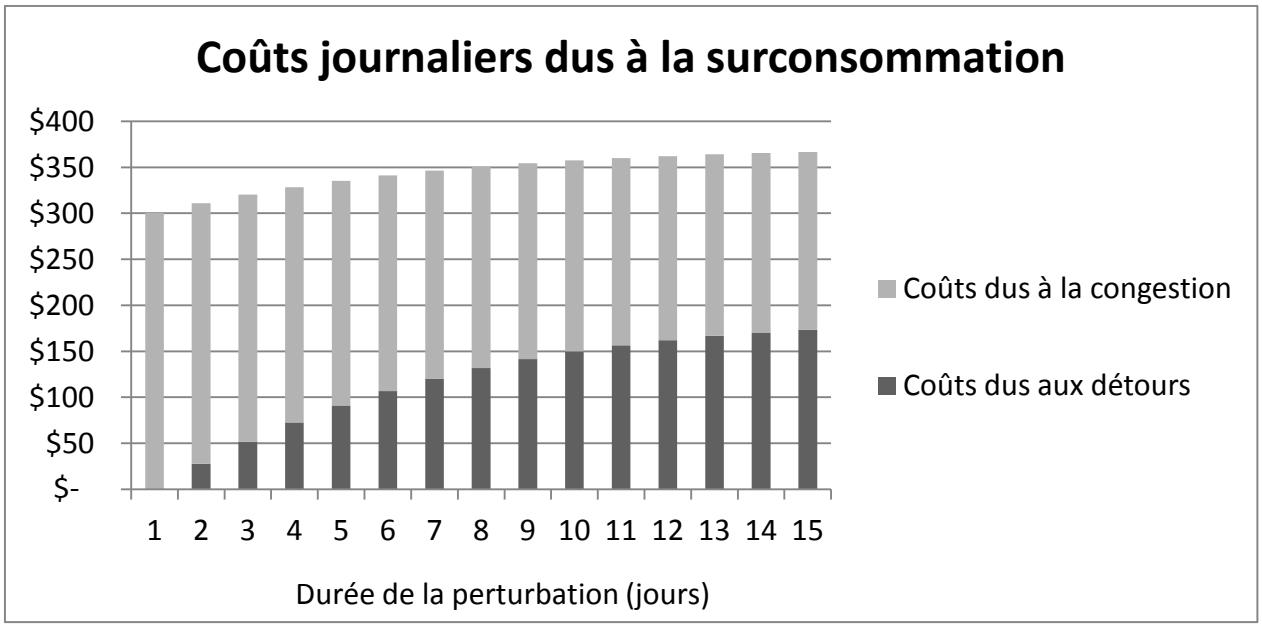


Figure 5.13 : Évolution quotidienne des coûts de surconsommation

On remarque que les coûts dus aux détours augmentent plus rapidement que ceux dus à la congestion ne diminuent. Cela résulte du fait que, même si l'automobiliste perd plus de temps dans une situation de congestion, le fait de parcourir une distance plus importante fait augmenter rapidement sa consommation de carburant.

5.2.4.1.5 Les coûts de pollution

Avec la surconsommation viennent s'ajouter des coûts dus à la pollution générée par ce surplus de carburant consommé. Entre le dioxyde de carbone, les SOx ou les autres particules mobiles, la liste des produits émis est longue et diverse. Nous allons donc utiliser la méthode que nous vous avons proposée dans la première partie du rapport afin de calculer les coûts que représentent les particules émises ainsi que les gaz à effet de serre.

Nous avons calculé dans la partie précédente que la surconsommation était à la base de coûts atteignant 5 163 $. En considérant le ratio déterminé précédemment, nous obtenons la formule suivante :

$$\text{Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz à effet de serre}$$
$$= \text{Coût de la surconsommation total} \times \frac{\text{Pourcentage des coûts attribuables aux diverses émissions}}{\text{Pourcentage des coûts attribuables à la surconsommation total}} =$$
$$= 5\,163 \times \frac{(0{,}8 + 0{,}4)}{1{,}4} = 4\,425\ \$$$

On remarque ainsi que les simples coûts liés aux matières polluantes représentent à elles seules pratiquement 10% des coûts directs en ce qui concerne ce bris d'infrastructure.

5.2.4.1.6 Coûts liés à l'utilisation accrue des véhicules

Un dernier point à aborder en ce qui concerne les automobiles est l'utilisation accrue des véhicules. Dans cette partie, nous ne prendrons pas en compte l'usage prématuré des véhicules victimes de la congestion, notamment pour leur boite de vitesses, mais uniquement pour les véhicules ayant emprunté un parcours de substitution.

Ainsi, en réutilisant les hypothèses précédentes et en supposant un coût d'utilisation de 13,3 cents par véhicule et par kilomètres (12% de camions et 88% de voitures), nous obtenons le profil suivant :

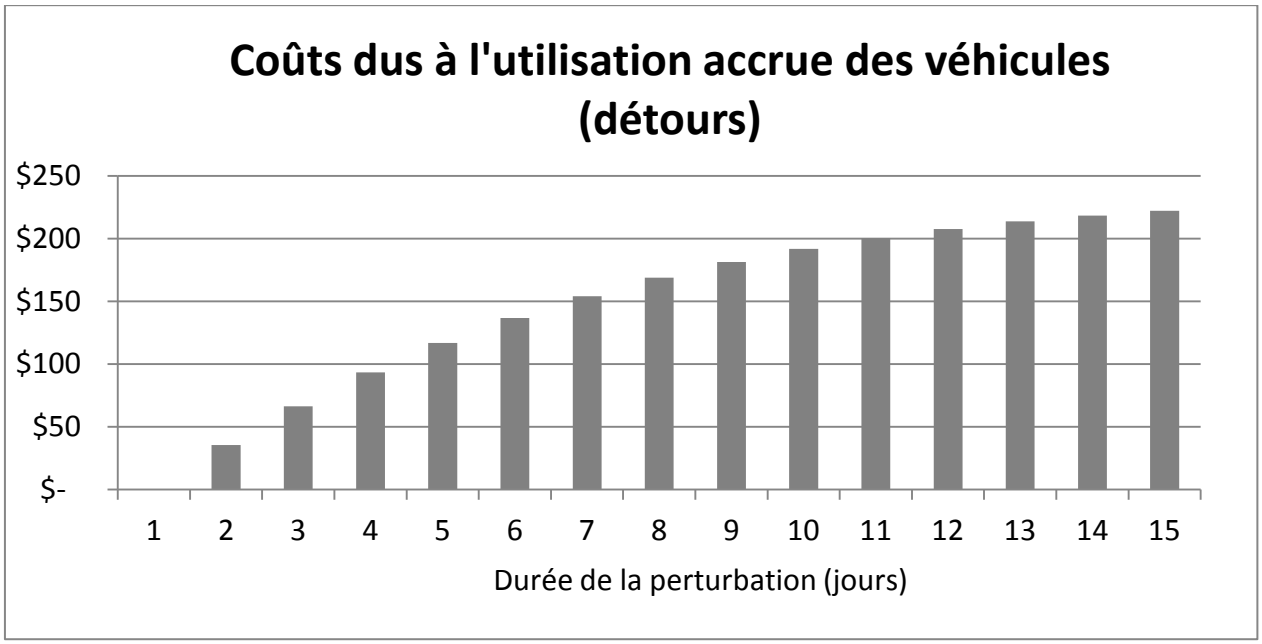


Figure 5.14 : Coûts de détours quotidiens de sur-utilisation des véhicules

On remarque ainsi que le coût d'utilisation global des véhicules suit la même évolution que le coût dû à la surconsommation des véhicules due aux détours, le nombre de véhicules impactés étant le même.

5.2.4.2 **Les coûts reliés à la sécurisation des lieux du bris**

Nous remarquons que certains services sont également nécessaires afin d'assurer un minimum de sécurité sur les lieux du bris. Comme nous pouvons le voir sur les photos suivantes, une grande quantité de matériel de signalisation est nécessaire afin d'assurer la sécurité des équipes de travail, mais également des automobilistes sur les lieux du bris. Les blocs et les plots de signalisation étaient ainsi présents de part et d'autre de la chaussée. Cependant, en plus de la location longue durée de ces équipements (plus de 3 semaines), du personnel a dû être employé afin de positionner l'ensemble de ce matériel. La manutention des blocs de béton notamment est à l'origine de la facture finale très élevée.

