

ÉVALUATION DES COÛTS SOCIO-ÉCONOMIQUES LIÉS AUX BRIS DES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES AU QUÉBEC - MISE À JOUR -



Décembre 2015

Nathalie de Marcellis-Warin, PhD
Ingrid Peignier, Ing., M.Sc.A
Mohamed Mahfouf, M.Ing
Vincent Mouchikhine, M.Sc.A
Marco Lugo, M.Sc.A

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations membres, d'une subvention d'infrastructure du Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Québec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, and grants and research mandates obtained by its research teams.

LES PARTENAIRES DU CIRANO

PARTENAIRE MAJEUR

Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation

PARTENAIRES CORPORATIFS

Banque de développement du Canada
Banque du Canada
Banque Laurentienne du Canada
Banque Nationale du Canada
Banque Royale du Canada
Banque Scotia
Bell Canada
BMO Groupe financier
Caisse de dépôt et placement du Québec
Fédération des caisses Desjardins du Québec
Financière Sun Life, Québec
Gaz Métro
Hydro-Québec
Industrie Canada
Investissements PSP
Ministère des Finances du Québec
Power Corporation du Canada
Raymond Chabot Grant Thornton
Rio Tinto
State Street Global Advisors
Transat A.T.
Ville de Montréal

PARTENAIRES UNIVERSITAIRES

École Polytechnique de Montréal
HEC Montréal
McGill University
Université Concordia
Université de Montréal
Université de Sherbrooke
Université du Québec
Université du Québec à Montréal
Université Laval

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web.

© 2015 Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier, Mohamed Mahfouf, Vincent Mouchikine, Marco Lugo, Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©. Short section may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.



AVANT PROPOS

Ce rapport est une mise à jour du rapport de recherche CIRANO RP-22 « Évaluation des coûts socio-économiques reliés aux bris des infrastructures souterraines au Québec » publié en 2013.



REMERCIEMENTS

La réalisation d'une étude de cette nature nécessite l'implication d'un grand nombre de partenaires et de personnes.

Nous tenons tout d'abord à remercier Info-Excavation - L'Alliance pour la protection des infrastructures souterraines du Québec (APISQ) et plus particulièrement Nathalie Moreau pour sa collaboration et son implication tout au long du projet. Nous tenons aussi à remercier les divers propriétaires d'infrastructures souterraines ainsi que tous les collaborateurs qui ont rendu possible l'estimation des coûts réels que représente un bris d'infrastructure souterraine au Québec. Nous nous réjouissons de leur accueil et de leur générosité dans le partage de diverses informations qui ont mené à la rédaction de ce rapport. Ces collaborateurs, en plus de proposer des études cas concrets permettant d'illustrer notre étude, ont proposé leur aide en ce qui concerne la collecte de diverses données.

Nous souhaitons remercier plus particulièrement le Service de Sécurité Incendie de Montréal, le Service de Police de la Ville de Montréal, la ville de Gatineau, le Société de Transport de Montréal, Gaz Métro, Hydro-Québec et Bell.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement Claude Montmarquette Président-directeur général du CIRANO ainsi que tous les collègues du CIRANO et de Polytechnique Montréal qui nous ont apporté leur soutien dans les diverses phases du projet. Nous souhaitons remercier MITACS (organisation nationale de recherche à but non-lucratif) pour son support dans le cadre du programme de stage de recherche Mitacs-Accélération. Ce programme a offert au stagiaire Vincent Mouchikine l'occasion de mettre en pratique ses connaissances théoriques en situation réelle. Nous remercions aussi Christophe Rutyna, étudiant qui a participé au démarrage du projet.



LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

APISQ	Alliance pour la protection des infrastructures souterraines du Québec
dBA	Décibel audible
CAA	Association canadienne des automobilistes
CD	Coût direct
CIRANO	Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations
CI	Coût indirect
Cli	Consommation moyenne par kilomètre initiale pour un véhicule de type i
C_{Pi}	Consommation moyenne par kilomètre en régime perturbé pour un véhicule de type i
SIM	Service de sécurité incendie de Montréal
SPVM	Service de Police de la Ville de Montréal
T_c	Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion
T_{dminimum}	Temps de parcours supplémentaire minimum pour un détour

TABLE DES MATIÈRES

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	16
1. MISE EN CONTEXTE	16
2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	19
3. PLAN GÉNÉRAL DU RAPPORT	20

CHAPITRE 1 : TYPOLOGIE DES COÛTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION ASSOCIÉES	22
--	-----------

1. DÉFINITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COÛTS LIÉS À UN BRIS D'INFRASTRUCTURE SOUTERRAINE	23
1.1. LES COÛTS DIRECTS	23
1.2. LES COÛTS INDIRECTS	23
2. LES COÛTS DIRECTS : TYPOLOGIE ET MÉTHODES DE CALCUL	24
2.1. COÛTS DES MATÉRIAUX DE REMPLACEMENT	24
2.2. COÛTS DE L'ÉQUIPEMENT UTILISÉ POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES	25
2.3. COÛTS DE LA MAIN-D'ŒUVRE UTILISÉE POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES	25
2.4. COÛTS ADMINISTRATIFS NÉCESSAIRES À LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES	26
3. LES COÛTS INDIRECTS : TYPOLOGIE ET MÉTHODES DE CALCUL	26
3.1. COÛTS ASSOCIÉS AUX INTERRUPTIONS DES SERVICES	27
3.1.1. Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service électrique	28
3.1.2. Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service Internet	32
3.2. COÛTS ASSOCIÉS AU DÉPLOIEMENT DES SERVICES D'URGENCE	33
3.3. COÛTS ASSOCIÉS À L'ÉVACUATION DES RÉSIDENTS ET DES COMMERCES	35
3.4. COÛTS ASSOCIÉS AUX RISQUES DE BLESSURES OU DE DÉCÈS POUR LES TRAVAILLEURS 35	
3.5. COÛTS ASSOCIÉS AUX PERTES DE PRODUITS	35
3.6. COÛTS LIÉS À LA PERTURBATION DE LA CIRCULATION	36
3.6.1. Coûts liés à la perte de temps pour les véhicules et les piétons	36
3.6.2. Coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien) et à la surconsommation de carburant	43
3.6.3. Coûts liés à la difficulté d'accès pour les véhicules d'urgence dans la zone où a eu lieu le bris 47	
3.6.4. Coûts liés à l'augmentation possible du nombre d'accidents de la circulation	48
3.6.5. Coûts liés à la Perte d'espaces de stationnement proches du bris	48
3.7. COÛTS ASSOCIÉS AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	50
3.7.1. Coûts associés à la pollution de l'air et aux gaz à effet de serre	50
Augmentation de l'émission de particules et de gaz nocifs	50
Émission de particules poussiéreuses	52
3.7.2. Coûts associés à la pollution des eaux et des sols	52

3.7.3.	Coûts associés aux bruit et aux vibrations sur la valeur immobilière	53
3.8.	COÛTS ASSOCIÉS A LA PERTURBATION DES SOLS ET RÉDUCTION DE LA DURÉE DE VIE DES INFRASTRUCTURES ADJACENTES	55
3.9.	IMPACTS ÉCONOMIQUES SUR LES COMMERCES ET LES ENTREPRISES	56
3.9.1.	Coûts associés à la baisse de la productivité	56
3.9.2.	Coûts associés aux retards et absences au travail	58
3.9.3.	Coûts associés à la diminution du chiffre d'affaires	58
3.10.	COÛTS ASSOCIÉS AUX RETARDS DANS L'EXÉCUTION DES TRAVAUX	59
3.11.	COÛTS ASSOCIÉS À L'IMPACT SUR LA RÉPUTATION DE L'ENTREPRISE PROPRIÉTAIRE DE L'INFRASTRUCTURE	59
3.12.	FRAIS ADMINISTRATIFS OU LÉGAUX	60
3.13.	COÛTS ASSOCIÉS À UNE BAISSSE DE LA QUALITÉ DE VIE	60
3.14.	CONCLUSION	60

CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DES COÛTS TOTAUX DE QUATRE ÉTUDES DE CAS 62

1.	MÉTHODOLOGIE DES ETUDES DE CAS.....	63
1.1.	CHOIX DES ÉTUDES DE CAS	63
1.2.	COLLECTE DES DONNÉES POUR LES ÉTUDES DE CAS	64
1.2.1.	Collecte d'informations sur les lieux des bris	64
1.2.2.	Collecte de données a posteriori	65
	Données concernant les interventions des services et des entreprises	65
	Données concernant les causes du bris	65
	Données concernant les commerçants situés aux alentours du bris	66
	Autres données secondaires pouvant être utilisées pour l'évaluation des coûts.....	66
2.	ÉTUDE DE CAS 1 : BRIS D'UNE CONDUITE DE GAZ DANS LE CENTRE VILLE D'UNE GRANDE AGGLOMÉRATION	68
2.1.	LOCALISATION DU BRIS	68
2.2.	DESCRIPTION DU BRIS	68
2.3.	LES CAUSES DU BRIS	71
2.4.	LES DIVERS COÛTS ENGENDRÉS	71
2.5.	LES COÛTS DIRECTS	72
2.5.1.	Les coûts de la main d'œuvre et des équipements	72
2.5.2.	Les coûts des matériaux	74
2.5.3.	Les coûts administratifs	74
2.5.4.	Bilan des coûts directs	74
2.6.	LES COÛTS INDIRECTS	75
2.6.1.	Intervention du service de sécurité incendie de Montréal (SIM)	76
2.6.2.	Intervention du service de police de la ville de Montréal (SPVM)	78
2.6.3.	Coûts liés aux diverses interruptions de services	79
	Interruption du service de transport en commun de la ville de Montréal	79
	Interruption des services de gaz et d'électricité	80
2.6.4.	Réclamations extérieures liées au bris	81
2.6.5.	Préjudices et autres coûts	81