Figure 5.15 : L'équipe d'intervention de Bell sur la rue Jean Talon (source personnelle)

Ainsi, on constate que le coût total de cette sous-traitance nécessaire à la logistique générale du bris s'élève à 32 000 dollars[16]. Ce montant, représentant les deux tiers des coûts directs, est une étape obligée dans le bon déroulement des opérations et continue de faire croitre la somme des coûts indirects, déjà très importants en raison de la congestion occasionnée.

5.2.4.3 **Récapitulatif des coûts indirects**

Nous pouvons donc établir un premier bilan des coûts indirects occasionnés par le bris des câbles de communication de la compagnie Bell. Ainsi, la répartition principale peut être résumée sur le graphique suivant :

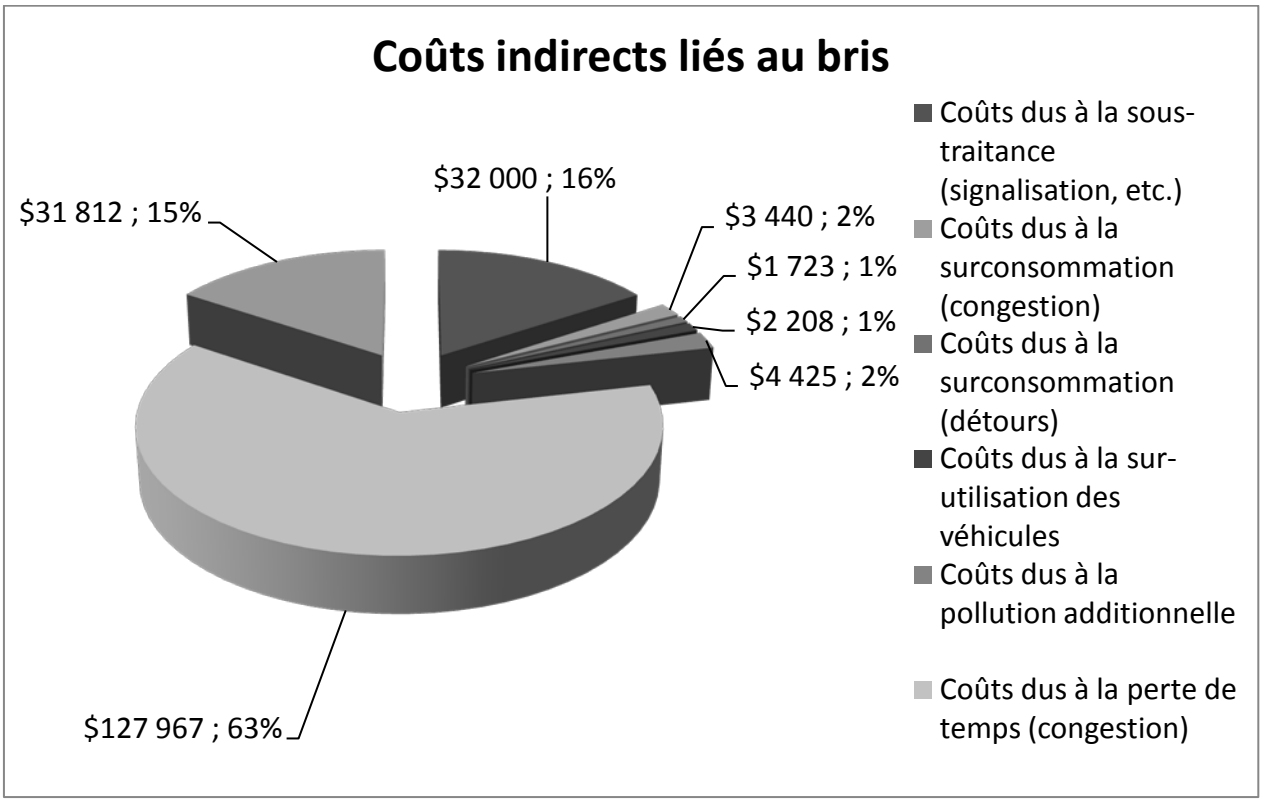


Figure 5.16 : Répartition des coûts indirects liés au bris

Tableau 5.14 : Montants des divers coûts indirects liés au bris

[16] Source : données fournies par Bell

Coûts indirects finaux	203 575 $
Coûts dus à la sous-traitance (signalisation, etc.)	32 000 $
Coûts dus à la surconsommation (congestion)	3 440 $
Coûts dus à la surconsommation (détours)	1 723 $
Coûts dus à la sur-utilisation des véhicules	2 208 $
Coûts dus à la pollution additionnelle	4 425 $
Coûts dus à la perte de temps (congestion)	127 967 $
Coûts dus à la perte de temps (détours)	31 812 $

5.2.4.4 **Autres coûts indirects**

À ces coûts chiffrables, il est primordial d'ajouter qu'il en existe d'autres, très importants, mais pratiquement impossibles à chiffrer. Cela commence par les coûts de réputation. En effet, lors des entrevues que nous avons menées sur place, la majorité des plaintes étaient alors faites contre l'entreprise de télécommunication, alors présente sur place pour la remise en état de ses infrastructures. Pourtant, à première vue, celle-ci ne semble pas être en cause vis-à-vis du bris survenu sur la rue Jean Talon. Un bris d'une telle ampleur représente un réel préjudice pour la compagnie vis-à-vis de la société et de l'opinion que peuvent en avoir les consommateurs.

Il en est de même pour les utilisateurs locaux touchés par le bris pendant pratiquement 6 heures le samedi. Cette coupure de service représente un coût monétaire dérisoire, mais un coût moral important.

Enfin, nous pouvons aborder l'aspect sécurité mis à mal durant l'intervention des services de Bell. Comme nous l'avons mentionné au début de l'étude de cas, la section de route est passée de 3 à 2 voies dans un sens, et de 2 voies à 1 dans l'autre sens. La congestion étant intense, elle a poussé certains comportements au-delà des limites communément acceptables. Il nous a donc été permis de voir des actions telles que l'engagement à contre sens d'un véhicule ambulancier. Ce

genre d'agissements ne représente pas un coût monétaire à proprement parler, mais représente un facteur clé lorsqu'on regarde de façon plus générale les perturbations visibles.

Figure 5.17 : Engagement d'un véhicule ambulancier à contre sens lors des travaux de remise en état sur la rue Jean Talon (source personnelle)

5.2.5 **Conclusions**

Comme nous avons pu le constater tout au long de l'étude de cas, le montant des différents coûts indirects et leur importance vis-à-vis des coûts directs semblent élevés. Pourtant, les coûts directs représentent déjà des montants importants ce qui nous permet de mettre encore plus l'accent sur l'importance du rapport coûts directs/coûts indirects. Ainsi, comme le montre le graphique suivant, ce rapport s'élève à 19% pour les coûts directs contre 81% pour les coûts indirects.