2.7.	CONCLUSION	82
3.	ÉTUDE DE CAS 2 : BRIS D'UNE CONDUITE DE TELECOMMUNICATION DANS UNE GRANDE AGGLOMERATION AU QUÉBEC	83
3.1.	LOCALISATION DU BRIS	83
3.2.	LES CIRCONSTANCES DU BRIS	84
3.3.	LES COÛTS DIRECTS DU BRIS	84
3.4.	LES CONSÉQUENCES DU BRIS ET LES COÛTS INDIRECTS ASSOCIÉS	85
3.4.1.	Coûts liés à la perturbation de la circulation	86
	Coûts liés à la perte de temps dans la congestion	86
	Coûts liés à la perte de temps dans les détours	90
	Coûts liés à la surconsommation des véhicules	91
	Coûts liés à la pollution	92
	Coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien)	92
	Coûts liés à l'affaiblissement de la sécurité	93
3.4.2.	Les coûts liés à la sécurisation des lieux du bris	94
3.4.3.	Coût d'interruption de service internet	95
3.4.4.	Impacts économiques	95
3.4.5.	Perturbation des réseaux de transports collectifs de Montréal	96
3.4.6.	Impact sur la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine	96
3.4.7.	Récapitulatif des coûts indirects	96
3.5.	CONCLUSION	97
4.	ÉTUDE DE CAS 3 : BRIS MINEUR D'UNE CANALISATION D'EAU DANS UNE AGGLOMÉRATION DE TAILLE MOYENNE AU QUÉBEC	99
4.1.	LOCALISATION DU BRIS	99
4.2.	DÉROULEMENT DU BRIS ET INTERVENTION DES SERVICES SPÉCIALISÉS : COÛTS DE RÉPARATION DES INFRASTRUCTURES TOUCHÉES	100
4.3.	LES CONSÉQUENCES DU BRIS ET LES COÛTS INDIRECTS ASSOCIÉS	101
4.3.1.	Coûts associés à la déclaration d'avis d'ébullition	102
4.3.2.	Coûts associés à la perte d'eau	103
4.3.3.	Coûts associés à la congestion	103
4.4.	COÛTS TOTAUX	104
5.	ÉTUDE DE CAS 4 : BRIS MAJEUR D'UNE CONDUITE D'EAU DANS UNE VILLE QUÉBÉCOISE	105
5.1.	LOCALISATION DU BRIS	105
5.2.	DÉROULEMENT DU BRIS ET INTERVENTION DES SERVICES SPÉCIALISÉS	105
5.2.1.	Les services de sécurité incendie et de police	105
5.2.2.	Les équipes en charge de l'eau du réseau secondaire	105
5.2.3.	Les équipes en charge de l'eau du réseau primaire	106
5.3.	LES CONSÉQUENCES DU BRIS	106
5.4.	ÉVALUATION DES COÛTS DIRECTS ENGENDRÉS PAR UN BRIS MAJEUR (CDI)	107
5.4.1.	LES ÉQUIPES DE LA VILLE EN CHARGE DE L'EAU DU RÉSEAU SECONDAIRE	108
5.4.2.	INTERVENTION DES ÉQUIPES DE LA VILLE EN CHARGE DE L'EAU DU RÉSEAU D'AQUEDUC PRIMAIRE	108


5.5. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS LIÉS AU BRIS MAJEUR DE LA CANALISATION PRINCIPALE (CII).....	110
5.5.1. Coûts liés à l'intervention des services d'urgence.....	111
5.5.2. Coûts des réclamations pour les dommages.....	112
5.5.3. Coûts liés au détour du trafic automobile.....	113
5.5.4. Coûts liés à la coupure d'électricité.....	114
5.5.5. Récapitulatif de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale.....	114
5.6. ÉVALUATION DES COÛTS LIÉS AUX EFFETS DOMINOS ENGENDRÉS PAR LE BRIS DE LA CANALISATION PRINCIPALE (CDS ET CIS).....	115
5.6.1. Les interventions des équipes de la ville en charge du réseau secondaire.....	116
5.6.2. Les interventions des équipes du service de sécurité incendie de la ville.....	118
5.6.3. Coûts des réclamations pour les dommages liés aux bris des effets dominos.....	119
5.6.4. Coûts divers.....	119
5.6.5. Bilan des coûts liés aux effets dominos.....	119
5.7. BILAN GÉNÉRAL.....	120
6. BILAN ET DISCUSSIONS AUTOUR DES ÉTUDES DE CAS.....	122

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS TOTAUX DES BRIS D'INFRASTRUCTURES POUR LE QUÉBEC..... 124

1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE D'ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS LIÉS AUX BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES.....	125
2. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS D'INTERRUPTION DU SERVICE D'ÉLECTRICITÉ.....	127
3. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS DE MOBILISATION DES SERVICES D'URGENCE.....	129
4. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS DE CONGESTION ROUTIÈRE.....	130
5. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS D'INTERRUPTION DU SERVICE INTERNET.....	132

CHAPITRE 4 : ESTIMATION DES COÛTS INDIRECTS TOTAUX DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES EN 2014 ET IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX FACTEURS EXPLICATIFS DES BRIS..... 133

1. ESTIMATION DES COÛTS INDIRECTS TOTAUX DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES AU QUÉBEC POUR L'ANNÉE 2014.....	134
2. ANALYSE DES BASES DE DONNÉES POUR IDENTIFIER LES PRINCIPAUX FACTEURS EXPLICATIFS DES BRIS : VERS UNE PRÉVENTION PLUS EFFICACE.....	137
DISCUSSIONS ET CONCLUSION.....	140
RECOMMANDATIONS.....	142
BIBLIOGRAPHIE.....	144



ANNEXE 1 – Valeurs numériques du taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec	148
ANNEXE 2 – Durée du temps de parcours supplémentaire dû à la congestion, fonction du temps.....	149
ANNEXE 3 – Évolution du nombre de véhicules perturbés, en fonction du temps	150
ANNEXE 4 – Évolution d'un facteur de dépréciation sonore	151
ANNEXE 5 – Ajustement des données de coûts en fonction des années d'estimations passées	152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Équivalence entre les catégories de clients de Sullivan et al. (2015) et les clients d'Hydro-Québec.....	29
Tableau 2 : Taux horaires des différents véhicules d'intervention des services d'urgence	34
Tableau 3 : Taux horaire selon le type de camion utilisé (Gourvil & Joubert, 2004).....	39
Tableau 4 : Coût moyen par type d'accident (Manuilova, et al., 2009).....	48
Tableau 5 : Coûts métriques des matières polluantes (Gourvil & Joubert, 2004).....	50
Tableau 6 : Table de facteurs de dépréciation sonore (Matthews & Allouche, 2010).....	54
Tableau 7 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des coûts directs et indirects engendré par un bris d'infrastructure souterraine.....	61
Tableau 8 : Coûts directs du bris de conduite de gaz facturés par Gaz Métro.....	75
Tableau 9 : Facteurs de coûts évalué et illustrés dans l'étude du cas 1.....	76
Tableau 10 : Données significatives et coûts allouables au SIM.....	77
Tableau 11 : Chiffres et coûts liés à l'intervention des services du SPVM.....	78
Tableau 12 : Récapitulatif des clients impactés par la coupure d'électricité due au déclenchement d'artère.....	80
Tableau 13 : Estimation du coût total d'un bris de conduite de gaz dans une artère résidentielle.....	82
Tableau 14 : Estimation des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication ..	85
Tableau 15 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 2.....	85
Tableau 16 : Taux horaire selon le type de véhicule sur la rue Jean Talon.....	88
Tableau 17 : Estimation des coûts liés à la perte de temps dans la congestion en fonction des semaines.....	90
Tableau 18 : Coûts des détours dus au bris de la rue Jean Talon.....	90
Tableau 19 : Récapitulatif des coûts liés à la perte de temps dus au bris pour les automobilistes.....	90
Tableau 20 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (détours).....	91
Tableau 21 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (congestion).....	91
Tableau 22 : Rappel des divers coûts liés au bris.....	98
Tableau 23 : Historique des bris du croisement rue d'Auvergne et rue des Flandres.....	99
Tableau 24 : Coûts directs de remise en état des infrastructures touchées.....	101
Tableau 25 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 3.....	101
Tableau 26 : Coûts indirects liés au trafic automobile.....	103
Tableau 27 : Ensemble des coûts imputables au bris de la canalisation au croisement des rues d'Auvergne et des Flandres.....	104
Tableau 28 : Coûts estimés de remise en état assuré par les équipes en charge du réseau secondaire.....	108

Tableau 29 : Coûts de remise en état assurée par les équipes en charge du réseau primaire	109
Tableau 30 : Ensemble des coûts de remise en état par les équipes en charge de l'eau	110
Tableau 31 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 4.....	110
Tableau 32 : Mobilisation humaine des services d'urgence	111
Tableau 33 : Montants de l'intervention des services d'urgence	111
Tableau 34 : Montant et répartition des coûts des réclamations liés au bris de la canalisation principale	112
Tableau 35 : Montants des coûts affectant le trafic automobile	113
Tableau 36 : Récapitulatif de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale	114
Tableau 37 : Ensemble des coûts liés à l'intervention des équipes en charge de l'eau pour la réparation des bris d'aqueduc du réseau secondaire dus aux surpressions causées par le bris principal de la rue Albert combiné à l'état vétuste des conduites.	117
Tableau 38 : Coûts liés à l'intervention des équipes en charge de l'eau du réseau secondaire de la ville pour la réparation de l'ensemble des bris dus aux surpressions causés par le bris principal de la rue Albert combiné à l'état vétuste des conduites	117
Tableau 39 : Coût des interventions du service de sécurité incendie	119
Tableau 40 : Coûts liés aux 19 bris engendrés par les effets dominos du bris principal ..	119
Tableau 41 : Part des différents coûts dans les coûts totaux	121
Tableau 42 : Coûts selon le type d'infrastructure touché.....	127
Tableau 43 : distribution retenue des clients affectés par région administrative.....	128
Tableau 44 : Variation du taux de bris entre 2014 et 2013 par type infrastructure endommagée	135

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Distribution des bris selon les régions par type d'infrastructures souterraines en 2014.....	17
Figure 2 : Distribution des bris à Montréal selon le type d'infrastructures souterraines en 2014.....	18
Figure 3: Schématisation de l'ampleur des coûts indirects par rapport aux coûts directs d'un bris d'infrastructure souterraine	27
Figure 4 : Méthodologie générale adoptée lors des études de cas.....	67
Figure 5 : Aperçu du 3459 Avenue Coloniale.....	68
Figure 6 : Pelle mécanique responsable du bris	69
Figure 7 : Conduite de gaz touchée.....	70
Figure 8 : Table du poste de commandement des services de la SIM.....	70
Figure 9 : Disposition type des équipes d'intervention lors d'un bris de gaz	73
Figure 10 : Véhicule d'intervention de Gaz Métro et véhicules d'urgence	74
Figure 11 : Croisement rue Jean Talon Ouest- Côte des Neiges	83
Figure 12 : Zone de congestion 2 jours après le bris à l'heure de pointe du matin	87
Figure 13 : Évolution du nombre de véhicules perturbés en fonction du nombre de jours suivant le bris	89
Figure 14 : Évolution du temps de congestion en fonction des jours suivant le bris	89
Figure 14 : Engagement d'un véhicule ambulancier à contre sens lors des travaux de remise en état sur la rue Jean Talon	94
Figure 15 : Exemple de signalisation utilisée pour sécuriser les lieux d'un bris	95
Figure 16 : Localisation du bris.....	99
Figure 17 : Carrefour où les bris ont eu lieu.....	100
Figure 18 : Représentation des coûts totaux du bris de canalisation survenu sur la rue Albert.....	107
Figure 19 : Plan d'intervention des équipes en charge du réseau primaire	109
Figure 20 : Localisation des bris qui ont suivi l'accident survenu sur la rue Albert	116

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec (Gourvil & Joubert, 2004)	39
Graphique 2 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion en fonction du temps.....	41
Graphique 3 : Évolution du profil du nombre de véhicules perturbés (congestion et contournement)	42
Graphique 4 : Coûts d'utilisation des véhicules en fonction de la vitesse en situation de congestion, hors coût du carburant, en CA\$ 1998 (Gourvil & Joubert, 2004)	44
Graphique 5 : Profil de consommation d'un véhicule	45
Graphique 6 : Facteur de réduction de la productivité en fonction du bruit (Gilchrist & Allouche, 2005)	57
Graphique 7 : Coûts directs associés au bris survenu au 3459 Avenue Coloniale.....	75
Graphique 8 : Comparaison des coûts directs avec les coûts indirects liés aux services d'urgence.....	79
Graphique 10 : Évolution quotidienne des coûts de surconsommation de carburant	92
Graphique 11 : Coûts liés à la surutilisation des véhicules dans les détours lors du bris....	93
Graphique 12 : Répartition des coûts indirects liés au bris	96
Graphique 13 : Répartition des coûts directs et indirects du bris survenu sur la rue Jean Talon.....	97
Graphique 15 : Répartition des montants des interventions des services d'urgence.....	112
Graphique 16 : Répartition de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale.....	115
Graphique 17 : Répartition des coûts des équipes de la ville en charge de l'eau entre le bris principal et les bris dus aux effets dominos.....	118
Graphique 18 : Répartition de l'ensemble des coûts liés au bris survenu sur la rue Albert et ceux liés aux effets dominos	120

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Coût d'une interruption de service électrique	31
Équation 2 : Coût d'une interruption de service internet.....	32
Équation 3 : Coût total d'intervention des services publics de sécurité.....	35
Équation 4: Volume du produit perdu	36
Équation 5: Coût associé à la perte de produit.....	36
Équation 6 : Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules.....	38
Équation 7 : Coût de la perte de temps dû au détour des piétons.....	38
Équation 8 : Estimation du taux horaire en fonction du revenu annuel	38
Équation 9 : Décroissance du temps de parcours supplémentaire	40
Équation 10 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion.....	40
Équation 11 : Conditions limites du temps de détour	40
Équation 12 : Nombre de véhicules impactés par la congestion en fonction du temps	41
Équation 13 : Nombre de véhicules perturbés	42
Équation 14 : Nombre de véhicules perturbés	43
Équation 15 : Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules.....	43
Équation 16 : Coût lié à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien)	44
Équation 17: Coût lié à la surconsommation de carburant dû à la congestion	46
Équation 18: Coût relié à la surconsommation de carburant dû aux détours.....	47
Équation 19: Coût relié à la perte d'espaces de stationnement.....	48
Équation 20: Coût des pertes dues à l'absence d'amendes de stationnement (Pucker, et al., 2006).....	49
Équation 21 : Coût de la pollution de l'air (via augmentation de particules et de gaz nocifs)	51
Équation 22: Coût lié à la pollution attribuable à la congestion.....	51
Équation 23: Coût dû à la pollution sonore sur la valeur des propriétés	54
Équation 24 :Coût de la pollution sonore dans le milieu professionnel	57
Équation 25: Impacts monétaires des vibrations sur les travailleurs (Gilchrist & Allouche, 2005)	58

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Sous terre se trouve un vaste réseau caché de conduits et de câbles qui acheminent des produits et des services essentiels à la société d'aujourd'hui. Ces infrastructures souterraines comprennent notamment les câbles de télécommunication, les câbles électriques, les conduites de gaz, les égouts, les canalisations d'eau, les tuyaux d'évacuation des eaux pluviales, les oléoducs, etc. Leur enfouissement généralement peu profond et leur densité croissante amènent les entrepreneurs à les heurter lors de travaux de réparation ou de réhabilitation en tout genre.

1. MISE EN CONTEXTE

Des statistiques de bris alarmantes

En moyenne en 2014 au Québec, on dénombre 5 bris d'infrastructures souterraines par jour. Dans 34 % des cas, aucune demande de localisation¹ des réseaux souterrains n'avait été effectuée auprès d'Info-Excavation. Pourtant l'article 3.15.1 du Code de sécurité pour les travaux de construction au Québec exige que l'employeur vérifie s'il y a des canalisations souterraines dans le périmètre des travaux à exécuter et, le cas échéant, situe leur emplacement exact sur le terrain.

À la vue de ces statistiques, Info-Excavation, l'alliance pour la protection des infrastructures souterraines, a entrepris d'évaluer les coûts que représentaient ces bris. La branche « prévention des dommages » d'Info-Excavation a pour mission principale de participer au développement des bonnes pratiques d'excavation. Les objectifs principaux sont d'assurer la sécurité générale pour les travailleurs et pour les citoyens et de maintenir les services en place. Info-excavation 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.

La base de données ORDI (Outil de rapport sur les dommages aux infrastructures qui recense les bris au Québec) gérée par Info Excavation nous donne certaines précisions quant aux types et aux circonstances des bris survenus au Québec. 37 % des bris ont nécessité le déploiement des services d'urgence des municipalités et 84 % ont occasionné des interruptions de service (Info-Excavation, 2014). Ce bilan est assez inquiétant d'autant plus qu'il est certainement en dessous de la réalité des bris, puisque la déclaration des

¹ Les services d'Info Excavation- L'alliance pour la protection des infrastructures souterraines, disponibles 24 heures par jour, sont gratuits et offrent, entre autre, un guichet unique afin d'informer quiconque, avant de creuser le sol, la nature et l'emplacement des installations souterraines de ses membres. Cette vérification n'est cependant pas obligatoire au Québec.

bris est faite de façon volontaire et que de nombreux propriétaires d'infrastructures ne participent pas à ce jour au programme de recensement mis en place par Info-Excavation. Une cartographie des bris permet de constater que les bris sont concentrés au sud de la province, plus précisément au niveau des villes les plus peuplées telles que Montréal, Québec et Gatineau, mais aussi qu'il existe une prépondérance des bris d'infrastructures de télécommunication et gazières. Quelque soit le type de travaux effectués par l'excavateur, plus des 2/3 des bris se produisent dans le Grand Montréal qui englobe les régions de la Montérégie, Montréal, Laval, Lanaudière et Laurentides.

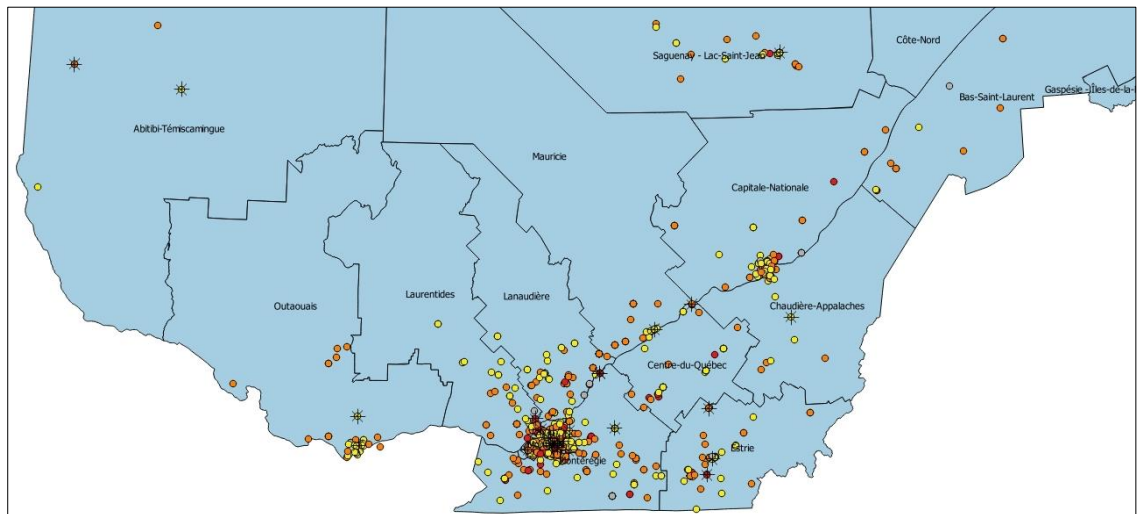


Figure 1: Distribution des bris selon les régions par type d'infrastructures souterraines en 2014²

(Gaz = jaune ; Télécommunication = orange ; Électricité = rouge ; Autres = gris ; étoile = Interruption de service de 5h et plus)

Au niveau de l'île de Montréal, certains arrondissements, tels que le plateau Mont-Royal, Ville Marie et Verdun, sont plus touchés que d'autres. Les analyses ont d'ailleurs montré une corrélation entre la densité de la population des arrondissements montréalais et le nombre de bris.

² Dans la base de données des bris gérée par Info-Excavation, 937 bris, soit 78% du total, ont pu être géolocalisés et sont donc représentés sur la carte.

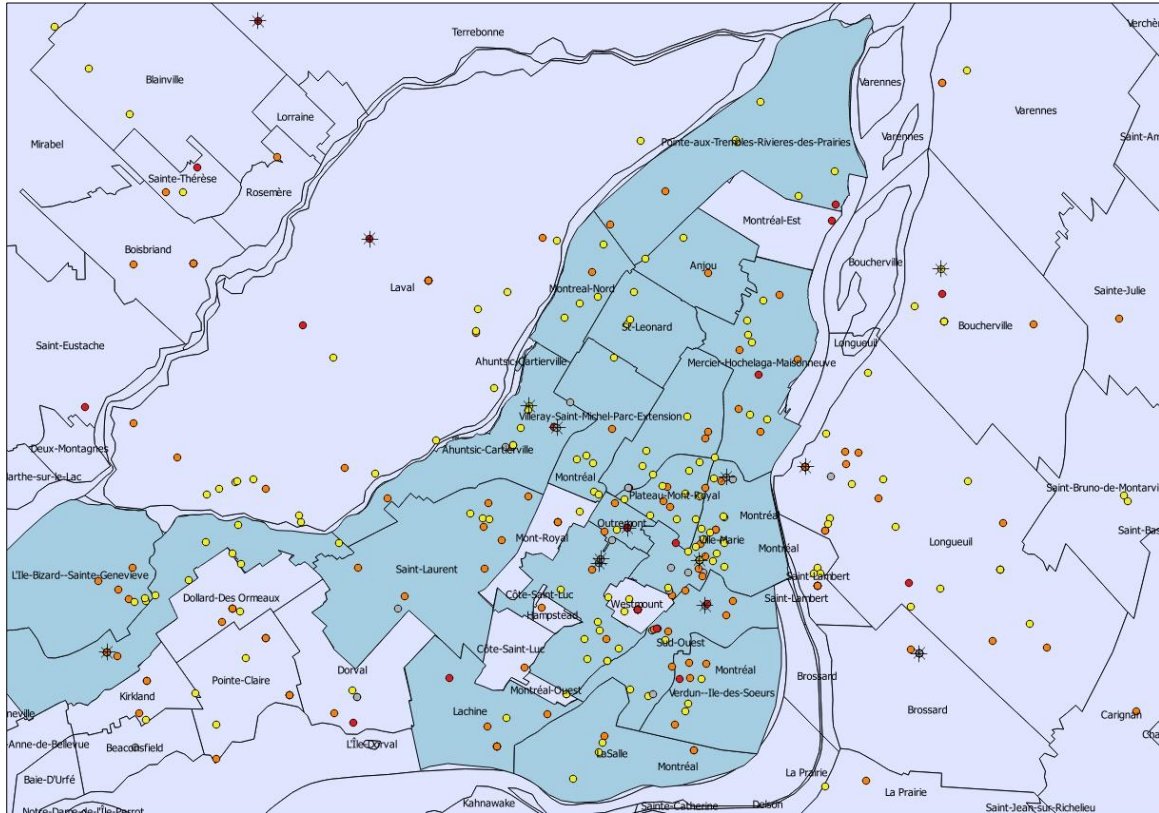



Figure 2 : Distribution des bris à Montréal selon le type d'infrastructures souterraines en 2014