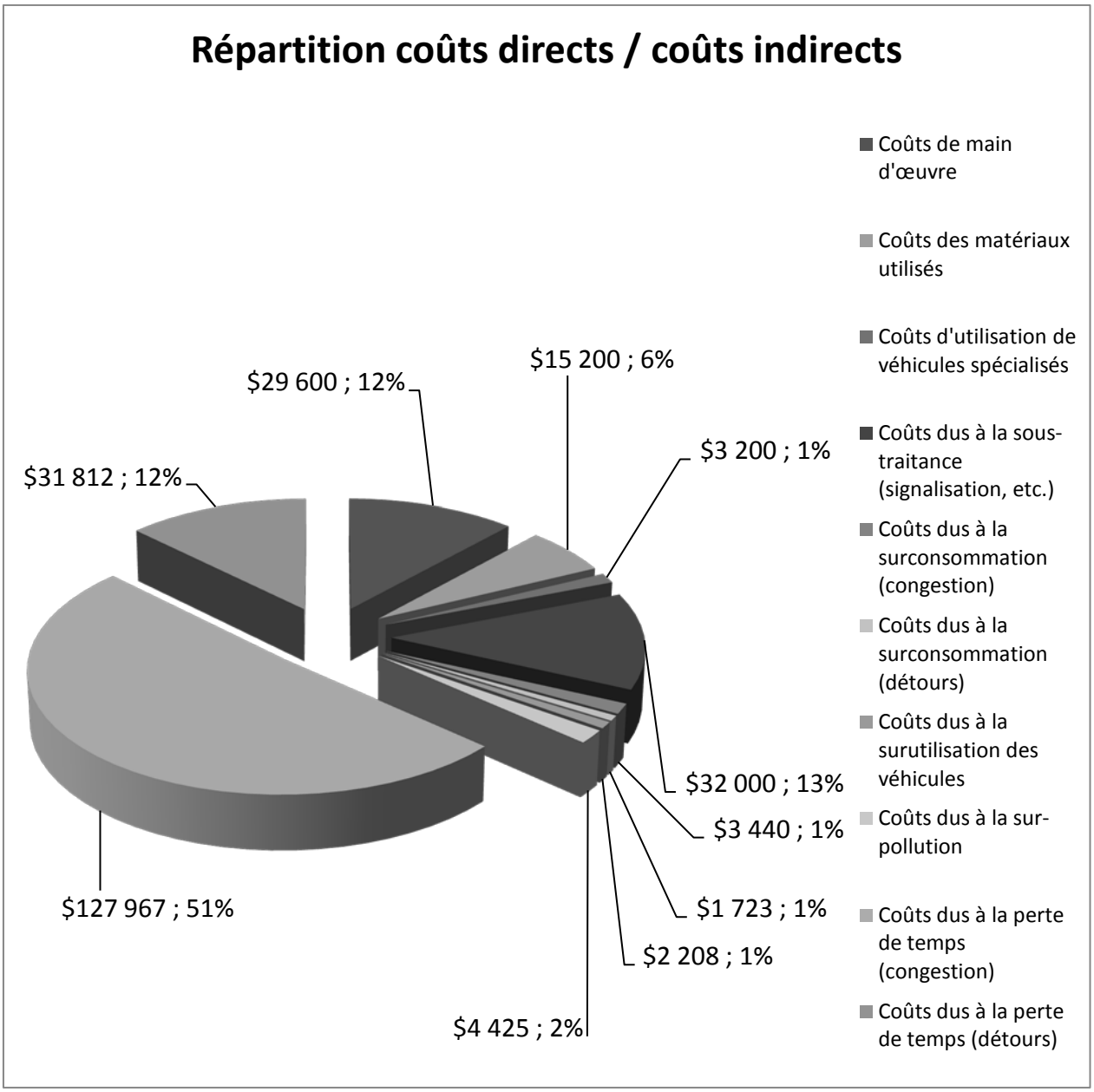


Figure 5.18 : Répartition des coûts directs et indirects du bris survenu sur la rue Jean Talon

La part la plus importante de ces coûts est bien évidemment à attribuer à la congestion, très importante sur cette section de la rue Jean Talon, avec ici, un montant de plus de 127 900 $ soit plus de 51 % du coût total final estimé. Pour autant, les coûts dus aux détours, à la congestion ou encore ceux liés à la sous-traitance ne sont pas en reste et représentent à eux seuls presque 15% de la facture totale, mais également une fois et demie les coûts directs attribuables au bris. Ce

sont donc 203 575 $ qui sont à imputer à des coûts indirects sur une facture finale d'environ 251 575 $ (voir tableau ci-dessous). Ainsi, la répartition CD / CI pour le bris survenu au croisement Jean-Talon Côte-des-Neiges s'élève à 19 % / 81 %.

Tableau 5.15 : Rappel des divers coûts liés au bris

Coûts	Montant	Part de la facture totale
Coûts directs	48 000 $	19 %
Coûts de main-d'œuvre	29 600 $	12 %
Coûts des matériaux de remplacement	15 200 $	6 %
Coûts de l'utilisation des véhicules	3 200 $	1 %
Coûts indirects	203 575 $	81 %
Coûts dus à la sous-traitance (signalisation etc…)	32 000 $	13 %
Coûts dus à la surconsommation (congestion)	3 440 $	1 %
Coûts dus à la surconsommation (détours)	1 723 $	1 %
Coûts dus à la sur-utilisation des véhicules	2 208 $	1 %
Coûts dus à la pollution additionnelle	4 425 $	2 %
Coûts dus à la perte de temps (congestion)	127 967 $	51 %
Coûts dus à la perte de temps (détours)	31 812 $	13 %
Total	251 575 $	

.

5.3 Rupture d'une canalisation d'eau potable du réseau secondaire : bris quasi quotidien sur une artère principale dans l'agglomération de Gatineau

Le bris suivant représente un cas « classique » de bris de canalisation d'eau dans la région de Gatineau. Son étude se pose comme incontournable en ce qui concerne les bris d'infrastructures souterraines.

5.3.1 Localisation du bris

Situé au croisement d'Auvergne – des Flandres à Gatineau, le bris a eu lieu le vendredi 2 mars 2012, dans un quartier très résidentiel. Ce bris n'est pas le premier dans le secteur considéré. Historiquement, entre 1991 et 2012, le croisement fut le lieu d'une dizaine de bris de même type.

Tableau 5.16 : Historique des bris du croisement rue d'Auvergne - rue des Flandres

1991-01-06	1993-05-28	1994-02-28	2003-03-09	2003-03-11
2003-04-27	2003-05-02	2005-04-05	2011-04-11	2012-03-02

Figure 5.19 : Localisation du bris (croisement rue d'Auvergne - rue des Flandres) (source : Google Maps)

On remarque assez aisément sur la photo ci-dessous la présence de nombreuses sections d'asphaltes « raccommodées ». Si celles-ci correspondent aux différents bris survenus durant les dernières années. Il est ainsi plus facile de comprendre les préoccupations de la municipalité de Gatineau quant au problème récurrent de bris d'aqueducs et de canalisations souterraines.

Figure 5.20 : Carrefour où les bris ont eu lieu (source : Google Maps)

Le bris a eu lieu sur une conduite d'eau potable de 200mm de diamètre. La cause de ce bris est la composition géologique du sol dans cette partie de l'Outaouais donnant lieu à un phénomène accru de corrosion sur les conduites souterraines. Ce phénomène de dégradation accrue des conduites, accompagné des bris survenus suite à des accidents d'excavation sont très nombreux dans la municipalité de Gatineau. La ville a connu 243 bris en 2012. Ce chiffre se démarque fortement de celui pour 2011 (187 bris) et marque ainsi une progression de 25%. L'étude de cas que nous allons traiter illustre ainsi clairement un bris pouvant être considéré comme typique et étant récurant pour la ville de Gatineau. Son analyse est importante pour mieux évaluer l'ampleur du problème à Gatineau.

5.3.2 **Déroulement du bris et intervention des services spécialisés : coûts de réparation des infrastructures touchées**

Comme lors de tout bris sur un aqueduc d'eau potable, ce sont les services de l'eau de la ville qui sont en charge de la remise en état des infrastructures souterraines touchées. En dépit de la

localisation du bris, aucun autre service ne sera sollicité (police ou pompiers), la situation n'entrainant pas de mise en danger de la population.

Le bris a nécessité une remise en état des infrastructures, c'est-à-dire de la canalisation, mais également de la chaussée endommagée pour effectuer les travaux. Les coûts peuvent se répartir selon 2 grandes catégories, exposées dans le tableau suivant :

Tableau 5.17 : Coûts directs de remise en état des infrastructures touchées

Nature des coûts directs	Facture
Coût de la main-d'œuvre et des équipements	3 841 $
Coût des matériaux	3 621 $

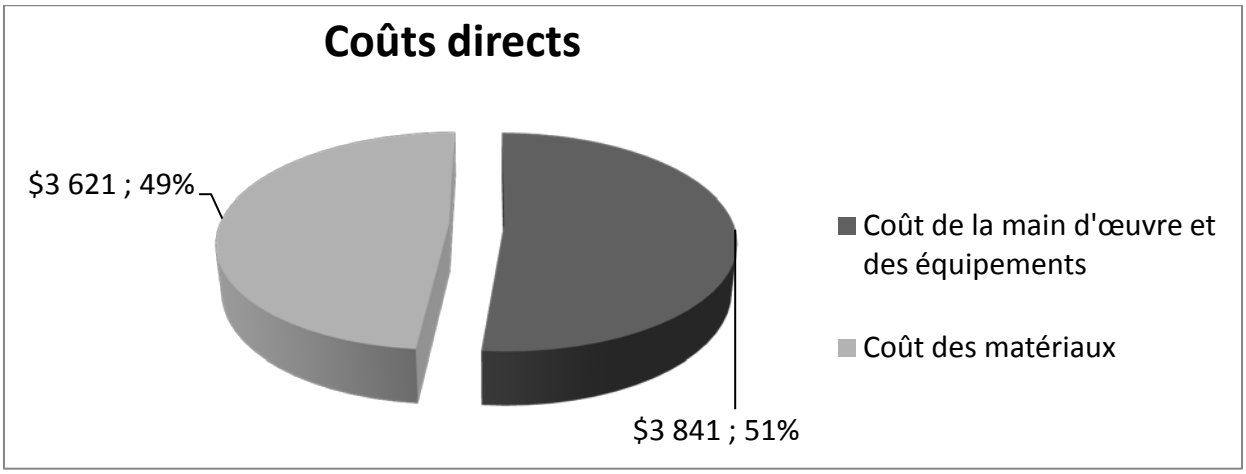


Figure 5.21 : Répartition des coûts de remise en état des infrastructures touchées