(Gaz = jaune ; Télécommunication = orange ; Électricité = rouge ; Autres = gris; étoile = Interruption de service de 5h et plus)

Des bris qui mettent en danger la santé et la sécurité des travailleurs

Ces bris mettent surtout en danger les travailleurs participant aux travaux en les exposant à des blessures graves et parfois à des situations qui pourraient s'avérer mortelles. Au Québec, aucun décès n'est à déplorer suite à un bris d'infrastructure souterraine. Toutefois, des accidents avec décès sont survenus dans d'autres provinces. En Ontario, depuis 2003, il y a eu 7 morts. Depuis 2008, en Colombie-Britannique, il y a eu 2 morts et 6 blessés graves dus à des bris d'infrastructures souterraines à la suite de travaux d'excavation (sur en moyenne plus de 1600 infrastructures « accrochées » annuellement). Aux États-Unis, le US Department of Transportation, section Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration compile chaque année les incidents graves pour chaque type d'opérateur de pipeline. Il est à noter que les lois américaines sévères obligent l'appel avant les travaux d'excavation et imposent aux propriétaires/exploitants de réseaux souterrains une affiliation avec les centres d'appels uniques. Les contrevenants sont d'ailleurs passibles d'amendes très élevées. Aujourd'hui, tous les états américains



disposent de législations orientées sur la protection des infrastructures souterraines et chaque état possède un centre d'appels unique. Cette initiative a permis de réduire grandement (de l'ordre de 70%³) le nombre de dommages aux réseaux enfouis. Les statistiques américaines sont néanmoins assez alarmantes : depuis 2008, on compte 98 blessés et 17 morts dus à des bris d'infrastructures liés à un travail d'excavation⁴.

2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Chaque bris d'infrastructure souterraine occasionne inévitablement des coûts. Ceux-ci peuvent être différenciés en deux types de coûts :

- **des coûts directs**, liés à la réparation du bris (les coûts des matériaux de remplacement utilisés, les coûts du matériel utilisé, les coûts de la main-d'œuvre et les coûts administratifs nécessaires à la remise en état des infrastructures endommagées).

- **des coûts indirects**, qui découlent du bris. Ces coûts correspondent à l'évaluation économique de toutes les perturbations qui ont un lien avec les dommages subis. Ils sont variés et peuvent balayer un large éventail de domaines. Ils peuvent représenter la coupure du service aux usagers, les risques à la santé et à la sécurité des travailleurs et des membres des services d'urgence, la perturbation de la circulation routière, la mobilisation des services d'urgence ou encore les frais administratifs liés aux procédures découlant de l'accident. 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.). Des définitions précises seront apportées dans le chapitre suivant. Dans la plupart des cas, ces coûts additionnels sont supportés par la société.

L'ensemble de ces coûts représente les coûts totaux attribuables à un bris d'infrastructure souterraine. Or, si les coûts de réparation d'un réseau sont relativement faciles à identifier et à imputer à un bris, les coûts indirects sont quant à eux difficilement quantifiables et rarement pris en compte dans les décisions en matière de travaux ou de prévention.

³ Assemblée législative de l'Ontario, 2012, « Comptes rendus: Comité permanent des affaires gouvernementales - 18 avril 2012 - Projet de loi 8, Loi de 2012 sur un système d'information sur les infrastructures souterraines en Ontario », disponible à l'adresse suivante : http://www.ontla.on.ca/web/committee-proceedings/committee_transcripts_details.do?locale=fr&BillID=2543&ParlCommID=8958&Date=2012-04-18&Business=&DocumentID=26223

⁴US DOT, PHMSA Serious Pipeline Incidents, disponible à l'adresse suivante, consultée le 24 juillet 2015 : <https://hip.phmsa.dot.gov/analyticsSOAP/saw.dll?Portalpages>

L'objectif général de cette recherche est donc d'identifier et de chiffrer non seulement les coûts directs mais aussi les coûts indirects des bris d'infrastructures souterraines au Québec afin de prévenir les bris et d'inciter le développement de bonnes pratiques chez les entrepreneurs et les municipalités mais aussi chez les propriétaires d'infrastructures et les donneurs d'ouvrage.

Ce projet est d'autant plus pertinent que l'enfouissement des réseaux techniques urbains est de plus en plus fréquent, que ce soit pour des raisons esthétiques (réappropriation de paysages) ou pour des raisons de sécurité (diminution du risque associé aux incidents climatiques, élimination du risque associé à la présence de végétation en milieu urbain). Dans ce contexte, l'importance de mieux gérer les interventions sur les réseaux enfouis prend une dimension encore plus grande.


Afin de mener à bien le projet de recherche, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

1. Développer une typologie des coûts directs et indirects liés à des bris d'infrastructures souterraines.
2. Chiffrer les coûts totaux de quatre cas de bris d'infrastructures souterraines au Québec et estimer le rapport coûts directs / coûts indirects.
3. Développer une méthodologie d'évaluation des coûts indirects totaux des bris d'infrastructures pour le Québec
4. Évaluer les coûts indirects totaux pour l'année 2014 et analyser les bases de données d'Info-Excavation pour identifier les principaux facteurs explicatifs des bris : vers une prévention plus efficace.

3. PLAN GÉNÉRAL DU RAPPORT

Afin de parvenir aux objectifs fixés, nous avons suivi une démarche rigoureuse. Celle-ci se structure au travers des 4 chapitres du rapport :

- **Le premier chapitre** vise à définir les différents types de coûts qui seront abordés dans l'étude. Nous verrons ainsi ce qui différencie les coûts directs des coûts indirects. Ce chapitre présente également les résultats d'une revue de la littérature académique et technique identifiant l'ensemble des facteurs de coûts liés à des bris d'infrastructures souterraines. Pour chaque facteur de coûts indirects identifié, une méthode permettant de les évaluer est présentée.
- Dans le **deuxième chapitre**, nous exposons le choix des études de cas servant d'illustration à l'étude. L'estimation des coûts directs et indirects des 4 études de cas retenues permet d'évaluer leur importance relative.

- 
- **Le troisième chapitre** propose une méthodologie pour évaluer les coûts indirects totaux des bris d'infrastructures pour le Québec.
 - **Dans le quatrième et dernier chapitre,** la méthodologie développée est appliquée aux données de 2014 afin d'estimer les coûts indirects totaux liés à l'ensemble des bris d'infrastructures souterraines déclarés annuellement au Québec pour l'année 2014. Par la suite, une analyse des bases de données d'Info-Excavation permet de mieux cibler la prévention des dommages en identifiant les principaux facteurs explicatifs des bris.

Une conclusion générale reprenant les principaux constats et des recommandations pour chacune des parties prenantes en jeu lors d'un bris d'infrastructures souterraines termine ce rapport.



CHAPITRE 1 : TYPOLOGIE DES COÛTS SOCIO-ÉCONOMIQUES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION ASSOCIÉES

1. DÉFINITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE COÛTS LIÉS À UN BRIS D'INFRASTRUCTURE SOUTERRAINE

Dans un premier temps, il est important de définir les différentes catégories de coûts engendrés par un bris d'infrastructure souterraine. 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. Lorsque l'on regarde la littérature concernant les coûts liés aux bris ou aux remplacements des infrastructures souterraines, on remarque que de nombreuses définitions ont été proposées.

1.1. LES COÛTS DIRECTS

Définition des coûts directs

Nous définissons les coûts directs comme étant les coûts liés à la réparation du bris (remplacement du matériel endommagé et mobilisation de techniciens pour les réparations). Il s'agit donc des coûts nécessaires à la remise en état des infrastructures touchées telles qu'elles étaient avant l'incident (Rahman, Vanier, & Newton, 2005).

Ainsi, les coûts directs considérés 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.

1.2. LES COÛTS INDIRECTS

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

Définition des coûts indirects

Nous définissons les coûts indirects comme étant ceux qui découlent du bris. Ces coûts correspondent à l'évaluation économique de toutes les perturbations ayant un lien plus ou moins important mais avéré avec le bris (Allouche, Ariaratnam, & AbouRizk, 2000).

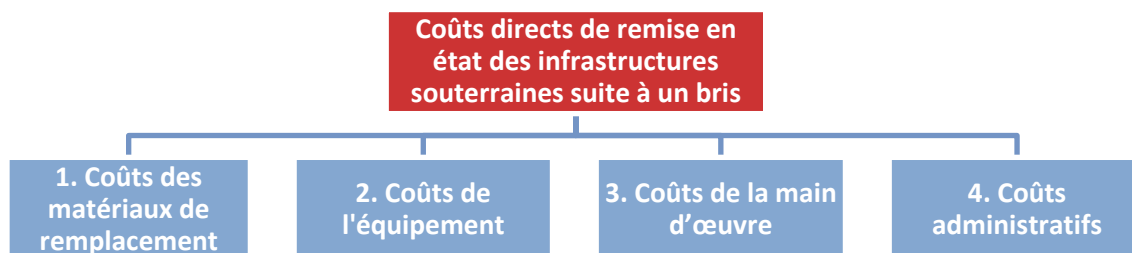
Les coûts indirects sont variés et peuvent balayer un large éventail de domaines. Ils peuvent représenter la coupure du service aux usagers, les dommages à la santé et sécurité des travailleurs, la perturbation de la circulation routière, la mobilisation des services d'urgence, la santé et la sécurité des membres des services d'urgence (on pense ici plus particulièrement aux pompiers) ou encore les frais administratifs liés aux procédures découlant de l'accident. 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.). Dans la plupart des cas, ces coûts additionnels sont supportés par la société. L'ensemble de ces coûts (directs et indirects) représente les coûts totaux attribuables à un bris d'infrastructure souterraine :

Équation 1 : Coûts totaux liés à un bris d'infrastructure souterraine

$$\text{Coûts Totaux} = \text{Coûts Directs} + \text{Coûts Indirects}$$


2. LES COÛTS DIRECTS : TYPOLOGIE ET MÉTHODES DE CALCUL

Dans cette partie, nous allons détailler chacun des éléments de coûts directs.



2.1. COÛTS DES MATÉRIAUX DE REMPLACEMENT

Les premiers coûts à prendre en compte suite à un bris d'infrastructure souterraine sont ceux liés 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 câbles 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 remplacement de câbles de fibre (Khogali & Mohamed, 1999).

2.2. COÛTS DE L'ÉQUIPEMENT UTILISÉ POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES

La remise en état de ces infrastructures nécessite l'utilisation d'équipement 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 est très onéreux et le coût horaire d'utilisation s'en trouve également élevé. Le second facteur déterminant, celui-ci d'avantage lié aux aqueducs, est relatif à la taille des infrastructures touchées. En effet, la taille de ces dernières pouvant atteindre des dimensions très importantes, les équipements doivent être dimensionnés en proportion afin de permettre une remise en état correcte et efficiente.

2.3. COÛTS DE LA MAIN-D'ŒUVRE UTILISÉE POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES

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 formation de la main d'œuvre. Certains intervenant sur les lieux du sinistre peuvent être des personnes hautement qualifiées et ayant parfois dû suivre des formations spécialisées. Ces particularités ont un impact sur le coût horaire, alors plus élevé, faisant ainsi augmenter le montant total des coûts directs. À cela, il faut également prendre en compte les conditions de réparation des infrastructures endommagées (Rahman, et al., 2005). L'aspect urgence est souvent important. Il peut donc 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.

2.4. COÛTS ADMINISTRATIFS NÉCESSAIRES À LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES

Des coûts administratifs sont aussi à prendre en compte. 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). Par ailleurs, un plan d'urgence nécessite 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 souvent la création d'un service spécialisé.

Si les coûts de réparation de la conduite brisée vus précédemment sont en général relativement faciles à identifier et à imputer à un bris car ils correspondent aux coûts qui apparaissent communément sur les bordereaux (Modieli Amadou et al., 2010), les coûts indirects **sont, quant à eux, difficilement quantifiables et rarement pris en compte dans les décisions en matière de travaux ou de prévention.**

3. LES COÛTS INDIRECTS : TYPOLOGIE ET MÉTHODES DE CALCUL

Une revue de la littérature⁵ nous a permis de définir les différents types de coûts indirects liés aux bris d'infrastructures souterraines. Le but était également d'associer à chaque élément de coût une méthode d'estimation.

Les coûts directs sont la partie visible de l'iceberg et ce que l'on voit est nettement moins important que ce qui est caché. En effet, la liste de coûts indirects est souvent longue et certains de ces coûts sont souvent oubliés. L'aspect de situation d'urgence ne fait qu'augmenter l'importance que représentent ces derniers.

La figure suivante liste les principaux types de coûts indirects pouvant être occasionnés et identifiés dans la littérature.

⁵ Ce chapitre est en grande partie tiré de la revue de la littérature du mémoire de maîtrise de Mouchikhine (2013), qui a été réalisé dans le cadre du présent projet de recherche.




Figure 3: Schématisation de l'ampleur des coûts indirects par rapport aux coûts directs d'un bris d'infrastructure souterraine

Les sections suivantes vont permettre de définir chacun de ces coûts et de présenter des méthodes de calcul pour les estimer. La plupart de ces méthodes de calcul seront utilisées dans les études de cas présentées dans le chapitre suivant. Toutefois, lorsqu'il s'agira d'évaluer les coûts indirects totaux des bris d'infrastructures pour le Québec, certaines simplifications seront utilisées compte tenu du niveau de détail des informations sur chaque bris qui n'est pas le même que lorsqu'on réalise des études de cas. La méthodologie et les spécificités retenues pour le calcul des coûts indirects totaux est présentée au chapitre 3.

3.1. COÛTS ASSOCIÉS AUX INTERRUPTIONS DES SERVICES

Lorsqu'un bris d'infrastructure souterraine survient, il est presque toujours accompagné d'une interruption des services de l'infrastructure touchée (peu importe le type de bris, on peut penser à des coupures d'eau, de gaz, d'électricité, d'internet, etc.). Il est important d'ajouter que le service de certaines infrastructures adjacentes peut se retrouver également perturbé. Ces perturbations de service représentent un coût pour la société. Pour les infrastructures électriques par exemple, une interruption de service



représente parfois pour un seul client un coût horaire de plusieurs milliers de dollars. Ce coût peut rapidement augmenter lorsque les clients touchés sont des commerces, des institutions ou des industries. Il ne faut pas négliger que lors d'un bris d'une conduite de gaz, souvent, l'électricité doit aussi être interrompue.

3.1.1. Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service électrique

Il existe plusieurs méthodes servant à calculer les coûts d'interruption de service pour un bris notamment électrique (Cromwell & Pearson, 2002). La première consiste en une approche agrégée 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 deuxième méthode vise à observer le comportement des clients. Plusieurs méthodes ont vu progressivement le jour, l'idée générale étant l'analyse du comportement de consommation et la bonne volonté du consommateur à accepter le désagrément.

La méthode de calcul retenue prend en considération les coûts indirects suivants :

- les dommages causés aux équipements suite à la coupure de service,
- les salaires payés sans qu'il y ait de production et
- les ventes ou production perdues.

Le calcul se fait net des coûts sauvés par l'interruption (e.g. salaires qui n'ont pas dû être versés, coûts d'énergie épargnés). Elle prend également en considération le fait que certaines industries disposent de génératrice en cas de panne. L'évaluation des coûts de l'interruption électrique dans ce rapport de recherche se base entre autre sur une méta-analyse réalisée en 2009 et mise à jour en 2015 par le Berkeley Lab, affilié à l'University of California, Berkeley, et financée par l'Office of Electricity Delivery and Energy Reliability du U.S. Department of Energy (Sullivan et al., 2015). Les données de cette étude ont été utilisées pour l'estimation après qu'elles aient été adaptées afin de refléter la composition industrielle du Québec. Pour ce faire, le pourcentage du produit intérieur brut de la province, par industrie, selon le Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) a été utilisé dans le but d'alimenter la fonction des dommages des clients et obtenir les estimations. Ainsi, la fonction des dommages pour chaque type de clients pour le Québec a été obtenu en utilisant l'outil de calcul, connu

sous le nom d'*Interruption Cost Estimate Calculator (ICE)*⁶, conçu par *Freeman, Sullivan & Co.* et le *Lawrence Berkeley National Laboratory*, en s'étant assuré préalablement qu'il était paramétré⁷ pour le Québec.

La méthodologie développée par Sullivan et al. (2015) distingue trois grandes catégories de clients pour lesquelles les pertes économiques en cas d'interruption de service électrique ne sont pas les mêmes :

- les clients résidentiels
- les petits clients commerciaux et industriels (définis plus précisément par des clients avec une consommation annuelle de moins de 50 000kWh)
- les moyens et grands clients commerciaux et industriels (définis plus précisément par des clients avec une consommation annuelle de plus de 50 000kWh)

Tout comme nous avons dû adapter la méthodologie de Sullivan et al. au contexte industriel du Québec, nous avons également dû établir des équivalences entre les différentes catégories de client utilisées par Sullivan et les clients du principal prestataire de service électrique au Québec, Hydro-Québec. Trois grandes catégories de clients sont répertoriées⁸ au Québec : mineurs, moyens et majeurs.

Tableau 1 : Équivalence entre les catégories de clients de Sullivan et al. (2015) et les clients d'Hydro-Québec

Catégories de clients Hydro-Québec	Catégories de clients dans la méthodologie de Sullivan
Client mineur	Client résidentiel
Client moyen (Commerces ou entreprises et industries de moins de 50 personnes)	Petits clients commerciaux et industriels (consommation annuelle de moins de 50 000kWh)
Client majeur (Entreprises et industries de plus de 50 personnes)	Moyens et grands clients commerciaux et industriels (consommation annuelle de plus de 50 000kWh)

Voici en détails ce qui est considéré dans l'estimation des coûts liés aux interruptions de service électrique pour chaque type de clients.

⁶ Disponible à l'adresse : <http://www.icecalculator.com>

⁷ Cet outil est préconfiguré pour tous les états américains mais laisse tout de même la possibilité de paramétrer la fonction afin de refléter une composition industrielle différente pour l'estimation. Afin d'avoir une estimation pour le Québec, le pourcentage du produit intérieur brut de la province, par industrie, selon le Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) a été utilisé dans le but d'alimenter la fonction des dommages des clients et obtenir les estimations.

⁸ Communication personnelle avec Hydro-Québec.

➤ Clients commerciaux, institutionnels et industriels

Pour la collecte de données concernant les coûts des clients industriels, institutionnels et commerciaux subissant une interruption de service d'électricité, les études de Sullivan se basent sur des enquêtes. Les répondants devaient donner des estimations de leurs coûts monétaires indirects, pour une série de scénarios, des facteurs suivants :

- Dommages des équipements⁹ ;
- Dommage des matériaux ;
- Salaires payés sans production¹⁰ ;
- Autres coûts ;
- Ventes ou production perdues ;
- Pourcentage des ventes devant être récupérées/remboursées comme pourcentage des ventes perdues ;
- Total de ventes perdues ;
- Salaires épargnés ;
- Dépenses épargnées en énergie ;
- Autres coûts épargnés ;
- Coûts totaux.

Les enquêtes comprenaient également des questions concernant la disponibilité d'une génératrice de secours afin de combler les besoins énergétiques en cas d'interruption. Il s'agit d'une interrogation importante, car il est rationnel pour une firme qui minimise ses coûts de se procurer une assurance, dans ce cas une génératrice, afin de mitiger l'impact d'un tel incident. Par conséquent, l'omission de cette question aurait pu entraîner une surestimation des coûts.

➤ Clients résidentiels

Une approche différente a été utilisée pour les clients résidentiels. Pour des scénarios similaires, il leur a plutôt été demandé combien d'argent, ou de crédit de la compagnie d'électricité, ils seraient disposés à recevoir en tant que compensation pour le

⁹ Il s'agit du dommage ayant été subi par la firme affectée par l'interruption de service (e.g. un disque dur mal protégé qui brise suite au manque de courant) et non pas des équipements endommagés comme conséquence directe du bris (e.g. fil électrique accroché par l'excavateur).

¹⁰ Il s'agit des situations où la demande de travail est fixée à l'avance, contractuellement, entre l'employeur et les employés. Par exemple, l'article 42 de la convention collective des employés de l'Université de Montréal (2006-2014), prévoit que : « Lorsque la direction de l'établissement décide d'autoriser, pour raison majeure, la majorité des personnes salariées à quitter leur travail avant la fin de leur journée régulière de travail, la personne salariée ne subit de ce fait aucune perte de son salaire régulier. » Dans le cas contraire, où l'employeur n'est pas dans l'obligation de verser le salaire dans une telle situation, il serait plutôt question de la catégorie « Salaires épargnés ».

désagrément subi par l'interruption de service. L'enquête des clients résidentiels incluait des questions telles que :

- Le type de résidence ;
- Statut du résident : propriétaire ou locataire ;
- Revenu du ménage ;
- Présence d'un malade alité dans la résidence ;
- Utilisation d'équipement médical dans le ménage ;
- Existence d'une entreprise à domicile dans la résidence.

Les valeurs pécuniaires attribuées aux arrêts de service découlent d'une estimation de la « fonction des dommages des clients »¹¹ faite à partir de l'agrégation de 28 études dont la méthodologie est commune et ayant été effectuées dans toutes les régions américaines par les principales compagnies d'électricité, sur une période de 16 ans¹² et pour un échantillon de 11 970 firmes (51 741 cas) et 7 693 ménages (26 026 cas)¹³.