Contrairement à la majorité des cas, la part des matériaux dans la facture finale s'élève pratiquement à la moitié, ce qui peut paraitre surprenant quand on sait que lors de travaux civils, la majorité des coûts est due à la main-d'œuvre employée et aux coûts d'utilisation des équipements. Cette particularité est en fait due à la saison durant laquelle le bris est survenu. Les travaux se déroulant en hiver, les matériaux utilisés pour la réparation de la route notamment n'ont pas été les mêmes que si le bris était survenu en été. En effet, afin de permettre une prise

plus rapide de la chaussée, le goudron utilisé n'a pas les mêmes propriétés chimiques que celui utilisé par climat plus chaud. Selon les services de l'ingénierie de la ville de Gatineau, les coûts liés aux matériaux pour des travaux se déroulant en hiver sont évalués à environ deux fois plus que lors de travaux à d'autres saisons.

5.3.3 Les conséquences du bris et les coûts indirects associés

Pour autant, des perturbations s'en sont suivies en raison de la présence d'habitations et d'activité aux alentours de la zone sinistrée.

5.3.3.1 Déclaration d'avis d'ébullition

Une rupture d'aqueduc contenant de l'eau potable et étant censée être propre à la consommation entraine certaines précautions. Il arrive donc que certains tests liés à la qualité de l'eau soient nécessaires à la suite d'un bris. Et comme pour plus d'un quart des cas de bris d'aqueduc pour la municipalité de Gatineau, ce fut le cas pour ce bris. Un avis d'ébullition se décompose en plusieurs phases. Parmi celles-ci, on retrouve notamment les tests menés en laboratoire afin d'évaluer la qualité de l'eau. Ceux-ci visent à détecter la présence ou non de plusieurs bactéries, dont la bactérie coliforme (totale ou fécale), la bactérie Escherichia coli ou encore la bactérie entérocoque. Les différents coûts de laboratoire pour le bris étudié se sont élevés à 82,24 $. Cependant, le bris s'étant produit un vendredi, les tests ont dû être menés en fin de semaine, ce qui a occasionné un surcoût de 100 dollars. Ainsi, après application des taxes dues, la facture finale s'élève à environ 209 dollars.

Ce coût peut sembler minime, mais si on considère les bris sur l'ensemble de l'année 2012, en ne prenant en compte qu'un quart des bris sont suivis d'un avis d'ébullition, et que ces bris surviennent de façon aléatoire (au courant des différents jours d'une semaine) étant donnée la cause naturelle, cela nous donne comme facture finale un coût de 8 205 dollars, uniquement pour ce qui concerne les coûts liés aux avis d'ébullition.

Cependant, ces tests ne donnent pas de résultats immédiats et un temps d'incubation est nécessaire afin de détecter la présence ou non de ces bactéries. Pendant ce temps, l'eau est jugée comme possiblement impropre à la consommation ce qui justifie la nécessité d'avoir recours à l'ébullition avant de pouvoir la consommer ou l'utiliser sans danger. Il devient donc indispensable d'avertir la population d'une possible menace pour la santé. Cela entraine

automatiquement le lancement d'un plan de communication visant à informer les habitants des risques sanitaires encourus. Ces annonces peuvent se faire de différentes façons : par la presse, par la voix de la radio, etc. Pour la ville de Gatineau, cela se fait par l'intermédiaire du CANU, centre d'appel spécialisé pour la diffusion d'information.

Lors du traitement d'un dossier lié à un avis d'ébullition, un préposé travaille entre 16 et 21 minutes afin de transmettre correctement l'information et les différentes mises en garde. Avec un taux horaire variant de 21,55 et 26,96 $/h, plus les avantages sociaux (35%), cela correspond ainsi à un coût de 10 dollars par appel. Bien que ce coût reste très restreint, il représente tout de même une action supplémentaire et nécessaire dans le but d'éviter la propagation de maladies hydriques, même dermatologiques.

À ce coût de communication, il faut également ajouter le coût de l'augmentation de la consommation d'énergie, consommation nécessaire dans le but de porter l'eau à ébullition. Malheureusement, il est impossible d'estimer le coût que représente cette augmentation de la consommation d'énergie.

5.3.3.2 **Perte d'eau**

Cette rupture s'accompagne d'une perte importante d'eau potable. Bien que très abondante au Québec et que la ville de Gatineau se situe à l'intersection des rivières Ottawa et Gatineau, il n'en reste pas moins que le coût de purification et d'acheminement de l'eau est estimé à quelques 0,40 dollar par mètre cube. Ainsi, après enquête sur le terrain, il s'avère que la fuite a provoqué une perte d'environ 1 590 164 litres durant l'incident. Cela représente donc un coup d'environ 636 $.

Cette facture est donc pratiquement aussi élevée que celle récapitulant le coût des matériaux utilisés pour remplacer ceux endommagés.

5.3.3.3 **Congestion et détours**

Même si le secteur reste majoritairement résidentiel, il est important de prendre en compte la congestion, du moins le retard occasionné par cet incident. Ici d'ailleurs, le secteur étant bouclé à l'ensemble de la circulation, l'ensemble du trafic a été détourné via d'autres itinéraires, plus longs.

Les détours générés ont eu plusieurs impacts sur la circulation. Outre l'augmentation du temps de transport, ces détours ont également occasionné une augmentation des coûts d'entretiens, des coûts liés à la consommation, ceux liés à la pollution, etc.

L'état du trafic durant les jours ouvrés est le suivant : 1 400 véhicules par jour, dont 50 bus citadins. Le détour était en moyenne de 800 m occasionnant par la même occasion un allongement du trajet d'une minute 30 secondes. Nous prendrons comme hypothèses, en raison des lieux du bris, un salaire annuel moyen estimé à 50 000 dollars par année. En ce qui concerne les taux d'occupation des véhicules, avec une hypothèse de 1,25 personne par véhicule pour les automobiles et 20 personnes par véhicule pour les autobus. Ainsi, considérant une perturbation du trafic de 2 jours, période durant laquelle les travaux ont eu lieux, les coûts attribuables à cet incident sont les suivants :

Tableau 5.18 : Coûts reliés au trafic automobile

Cause des surcoûts	Facture
Perte de temps	1 774 $
Surconsommation	233 $
Utilisation accrue des véhicules	298 $
Pollution occasionnée	200 $
Total	2 505 $

Une fois encore, les coûts applicables à la circulation même si celle-ci reste modérée dans le secteur sont pratiquement aussi importants que les coûts de remplacement des matériaux.

5.3.4 **Coûts finaux**

Maintenant, il devient intéressant de récapituler l'ensemble de ses coûts et de les analyser en fonction des différents paramètres et particularités de cette étude de cas. Ainsi, lorsque l'on

regarde d'une façon générale les coûts imputables à l'incident du croisement des rues d'Auvergne et des Flandres, nous obtenons la répartition suivante (coûts classés par ordre croissant) :

Tableau 5.19 : Ensemble des coûts imputables au bris de la canalisation au croisement des rues d'Auvergne et des Flandres

Coûts totaux	Facture
Coûts directs	7 462 $
Coût des matériaux de remplacement	3 841 $
Coût de la main-d'œuvre et des équipements	3 621 $
Coûts indirects	3 360 $
Coûts dus à la perte d'eau	636 $
Coûts dus à la perte de temps (détours)	1 774 $
Coûts dus à la surconsommation (détours)	233 $
Coûts dus à la sur-utilisation des véhicules (détours)	298 $
Coûts dus à la pollution additionnelle (détours)	200 $
Coûts de laboratoire (avis d'ébullition)	209 $
Coûts de la campagne d'information (avis d'ébullition)	10 $
Coûts totaux	10 822 $

Comme nous pouvons le remarquer, les coûts les plus importants sont à imputer à la main-d'œuvre et aux équipements utilisés lors des travaux, aux matériaux de remplacement, à la perte d'eau et aux détours.