Finalement, pour toute interruption accidentelle du service électrique, la formule de calcul est le produit du nombre total de clients affectés et de leur coût estimé avec l'ICE, et ce, pour chaque type de client. Formellement :

Équation 1 : Coût d'une interruption de service électrique

$$C_E(h_i) = P_R N_R C(h_i, R) + P_m N_m C(h_i, m) + P_M N_M C(h_i, M)$$

Où :

N_k = Nombre total de clients du type k dans la région administrative concernée
(k pouvant prendre la valeur R pour les clients résidentiels, m pour les clients moyens et M pour les clients majeurs)

P_k = Pourcentage de clients du type k ayant été affectés

h_i = Durée de l'interruption du service électrique en heure

$C(h_i, k)$ = Coût estimé avec adaptation de la méthode du Berkeley Lab pour le type de client k en fonction de la durée de l'interruption h_i

$$C_R(h_i) = 2,054 h_i + 3,0597$$

$$C_m(h_i) = 782,75 h_i + 124,2$$

$$C_M(h_i) = 4894,7 h_i + 1502,3$$

¹¹ Concept introduit dans la littérature par Goel & Billinton (1994) comme une équation linéaire expliquant les coûts moyens d'une interruption comme fonction du temps en utilisant des données recueillies grâce à des sondages. Le concept a été raffiné par Keane & Sullivan (1995) en introduisant d'autres variables pouvant prédire les coûts.

¹² 1989-2005; les prix ont été convertis en dollars de 2008 en utilisant le déflateur du produit intérieur brut.

¹³ Les observations aberrantes et manquantes (2,7% des observations des clients résidentiels et 2,8% de celles des clients commerciaux/industriels) ont été mises de côté.

Les fonctions de coûts utilisées pour chaque type de client sont des fonctions affines croissantes. À titre d'exemple, 1h d'interruption de service occasionne des coûts s'élevant à environ 5\$ pour un client résidentiel, à 900 \$ pour un client moyen (petits clients commerciaux et industriels avec une consommation annuelle de moins de 50 000kWh) et à 6000 \$ pour un client majeur (moyens et grands clients commerciaux et industriels avec une consommation annuelle de plus de 50 000kWh).

3.1.2. Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service Internet

Afin d'évaluer les coûts liés à une interruption de service Internet, l'ensemble des activités économiques auxquelles internet contribue sont prises en considération (e.g. les transactions ne pouvant pas avoir lieu, l'arrêt ou le ralentissement de la production). Les estimations sont faites en utilisant la part du produit intérieur brut attribuable à internet. L'apport d'internet dans le produit intérieur brut canadien est estimé à 2,7% selon une étude du McKinsey Global Institute (Pélissier du Rausas et al., 2011). Puis cet apport est assumé comme étant uniformément distribué dans le temps, c'est-à-dire, la même valeur est attribuée à toutes les heures de l'année¹⁴. Il s'agit de la méthode du taux horaire du produit intérieur brut¹⁵.

Formellement, le coût indirect de l'interruption du service d'internet est calculé de la façon suivante :

Équation 2 : Coût d'une interruption de service internet

$$C_I(h_i) = 0,027 \frac{PIB_t}{(24 \cdot 365)} h_i \left(\frac{N_k}{N_T} \right)$$

Où :

N_k = Nombre total de clients affectés par l'interruption de service dans la région administrative concernée

N_T = Nombre total de clients HydroQuébec

PIB_t = Produit intérieur brut du Québec à l'année de l'estimation

¹⁴ Cette hypothèse semble raisonnable puisque la plupart de l'activité économique, et donc des pertes, reliées à l'interruption du service internet a lieu le jour, ce qui ferait en sorte de sous-estimer les coûts.

¹⁵ Voir Cromwell & Pearson (2002) pour une discussion de la méthodologie du taux horaire du produit intérieur brut. Pour une application, voir la section 5.2.2 (*indirect costs*) dans : *Report on the Cost of Asthma in Australia, National Asthma Campaign, 1992*

3.2. COÛTS ASSOCIÉS AU DÉPLOIEMENT DES SERVICES D'URGENCE

De nombreux bris sont à l'origine d'une intervention de la part des services d'urgence, ce qui peut engendrer des coûts relativement élevés. Il paraît donc important de regarder point par point les différents coûts associables à ce type de services (Rylska, et al., 2006).

Les services de sécurité incendie peuvent être mobilisés lorsque la vie des citoyens est mise en danger, quelle qu'en soit la cause. Ainsi, pour tout ce qui concerne les bris d'infrastructures gazières, de pipeline, ou de canalisation provoquant de fortes inondations, des interventions types sont préétablies (selon différents degrés de danger). Il existe à ce titre des manuels qui définissent pour chaque situation (urbain, proche d'habitation, présence de substances dangereuses) le service minimum requis. Les principaux services publics pouvant être appelés sont le service incendie, le service de police et les ambulances.

Lors d'un bris d'une conduite de gaz à Montréal, une équipe de pompiers est obligatoirement dépêchée sur les lieux. Les coûts liés à la mobilisation des véhicules et des effectifs sont non négligeables et peuvent s'accompagner de coûts d'opportunité tout aussi importants si par exemple le fait d'être sur les lieux d'un bris empêche les pompiers (premiers répondants) de répondre dans un temps normal à un appel nécessitant une intervention immédiate (arrêt cardiaque par exemple).

De plus, lors d'un bris majeur pouvant mettre en danger la population ou nécessitant par exemple des fermetures de rues, il est pratiquement indispensable de dépêcher sur les lieux d'autres services d'urgence comme les services de police par exemple. 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. Dans un nombre important de cas, des unités de police supplémentaires sont nécessaires afin d'assurer une sécurité plus élargie.

En outre, suite à une interruption de service reliée à un bris d'infrastructure souterraine, la mise en place d'un service de substitution peut être nécessaire. Ce service est très souvent offert par les services d'urgence. Par ailleurs, 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 total lié au bris.

Dans tous les cas, que cela soit pour le service incendie, le service de police ou pour les services hospitaliers (intervention de véhicules ambulanciers), les coûts liés à l'utilisation de ces ressources peuvent être importants¹⁶. Il en est de même pour les propriétaires d'infrastructures adjacentes. Un exemple sera donné dans le chapitre sur les études de cas.

Méthode d'estimation des coûts liés au déploiement des services d'urgence

Afin d'estimer les coûts liés au déploiement des services d'urgence, il faut déterminer à la fois le taux horaire et le temps d'intervention de chaque unité d'intervention. Après avoir pris contact avec les services identifiés (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 : Taux horaires des différents véhicules d'intervention des services d'urgence

Type de véhicule	Taux horaire d'utilisation
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 prend aussi en compte le taux horaire des personnes présentes à bord des véhicules. Si l'on prend l'exemple d'un véhicule autopompe, le taux horaire estimé de 515 \$/h mis dans le tableau ci-dessus prend en compte le salaire de 4 pompiers présents à bord du véhicule.

Ainsi, pour chaque intervention, il devient possible, en prenant en compte le temps d'intervention, de calculer le coût total de l'utilisation des services publics de sécurité.

¹⁶ 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 où un serrurier et une dépanneuse furent contactés pour avoir accès au lieu du sinistre.

Équation 3 : Coût total d'intervention des services publics de sécurité

Coût total d'intervention des services publics de sécurité

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

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

3.3. COÛTS ASSOCIÉS À L'ÉVACUATION DES RÉSIDENTS ET DES COMMERCES

Dans certains cas, lorsque la sécurité de la population est menacée, les résidents et les commerces proches du bris sont évacués. Des coûts spécifiques peuvent accompagner ces évacuations.

3.4. COÛTS ASSOCIÉS AUX RISQUES DE BLESSURES OU DE DÉCÈS POUR LES TRAVAILLEURS

Les bris d'infrastructures entraînent pour les employés des propriétaires d'infrastructures souterraines une exposition à des risques supplémentaires lors des réparations : risque relié à des fuites de gaz, risques liés au chevauchement d'équipes de travail de différents employeurs, etc.

3.5. COÛTS ASSOCIÉS AUX PERTES DE PRODUITS

Un autre type de 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 et de la taille 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, des hydrocarbures ou encore de l'eau. Même si au Québec la consommation de l'eau potable n'est pas facturée au consommateur¹⁷ à proprement parler, un coût économique doit lui être associé. En effet, avant sa distribution, l'eau a dû être traitée dans des usines spécialisées et cela représente un coût réel pour la société. 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 d'eau représente un coût pour le Québec (Gouvernement du Québec, 2013).

¹⁷ Sauf pour certains très gros consommateurs

Que ces pertes soient facturées ou non, elles représentent une somme que l'on doit estimer. Pour cela, la façon la plus efficace 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 :

Équation 4: Volume du produit perdu

$$\begin{aligned} \text{Volume de fluide perdu (m}^3\text{)} \\ &= \text{Débit de la conduite (m}^3\text{/h)} \times \text{temps de la fuite (h)} \end{aligned}$$

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

Équation 5: Coût associé à la perte de produit


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

3.6. COÛTS LIÉS À LA PERTURBATION DE LA CIRCULATION

Nombreux sont les bris qui ont un impact sur le trafic routier qu'il s'agisse d'une fermeture partielle ou totale d'une section de route (Gourvil & Joubert, 2004). Diverses méthodes permettent de calculer le coût des perturbations affectant le trafic routier. Dans les paragraphes suivants, nous allons énoncer les différents facteurs de coûts associés à une perturbation de la circulation ainsi que les méthodes qui permettent de les estimer.

3.6.1. Coûts liés à la perte de temps 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 apparaît 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 évidemment voire impossible de connaître 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 la 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 conducteur¹⁸.

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), 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).

Contrairement à ce que nous avons pu voir dans différentes études relatives à la congestion du trafic routier, nous aborderons une analyse conciliant 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 entraîne un détour inévitable pour l’ensemble des personnes circulant (voitures et piétons), soit une partie de voie reste ouverte, auquel cas des comportements particuliers peuvent se produire.

Cas a) : Section de route entièrement fermée

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

¹⁸ (Cromwell & 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 courte distance.

Équation 6 : Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules

Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules

$$= \sum_{i=1}^N (\text{Nombre de véhicules de type } i \text{ par jour} \\ \times \text{Taux d'occupation des véhicules de type } i \\ \times \text{Taux horaire d'un passager présent dans un véhicule de type } i \text{ (\$/h)} \\ \times \text{Temps de détour (h)} \times \text{Nombre de jours}$$

Avec N : le nombre de véhicules de type i.