La répartition des coûts liés au bris de canalisation est la suivante :

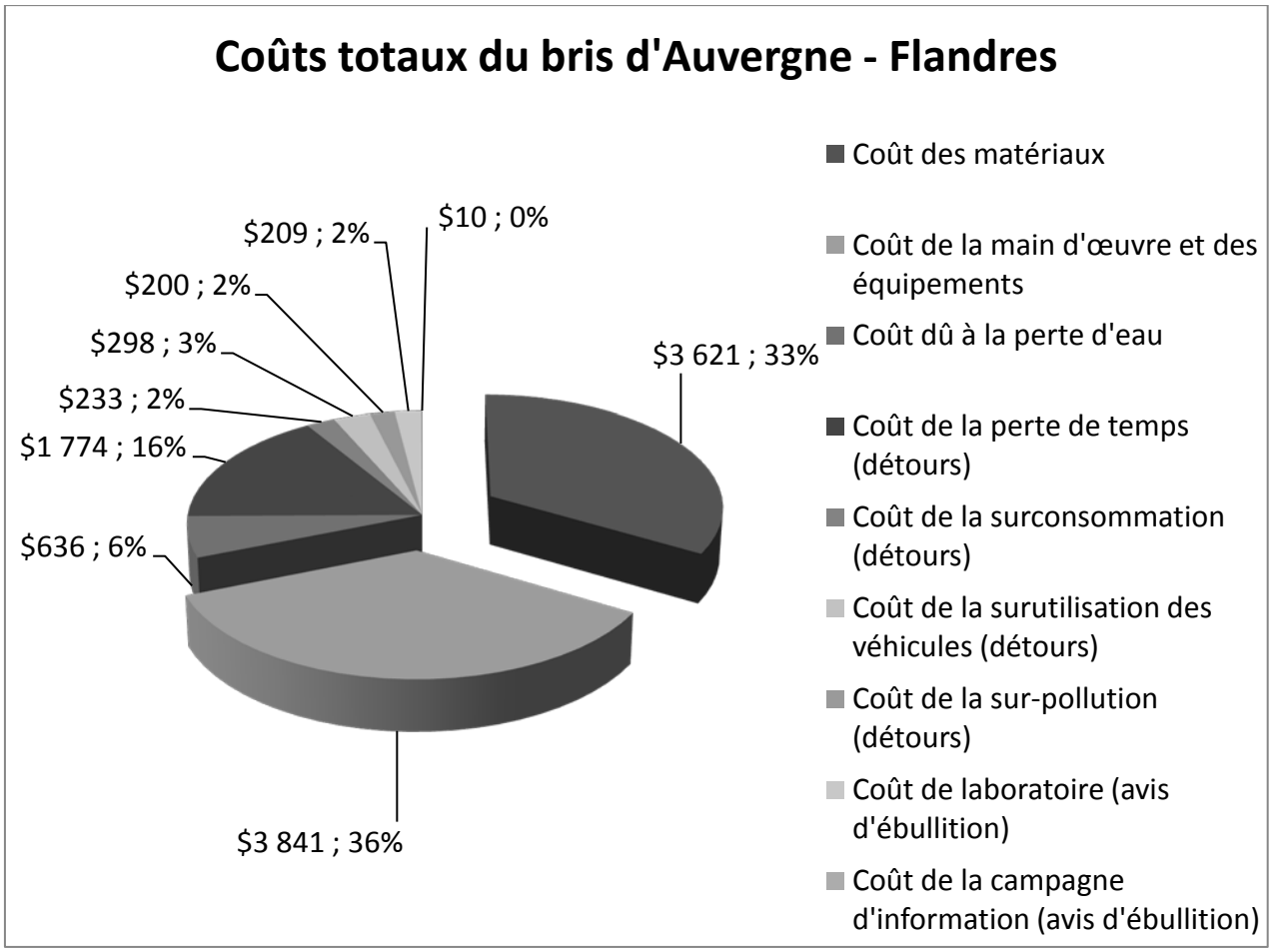


Figure 5.22 : Répartition de l'ensemble des coûts imputables au bris de canalisation

Comme nous pouvons le remarquer, les coûts directs représentent 69 % de la facture totale. Cela est cependant sans prendre en compte le facteur hivernal. Comme cela a été mentionné, les coûts des matériaux s'avèrent environ deux fois plus chers en hiver, ceux-ci devant répondre à certaines caractéristiques liées au froid. Ainsi, en reprenant les chiffres précédents, mais en diminuant ceux attribués aux matériaux, la répartition CD / CD se serait portée à 63 % / 37 % pour le même bris en été. Cela nous permet d'estimer qu'au courant de l'année, l'ensemble de ce genre de bris est constitué d'une répartition CD / CI d'environ 65 % / 35 % en supposant 4 mois d'hiver rude.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude précédente a permis de faire un bilan sur les coûts totaux liés aux bris d'infrastructures souterraines au Québec. La revue de la littérature nous a permis de faire un état des lieux des coûts qui peuvent être reliés à un bris d'infrastructures. Les études d'Ormsby (2009), Rahman et al. (2005), Gilchrist and Allouche (2005) et Allouche et al. (2000) ont permis dans un premier temps d'établir des définitions précises en ce qui concerne les coûts directs et les coûts indirects. Par la suite, en se basant en plus sur d'autres études (Manuilova et al. (2009), Khogali and Mohamed (1999), Rylska et al. (2006) et LaCommare and Eto (2006) entre autres), nous avons développé point par point l'ensemble des coûts directs et indirects liés à des bris d'infrastructures souterraines, ainsi qu'énoncé un certain nombre de méthodes d'estimation de ces coûts.

Par la suite, le manque de certaines données et la découverte de certains phénomènes ont été à l'origine de la mise en place de certaines méthodes d'estimations. On peut notamment penser au phénomène de redistribution du trafic routier, à la méthode d'estimation des coûts liés à la pollution ou encore à la méthode de réactualisation des résultats d'études passées. L'objectif était de retenir des méthodes d'estimation précises sans pour autant tomber dans une trop grande complexité. Ces méthodes laissent place à une importante transparence quant aux calculs qui seront menés par la suite.

À cette méthodologie s'accompagne la démarche suivie lors des études de cas. Que ces études aient été réalisées lors du bris ou plusieurs mois après, un protocole a été établi dans le but de rassembler un maximum d'informations permettant d'apporter du crédit et de la justesse aux coûts répertoriés.

Les 3 études de cas qui ont été exposées par la suite ont montré la part des divers coûts indirects liés aux bris d'infrastructures souterraines et l'importance qu'ils représentent au niveau de la facture finale d'un bris. Nous avons pu constater que selon le type de bris considéré, l'importance de celui-ci ainsi que sa localisation, la répartition finale entre les coûts directs et les coûts indirects pouvait varier. Nous proposons donc ici d'apporter quelques précisions quant à l'importance de ces coûts en fonction de différents facteurs.

En ce qui concerne l'étude de cas liée au bris d'une conduite de gaz dans un secteur résidentiel de Montréal, 2 points sont importants. Il s'agit de la durée de l'intervention des services d'urgence et

la localisation du bris. Il est important de savoir que les municipalités ou les agglomérations qui bénéficient d'un tel service de sécurité sont rares. Dans certaines villes, les interventions du service d'incendie sont assurées par des pompiers volontaires, ayant des procédures et des moyens d'interventions différents et plus restreints. Cela engendre 2 modifications de taille. Premièrement, moins d'hommes et de matériel sont mis à disposition. Ensuite, la procédure de déclenchement d'artère ne sera pas forcément demandée. En conjuguant ces deux points avec la durée plus ou moins importante de l'intervention, de nombreux coûts seront absents pour une intervention en dehors de l'île de Montréal. Cependant, si on regarde la majorité des interventions de type 10.09 qui ont eu lieu sur l'île de Montréal, rares sont celles qui durent moins d'une heure et n'ont pas été l'objet d'un déclenchement d'artère (le déclenchement d'artère est une étape incontournable dans la procédure d'intervention des équipes du SIM). Les coûts liés à la coupure d'électricité sont donc très souvent présents. Seul le nombre de clients touchés peut significativement changer. Ce coût peut être considéré comme un semi-coût fixe, car il est pratiquement toujours présent. Dernier point, la particularité de ce bris réside au niveau de sa situation au moment de l'accident. Dans de nombreux cas, une perturbation du trafic aurait été visible, ce qui aurait fortement augmenté la part des coûts indirects. Pour le bris qui a eu lieu sur l'avenue Coloniale, cela n'a pas été le cas.