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

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

Équation 7 : Coût de la perte de temps dû au détour des piétons

Coût de la perte de temps dû au détour des piétons

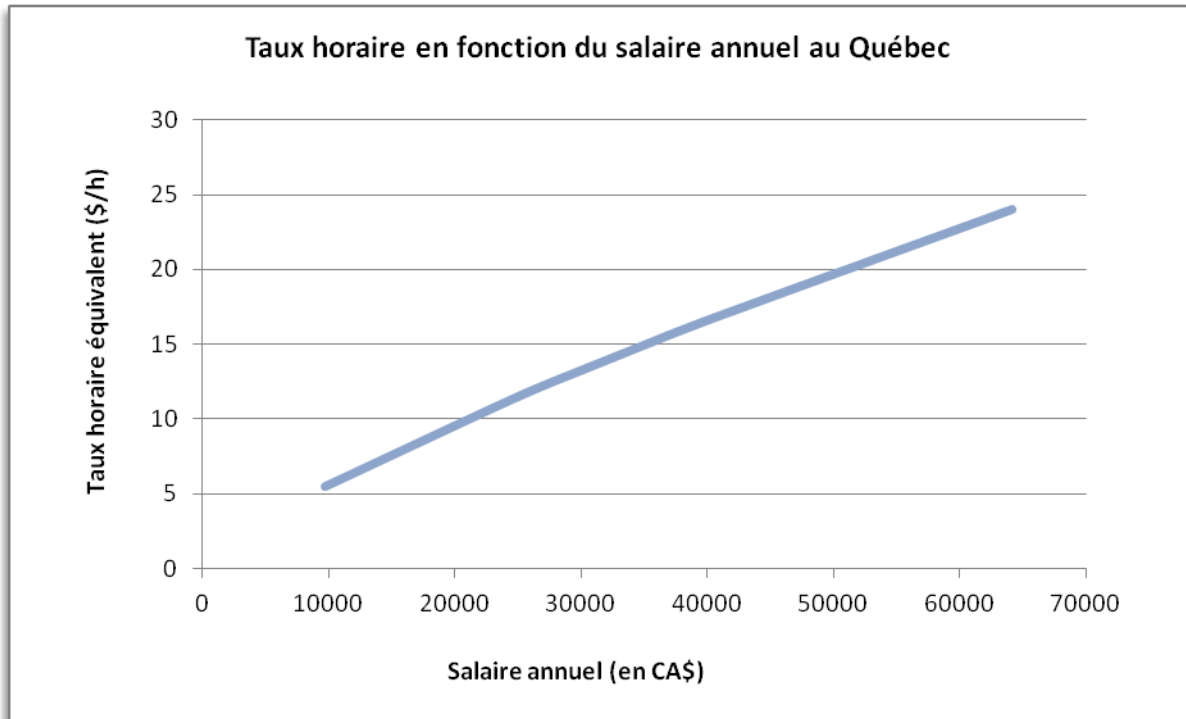
$$= \text{Taux horaire moyen d'un piéton (\$/h)} \times \text{Temps de détour (h)} \\ \times \text{Nombre de piétons par jour} \times \text{Nombre de jours}$$

Cela amène un nouveau problème quant à l'estimation du taux horaire des différents types de véhicules ainsi que du taux d'occupation de ces derniers. En ce qui concerne le taux horaire, il est important comme le mentionnent Gourvil et 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 cette étude, il devient possible d'obtenir une formule définissant le taux horaire à partir du revenu annuel des passagers :

Équation 8 : Estimation du taux horaire en fonction du revenu annuel

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

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



Graphique 1 : Taux horaire en fonction du salaire annuel au Québec (Gourvil & Joubert, 2004)

L'annexe 1 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 d'utilisation d'un véhicule lourd, nous nous baserons sur les chiffres de Gourvil et Joubert (2004). Les estimations sont les suivantes :

Tableau 3 : Taux horaire selon le type de camion utilisé (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

Cas b) : Section de route partiellement fermée

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, il existe un phénomène d'apprentissage de la part des automobilistes. Ainsi, certains vont au fur et à mesure du temps, préférer utiliser des voies de contournement plutôt que d'être coincé dans la congestion. On a donc le choix entre être dans la congestion ou allonger sa distance à parcourir en utilisant des détours. Nous avons observé à la suite de collectes 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 avons constaté que le temps d'attente suivait de près la loi suivante :

Équation 9 : Décroissance du temps de parcours supplémentaire

$$T_c(t) = \frac{T_c(t_{-5}) + T_{d\text{minimum}}}{2}$$

Avec

$T_c(t)$: le temps de parcours supplémentaire dû à la congestion à l'instant t

$T_{d\text{minimum}}$: 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 considérerons 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 :

Équation 10 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion

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

Avec :

Équation 11 : Conditions limites du temps de détour

$$T_c(t) = \frac{T_c(t_{-5}) + T_{d\text{minimum}}}{2}$$

$$T_c(t = 1)$$

= Temps de parcours maximum mesuré pour les véhicules congestionnés

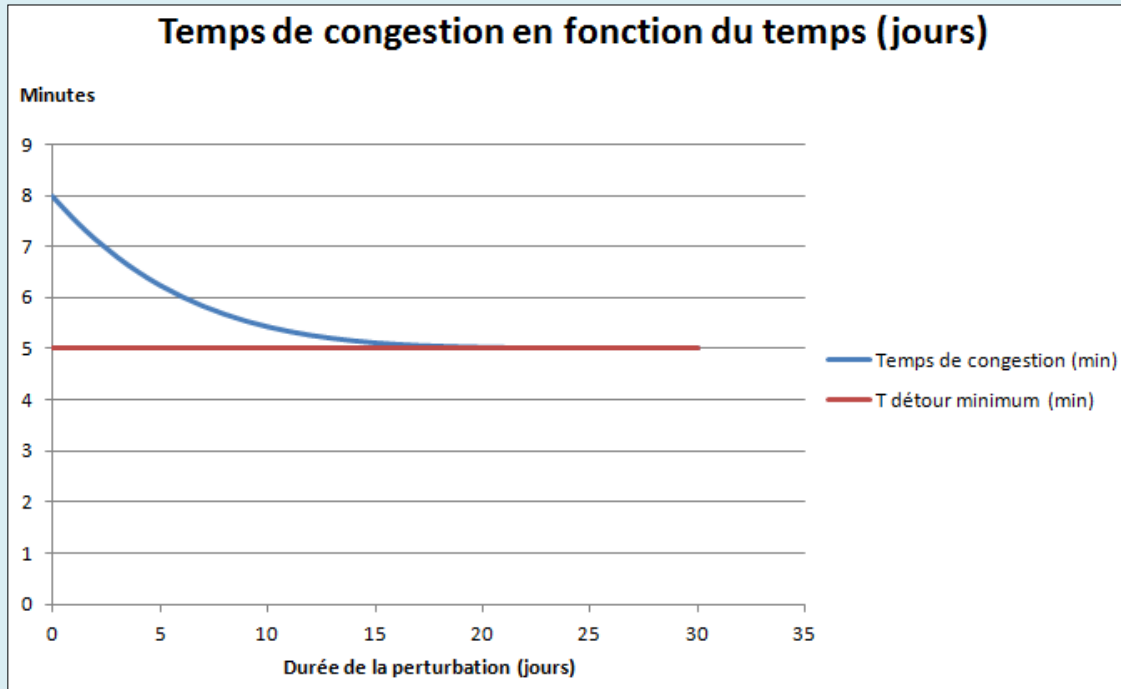
$$T_c(t \geq 20) = T_{d\text{minimum}}$$

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

$$T_c'(t = 20) = 0 \text{ avec } T_c'(t) = \frac{dT_c(t)}{dt}$$

Exemple 2

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 supplémentaires dû à la congestion les profils suivants :



Graphique 2 : Temps de parcours supplémentaire dû à la congestion en fonction du temps

En annexe 2, 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 :

Équation 12 : Nombre de véhicules impactés par la congestion en fonction du temps

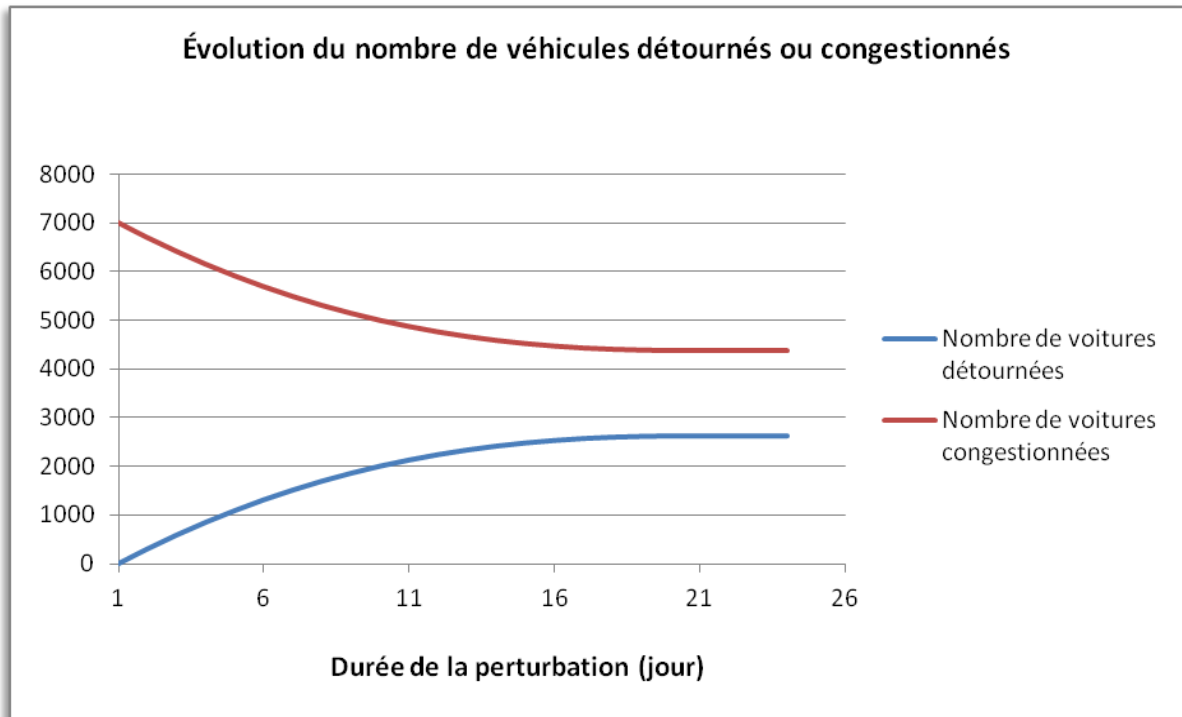
$$\begin{aligned} & \text{Nombre de véhicules impactés par la congestion (t)} \\ &= \text{Nombre de véhicules impactés par la congestion (t}_{-1}) \\ & \times \frac{\text{Temps de parcours dû à la congestion (t)}}{\text{Temps de parcours dû à la congestion (t}_{-1})} \end{aligned}$$

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 :

Équation 13 : Nombre de véhicules perturbés

$$\begin{aligned} \text{Nombre de véhicules perturbés (t)} \\ &= \text{Nombre de véhicules congestionnés (t)} \\ &+ \text{Nombre de véhicules détournés (t)} = \text{constante} \end{aligned}$$

Le reste des véhicules non congestionnés utilisera un itinéraire de substitution. Ce dernier itinéraire sera au fur et à mesure du temps de plus en plus emprunté. En reprenant l'exemple précédant et en supposant un trafic de 7000 véhicules par jour, cela nous donne le profil suivant :



Graphique 3 : Évolution du profil du nombre de véhicules perturbés (congestion et contournement)¹⁹

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.