Le cas du bris d'infrastructure souterraine de télécommunication sur la rue Jean Talon nous permet, contrairement au cas de l'avenue Coloniale, de prendre conscience de l'importance des coûts que représente la congestion lors d'un bris d'infrastructure souterraine. Nous avons ainsi pu remarquer que pour des perturbations significatives sur le trafic routier, les montants liés à la surconsommation, à la pollution, à l'utilisation accrue des véhicules et surtout aux pertes de temps pouvaient rapidement devenir importants (particulièrement pour une perturbation de plusieurs semaines). Et même si les calculs ont été réalisés avec la plus grande prudence, les coûts finaux obtenus n'en restent pas moins très élevés. Cette étude permet également d'établir des proportions entre les différents coûts dus à la congestion, mais également aux détours. Ces derniers ont d'ailleurs été à l'origine de la recherche sur le détournement d'une partie du trafic pendant la durée des travaux. Nous pouvons également noter que les coûts sont très proches des estimations faites par Gourvil and Joubert (2004) sur l'évaluation de la congestion routière générale dans la région de Montréal.

Le cas de la rupture de la canalisation survenu à Gatineau représente pour sa part une préoccupation majeure pour les services d'ingénierie de la ville de Gatineau. On remarque que pour ce type de bris, les coûts directs représentent la majorité des coûts finaux. Cependant, la part des coûts indirects demeure importante au niveau de la facture finale. Il est donc important de prendre en compte ces coûts indirects, surtout lorsqu'on sait que le nombre de bris similaires s'élève à plus de 230 en 2012, uniquement pour la ville de Gatineau (pour rappel, les coûts indirects ont été estimés à plus de 3 350 $ pour le bris qui a eu lieu au croisement d'Auvergne – des Flandres). La récurrence de ce type de bris en fait à ce jour une réelle préoccupation, tant au niveau des coûts qu'au niveau de la sécurité et du confort des habitants des localités touchées.

Tableau 5.20 : Récapitulatif des coûts indirects relevés au cours des 3 études de cas

Type de coûts chiffrés	Bris d'une canalisation de gaz	Bris d'un câble de télécommunication	Bris d'une conduite d'eau potable
Pertes de produits	Non	Non	Oui
Interruption de service de l'infrastructure ou des infrastructures adjacentes	Oui	Non	Non
Intervention d'urgence	Oui	Non	Non
Perturbation du trafic	Non	Oui	Oui
Impacts environnementaux	Non	Oui	Oui
Coûts autres	Non	Oui	Oui

Les limites de l'étude

- **L'ajustement des études passées**

Le premier point important repose sur l'approche adoptée pour actualiser les données recensées dans la revue de littérature. On peut notamment penser au coût horaire d'une interruption de

service électrique. Au-delà du choix de correspondance entre les différentes catégories, nous remarquons que l'actualisation des données en utilisant comme indice le « GDP Deflator » provoque une augmentation de valeur d'environ 25 %. Quand on regarde le coût que représente l'interruption de service électrique pour le bris d'infrastructure gazière, on remarque que l'actualisation des données fournies par l'étude de LaCommare and Eto (2006) influence énormément le coût indirect final.

- **Les coûts de congestion**

Nous avons vu au cours de l'étude que de nombreux coûts étaient liés à la congestion, notamment à la perte de temps pour les passagers des véhicules. Lors des mesures effectuées en ce qui concerne la perte de temps effective ou le nombre de véhicules, l'objectif était de rester le plus conservatif possible afin de ne pas surestimer ces coûts. Cependant, il est possible que d'importantes variations puissent avoir lieu. Une forte augmentation du temps de congestion pour un facteur extérieur non pris en compte ou quelques sous-estimations peuvent être à l'origine d'un écart certain sur le résultat final des coûts indirects attribuable au bris.

- **Impact général d'un bris d'infrastructure souterraine**

Lorsque nous avons étudié les perturbations et les coûts directs et indirects liés à des bris d'infrastructures souterraines, nous n'avons bien évidemment pas pu prendre toutes les perturbations provoquées par le bris. Nous avons dû nous limiter aux plus importantes perturbations. En prenant comme parallèle les dégâts provoqués par un séisme, nous avons observé et calculé les coûts relatifs aux perturbations qui ont eu lieu à proximité de l'épicentre. Cependant, il est important de noter que d'autres coûts viennent s'additionner. Les coûts indirects présentés dans l'ensemble de l'étude doivent donc être abordés comme une approximation précise, mais toujours inférieure à l'ensemble des coûts indirects.

Perspective de développement

Cette étude qui s'inscrit dans le cadre d'une étude plus large conduite au CIRANO par le groupe Risque confirme donc l'importance de la place des coûts indirects en ce qui concerne les bris d'infrastructures souterraines. En 2012 au Québec, plus de 1400 bris ont été répertoriés dans la base de données d'Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines.

Aux vues des résultats des 3 études de cas précédentes, on envisage facilement l'importance des coûts socio-économiques finaux pour la province. Il est important d'ajouter que ces coûts ne prennent pas en compte certains aspects tels que la baisse de la qualité de vie ou encore la perte de vie humaine. Il faut signaler qu'à ce jour, aucune victime liée à un bris d'infrastructure souterraine n'est encore à déplorer au Québec. Cela n'est malheureusement pas le cas dans d'autres provinces du Canada (en Ontario notamment), aux États-Unis, ou même en Europe.

Cette étude s'inscrit parfaitement dans l'action menée depuis plusieurs années par Info Excavation, l'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines en ce qui concerne la prévention et la promotion des bonnes pratiques d'excavation. Ces points se présentent comme les fondements en matière de réduction de coûts liés aux bris d'infrastructures souterraines, d'amélioration de la qualité de vie et de diminution du risque d'accident. Cette étude est à destination de tous les partis liés aux réseaux souterrains, qu'il s'agisse des excavateurs ou des divers propriétaires d'infrastructures souterraines. Quelle que soit la cause d'un bris, les perturbations occasionnées représentent un réel préjudice pour l'ensemble de la société. Et si pour le moment, ces coûts restent à la charge des citoyens et de la société, il se pourrait qu'à l'avenir, la responsabilité d'un tiers entraine une prise en charge partielle voir totale dans le remboursement des coûts engendrés par un bris d'infrastructure. Car d'après les études de cas réalisées et l'étude menée au CIRANO sur l'ensemble des coûts indirects, le coût annuel total lié aux bris d'infrastructures souterraines pourrait s'avérer très élevé.

BIBLIOGRAPHIE

Allouche, E., Ariaratnam, S., & AbouRizk, S. (2000). Multi-Dimensional Utility Model for Selection of a Trenchless Construction Method. ASCE.

Abraham, D, and Gokhale, S. (2002). Development of a Decision Support System for Selection of Trenchless Technologies to Minimize Impact of Utility Construction on Roadways. *Joint Transportation Research Program*, 60.

Arudi, R., Pickering, B., & Flading, J. (2000). Planning and implementation of a management system for utility cuts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1699*(1), 42-48.

Boyce, G., & Bried, E. (1994). Benefit–cost analysis of microtunneling in an urban area. *Proceedings of North American No-Dig, 94*.

Bryden, J. E., Andrew, L. B., & Fortuniewicz, J. S. (1998). Work zone traffic accidents involving traffic control devices, safety features, and construction operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1650*(1), 71-81.

Button, K. (1994) *Overview of Internalising the Social Costs of Transport,* European Conference of Ministries of Transport, OECD, Paris.

CAA. (2012). Coût d'utilisation d'une automobile, from http://www.caa.ca/fr/driving-costs/.

Consommation d'essence en fonction de vitesse et rapport. (2013), from http://www.astuces-pratiques.fr/auto-moto/consommation-d-essence-en-fonction-de-vitesse-et-rapport#.

Cromwell, J. E., & Pearson, N. (2002). Cost of infrastructure failure. AWWARF, Denver.

Emery, J. J., & Johnson, T. H. (1987). Influence of Utility Cuts on Urban Pavement Performance. In *2nd North American conference on managing pavements, proceedings* (Vol. 1).

Gilchrist, A., Allouche, E., & Cowan, D. (2003). Prediction and mitigation of construction noise in an urban environment. *Canadian journal of civil engineering, 30*(4), 659-672.

Gilchrist, A., & Allouche, E. N. (2005). Quantification of social costs associated with construction projects: state-of-the-art review. *Tunnelling and underground space technology, 20*(1), 89-104.

Gilchrist, A., Cowan, D., & Allouche, E. (2002). *Modeling the impact of construction projects on urban environments.* Paper presented at the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada.

Goetzel, R. Z., Long, S. R., Ozminkowski, R. J., Hawkins, K., Wang, S., & Lynch, W. (2004). Health, absence, disability, and presenteeism cost estimates of certain physical and mental health conditions affecting US employers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine, 46*(4), 398-412.

Goodrum, P. M., Kari, F., Smith, A., Slaughter, B., & Jones, C. N. (2006). *An analysis of the direct and indirect costs of utility and right-of-way conflicts on construction roadway projects* (No. KTC-06-19/SPR-293-05-1F

Gourvil, L., & Joubert, F. (2004). *Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal*: Québec: Transports Québec.

Gouvernement du Québec. (2013). Gestion de l'eau - Consultation publique, from http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/consultation/themes3.htm#prix

Government of Canada, E. C. M. S. o. C., & Meteorological Service of Canada, E. C. G. o. C. (2013). Canadian Climate, from http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/dailydata_e.html?StationID=5415&timeframe=2&Month=11&Year=2012&cmdB1=Go

Hashemi, S., B. (2008). *Construction cost of underground infrastructure renewal: A comparison of traditional open-cut and pipe bursting technology*. ProQuest.

Ikpe, E. O. (2009). Development of cost benefit analysis model of accident prevention on construction projects.

Jung, Y., J, and Sinha, S., K., (2007). Evaluation of trenchless technology methods for municipal infrastructure system. *Journal of infrastructure systems*, *13*(2), 144-156.

Jung, Y., J, and Sinha, S., K., (2004). *Trenchless Technology: An Efficient and Environmentally Sound Approach for Underground Municipal Pipeline Infrastructure Systems*

Jones, C. (1999). *Policy, Incentives and Barriers to the use of Trenchless Technology.* Paper presented at the Life Extension of Technologies Workshop, New York, August.

Khogali, W. E., & Mohamed, E. H. (1999). *Managing utility cuts: Issues and considerations.* Paper presented at the NCRR/CPWA Seminar Series: Innovations in Urban Infrastructure.

Kleiner, Y, Rajani, B., and Sadiq, R. (2006). *Modélisation De La Détérioration Et Gestion Du Risque De Rupture Des Infrastructures Souterraines Essentielles*.

Kolator, R. (1998). The inclusion of social cost components in pipeline construction- preparation of an assessment scheme. *International No-Dig'98. Lausanne, Switzerland*, 25-34.

LaCommare, K. H., & Eto, J. H. (2006). Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States (US). *Energy, 31*(12), 1845-1855.

Lefebvre, P., & Mayer, F. (1991). Les réformes fiscales de 1988 au Canada et au Québec: une analyse d'équilibre général des implications pour le Québec. *Économie & prévision, 98*(2), 101-112.

Manuilova, A., Dormuth, D., & Vanier, D. (2009). MIIP Report: A Case Study of Use and External Components of Social Costs that are Related to Municipal Infrastructure Rehabilitation.

Matthews, J. C., & Allouche, E. N. (2010). *A Social Cost Calculator for Utility Construction Projects.* Paper presented at the NASTT No-Dig Conference.

McKim, R. A. (1997). Bidding strategies for conventional and trenchless technologies considering social costs. *Canadian journal of civil engineering, 24*(5), 819-827.

Michielsen, K. (2006). Trench Vs jacking cost comparison. *T & T international*(MAI), 23-26.

Mirza, S. (2006). Durability and Sustainability of Infrastructure-a State-of-the-Art Report. *Canadian journal of civil engineering, 33(6), 639-649.*

Mirza, S., and Haider, M., (2003) *The State of Infrastructure in Canada: Implications for Infrastructure Planning and Policy,* Infrastructure Canada 29, no. 1.

Modieli Amadou, S., Palacios, M., Picard-Courtois, R., Tardif, I., Québec . Ministère des affaires municipales, d. r. e. d. l. o. d. t., & Centre d'expertise et de recherche en infrastructures, u. (2010). Guide pour l'évaluation des coûts socio-économiques des travaux de renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout guide destiné au milieu municipal québécois

Ormsby, C. M. (2009). A framework for estimating the total cost of buried municipal infrastructure renewal projects. M.S. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, CN, June 2009..

Pucker, J., Allouche, E., & Sterling, R. (2006). *Social Costs Associated with Trenchless Projects: Case Histories in North American and Europe.* Paper presented at the NASTT No-Dig Conference, Paper C-4-04.

Rahman, S., Vanier, D.J., & Newton, L. A. (2005). MIIP Report: Social Cost Considerations for Municipal Infrastructure Management.

RevenuQuébec. (2013). Revenu Québec - TPS/TVH et TVQ, from http://www.revenuquebec.ca/fr/entreprise/taxes/tvq_tps/.

RTE. (2012). Quelle valeur attribuer à la qualité de l'électricité ? L'avis des consommateurs, from http://www.rte-france.com/uploads/media/pdf_zip/alaune/RTE_END_BD.pdf.

Rylska, N. L., McCracken, M. C., Reza, A., Limited, I., Staff, I. L., Alliance, O. R. C. G., & Staff, O. R. C. G. A. (2006). *Societal Costs of Excavation Due to Excavation Damage to Underground Infrastructure in Ontario During 2000-03*: Informetrica Limited.

Shahin, M., & Crovetti, J. (1987). *Determinig the effects of utiliy cut patching on the service life prediction of asphalt concrete pavements.* Paper presented at the 2nd North American conference on managing pavements, proceedings.

Sterling, R. L. (1994). *Indirect costs of utility placement and repair beneath streets* (No. MN-RC-94-20).

Tighe, S., Knight, M., Papoutsis, D., Rodriguez, V., and Walker, C. (2002). "User Cost Savings in Eliminating Pavement Excavations through Employing Trenchless Technologies." *Canadian journal of civil engineering* 29, no. 5

Tighe, S., Lee, T., McKim, R., & Haas, R. (1999). Traffic delay cost savings associated with trenchless technology. *Journal of infrastructure systems*, *5*(2), 45-51.

Vilfrant, E., C., (2010, August). Analysis of Parameters Affecting Costs of Horizontal Directional Drilling Projects in the United States for Municipal Infrastructure. In *Masters Abstracts International* (Vol. 49, No. 03).

Ville de Montréal, P. d. d. (2013). Feux de circulation – comptage des véhicules et des piétons aux intersections munies de feux | Portail données ouvertes, from http://donnees.ville.montreal.qc.ca/fiche/comptage-vehicules-pietons/

Wagner, A. (2011). *Revealing the Costs of Air Pollution from Industrial Facilities in Europe.*

Wilde, W., J., Waalkes, S., and Harrison, R. (1999). *Life cycle cost analysis of Portland cement concrete pavements*. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin.

Xueqing, W., Bingsheng, L., Allouche, E., N., and Xiaoyan, L. (2008). "Practical Bid Evaluation Method Considering Social Costs in Urban Infrastructure Projects." Paper presented at the Management of Innovation and Technology, 2008. ICMIT 2008. 4th IEEE International Conference on, 2008.

Zhang, A., Boardman, A. E., Gillen, D., & Waters, I. (2004). Towards estimating the social and environmental costs of transportation in Canada. *Report for Transport Canada*.

Zhao, J., Q., and Rajani, B. (2002). *Construction and Rehabilitation Costs for Buried Pipe with a Focus on Trenchless Technologies*. NRC, Institute for Research in Construction,

ANNEXE A – VALEURS NUMÉRIQUES ESTIMÉES DU TAUX HORAIRE EN FONCTION DU SALAIRE ANNUEL AU QUÉBEC

Salaire annuel ($)	Taux horaire ($/h)
12 000 $	6,47 $/h
15 000 $	7,70 $/h
22 000 $	10,39 $/h
35 000 $	14,95 $/h
50 000 $	19,76 $/h
75 000 $	27,14 $/h
120 000 $	39,21 $/h

ANNEXE B – DURÉE ESTIMÉE DU TEMPS DE PARCOURS SUPPLÉMENTAIRE DÛ À LA CONGESTION, FONCTION DU TEMPS

t (jours)	Tc (t) (en minute)	Tdminimun (en minute)
1	8,00	5,00
2	7,65	5,00
3	7,33	5,00
4	7,03	5,00
5	6,75	5,00
6	6,50	5,00
7	6,27	5,00
8	6,06	5,00
9	5,88	5,00
10	5,71	5,00
11	5,56	5,00
12	5,44	5,00
13	5,33	5,00
14	5,24	5,00
15	5,16	5,00
16	5,11	5,00

17	5,06	5,00
18	5,03	5,00
19	5,01	5,00
20	5,00	5,00
21	5,00	5,00
22	5,00	5,00
23	5,00	5,00
24	5,00	5,00

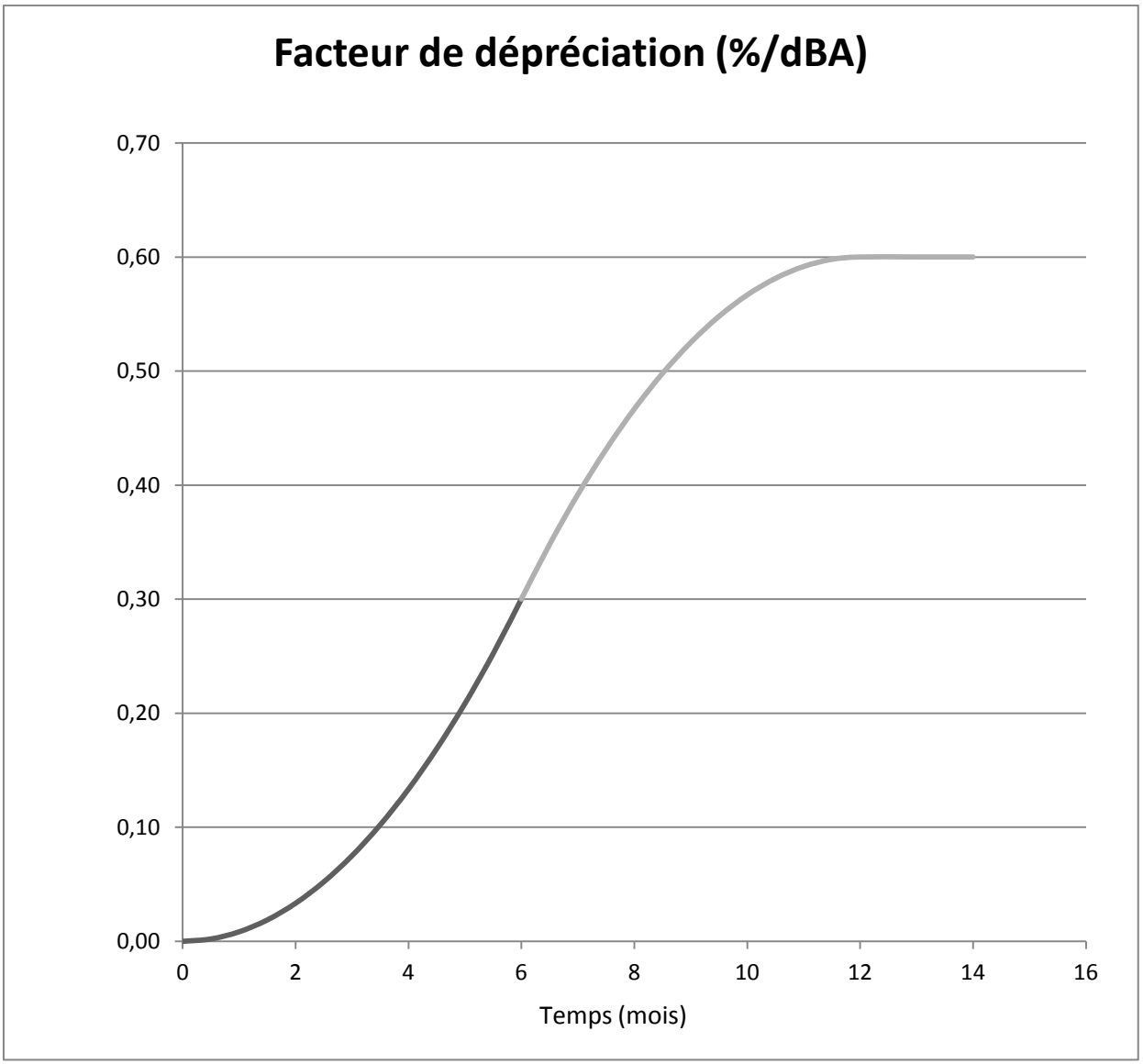
ANNEXE C – ÉVOLUTION ESTIMÉE DU NOMBRE DE VÉHICULES PERTURBÉS, FONCTION DU TEMPS

t (jours)	Nombre de voitures détournées	Nombre de voitures congestionnées
1	0	7000
2	306	6694
3	589	6411
4	851	6149
5	1092	5908
6	1313	5687
7	1514	5486
8	1696	5304
9	1859	5141
10	2004	4996
11	2131	4869
12	2242	4758
13	2337	4663
14	2416	4584
15	2481	4519
16	2532	4468

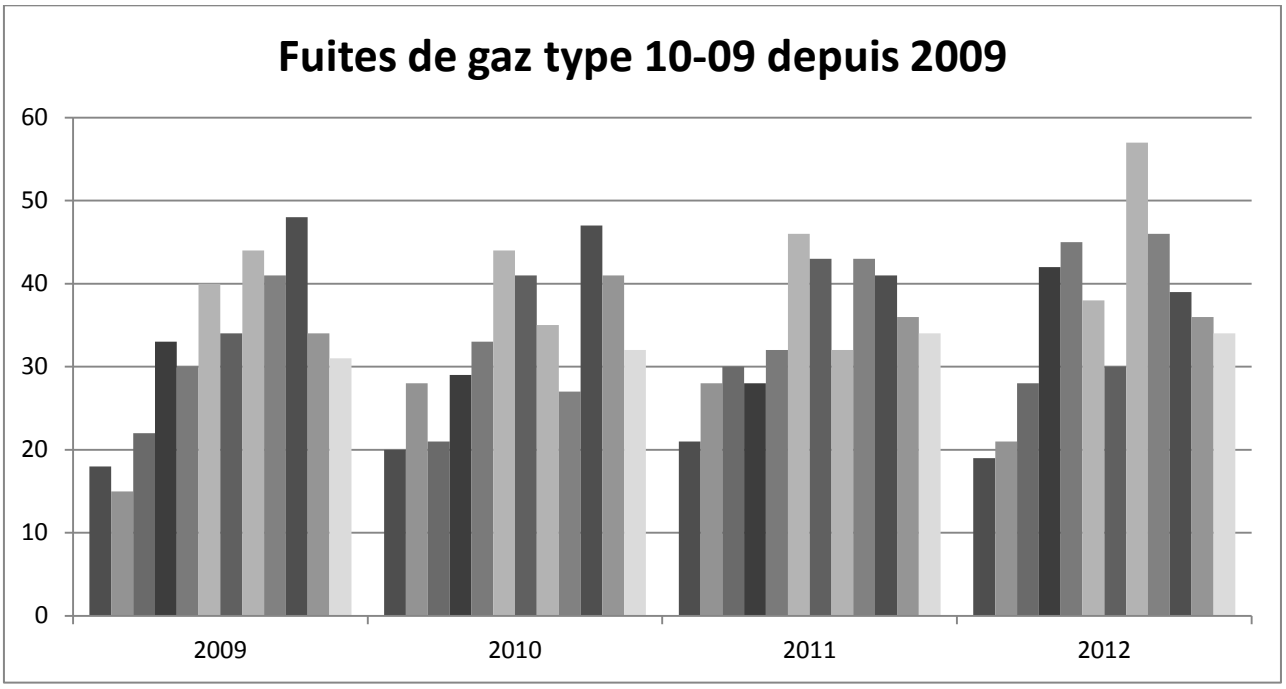
17	2571	4429
18	2598	4402
19	2615	4385
20	2624	4376
21	2624	4376
22	2624	4376
23	2624	4376
24	2624	4376

ANNEXE D – ÉVOLUTION ESTIMÉE D'UN FACTEUR DE DÉPRÉCIATION SONORE

Profil pour une valeur finale de 0,60%/dBA



ANNEXE E – ÉVOLUTION MENSUELLE DES FUITES DE GAZ MAJEURS (TYPE 10-09) DANS LA RÉGION DE MONTRÉAL[17]



[17] Source : Service de sécurité Incendie de Montréal