¹⁹ En annexe 3, se trouvent les données numériques pour le même exemple.

Équation 14 : Nombre de véhicules perturbés

Coût de la perte de temps dû à la congestion des véhicules

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

avec

N : le nombre de véhicules de type i

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.

Équation 15 : Coût de la perte de temps dû au détour des véhicules

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

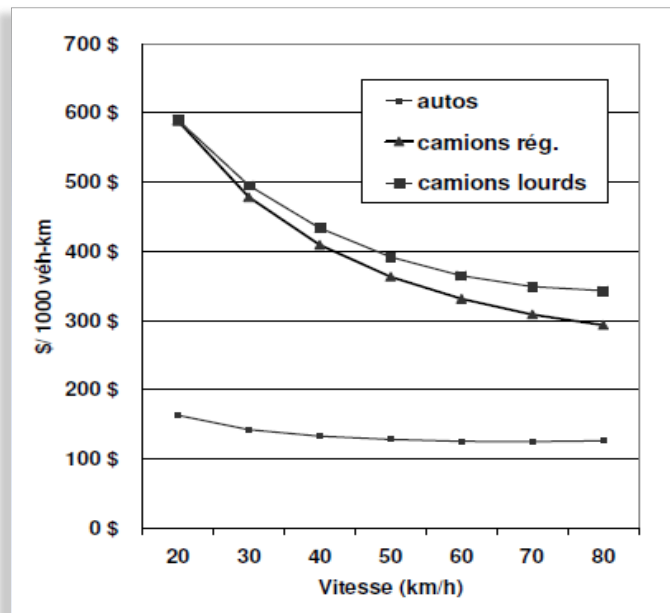
N : le nombre de véhicules de type i

M : le nombre de jours pour la durée des travaux.

3.6.2. Coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien) et à la surconsommation de carburant

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 entraîne une inévitable augmentation des coûts liés aux deux 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 (qui correspondent à des situations de congestion). Ce phénomène est marqué pour les automobiles, mais il est surtout visible pour les véhicules lourds, comme les camions.



Graphique 4 : Coûts d'utilisation des véhicules en fonction de la vitesse en situation de congestion, hors coût du carburant, en CA\$ 1998 (Gourvil & Joubert, 2004)

Plusieurs paramètres sont essentiels pour calculer les coûts supplémentaires d'utilisation des véhicules. 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 :

Équation 16 : Coût lié à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien)

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

avec

N : le nombre de véhicules de type i

M : le nombre de jours pour la durée des travaux.

Exemple 3

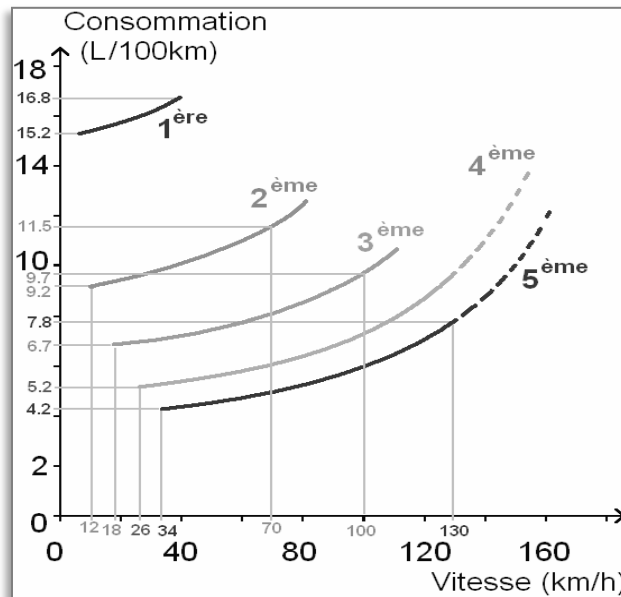
Ainsi, en utilisant les chiffres de CAA datant de 2013²⁰, pour une Honda Civic LX, le coût de fonctionnement kilométrique sans compter l'essence (c'est à dire, les coûts d'entretien et de pneu) est de 5,13 cents/km. En prenant en compte un détour d'un kilomètre pour 2000 véhicules légers pendant 3 jours, cela nous donne :

Coûts supplémentaires d'utilisation des véhicules

$$= 1 \text{ (km/véhicule)} \times 0,0513 \text{ (\$/km)} \times 2000 \text{ (véhicules/jour)} \\ \times 3 \text{ (jours)} = 307,80 \text{ \$}$$

Un détour à priori anodin représente en réalité un coût s'élevant à plusieurs centaines de dollars. Une fois encore, si le coût unitaire paraît 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. En effet, pour des vitesses très réduites, le graphique suivant nous montre les différences de consommations moyennes visibles d'un régime à un autre.



Graphique 5 : Profil de consommation d'un véhicule

²⁰ Source :

https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur_la_route/Couts_utilisation/2013_CAA_Driving_Costs_French.pdf

Ainsi, nous remarquons pour une vitesse inférieure à 15 km/h, la consommation sera forcément plus importante que pour des vitesses comprises entre 15 et 90 km/h (changement de régime). Différentes méthodes d'évaluation de la consommation existent. Cependant, nous avons retenue 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.

Équation 17: Coût lié à la surconsommation de carburant dû à la congestion

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

Avec

N : le nombre de véhicules de type i

M : le nombre de jours pour la durée des travaux

C_{Pi} : la consommation moyenne par kilomètre en régime perturbé pour un véhicule de type i

C_{Li} : la consommation moyenne par kilomètre initiale pour un véhicule de type i.

Exemple 4

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

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

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 lorsque l'on aborde l'aspect augmentation de la distance parcourue. Ainsi, la formule applicable sera la suivante :

Équation 18: Coût relié à la surconsommation de carburant dû aux détours

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

Avec

N : le nombre de véhicules de type i

M : le nombre de jours pour la durée des travaux

Exemple 5

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 :

$$\begin{aligned} & \text{Coût de la surconsommation due à un détour} \\ & = 0,08 \text{ (L/km)} \times 1 \text{ (km)} \times 1,3 \text{ (\$/L)} \times 3 \text{ (jours)} \\ & \times 2000 \text{ (véhicules/jour)} = 624 \$ \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & \text{Coût de la surconsommation totale} \\ & = \text{Coût de surconsommation dû à la congestion} \\ & + \text{Coût de la surconsommation dû au détour} = 386,10 + 624 \\ & = 1\,010,10 \$ \end{aligned}$$

3.6.3. Coûts liés à la difficulté d'accès pour les véhicules d'urgence dans la zone où a eu lieu le bris

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, etc.). 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).

3.6.4. Coûts liés à l'augmentation possible du nombre 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). Manutova et al. (2009) ont établi une estimation des coûts relatifs à différents types d'accident, ces derniers pouvant aller de quelques milliers de dollars à presque cent mille dollars. Ces coûts ne prennent en compte que les aspects matériels et la mobilisation de ressources lors d'accident. Ils 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.

Tableau 4 : Coût moyen par type d'accident (Manuilova, et al., 2009)

Accidents avec :	Coût moyen (CA\$ 2006)
Dommages aux véhicules	3 500 \$
Blessures	16 000 \$
Décès	96 000 \$

3.6.5. Coûts liés à la Perte d'espaces de stationnement proches du bris

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 pour les municipalités et peut être chiffrée comme un coût indirect.

Ces coûts comprennent 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 suivant :

Équation 19: Coût relié à la perte d'espaces de stationnement

Coût de la perte d'espaces de stationnement

- = Nombre de places de stationnement non accessibles
- × Taux du parcomètre (\$/h)
- × Nombre d'heure opérationnelles par jour (h/jour)
- × Taux d'occupation de l'espace concerné (%)
- × Durée de l'intervention (jour)

De plus, toute zone de stationnement ouverte au public, que celle-ci soit payante ou non, est régie par une réglementation 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. Pucker et al (2006) ont mis en place un modèle pour évaluer ce type de coûts :

Équation 20: Coût des pertes dues à l'absence d'amendes de stationnement (Pucker, et al., 2006)

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

Afin d'illustrer les modèles précédemment énoncés, nous proposons l'exemple d'une remise en état d'une infrastructure souterraine durant une période de 10 jours.

Exemple 1

Estimons une zone supprimant, en raison de la fermeture d'une des 2 voies, 15 place de stationnement dont le taux horaire se chiffre à 2 \$ par heure de 9 h à 18h. Considérons que ces stationnements sont occupés aux 2 tiers et que le tiers de cette zone corresponde à une interdiction de stationnement. Avec une fréquence de 4 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 :

Coût de la perte de stationnement

$$\begin{aligned} &= 15(\text{stationnements}) \times 2(\$/\text{h}) \times 9(\text{h}) \times 2/3(\%) \times 10(\text{j}) \\ &= 1800 \$ \end{aligned}$$

Coût des pertes dues aux amendes de stationnement

$$\begin{aligned} &= 52(\$) \times 4(\text{billets/h}) \times 10(\text{j}) \times 9(\text{h/jour}) \\ &\times 0,5(\% \text{ des espaces de stationnement interdits perdus}) \\ &= 9\,360 \$ \end{aligned}$$

Coût total = 1 800 \$ + 9 360 \$ = 11 160 \$

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.

3.7. COÛTS ASSOCIÉS AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Lors d'un bris d'infrastructure souterraine, différentes perturbations environnementales peuvent se manifester que ce soit une pollution des sols, une pollution de l'air ou encore une pollution sonore.

3.7.1. Coûts associés à la pollution de l'air et aux gaz à effet de serre

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.

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 (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x) 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 & Allouche, 2005)). 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 communément admises : un gramme de méthane sera équivalent à 21 grammes de CO₂ et un gramme de N₂O sera quant à lui comparé à 310 g de CO₂ (Gourvil & Joubert, 2004).

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

Tableau 5 : Coûts métriques des matières polluantes (Gourvil & Joubert, 2004)

	CO ₂	CO	HC	NO _x	SO _x	PM
Coûts en \$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.

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

Équation 21 : Coût de la pollution de l'air (via augmentation de particules et de gaz nocifs)

Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz et de particules

$$= \sum_{i=1}^N (\text{Coût volumique de l'élément } i \text{ (\$/tonne métrique)}) \\ \times \text{Volume de l'élément } i \text{ émis (tonne métrique)}$$

avec N : le nombre total d'éléments émis.

Cependant, il est très difficile, voire, impossible d'évaluer l'ensemble des particules émises et de calculer ainsi 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. On peut établir un réel lien entre ces émissions de gaz à effet de serre et la surconsommation des véhicules, que celle-ci soit due à l'augmentation de la distance parcourue ou aux différents phénomènes de congestion. On sait effectivement 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 en représentent respectivement 0,8% et 0,4%. Ainsi, une méthode de substitution pour le calcul de ces coûts pourrait être la suivante :

Équation 22: Coût lié à la pollution attribuable à la congestion

Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz à effet de serre

$$= \text{Coût totaux dus à la surconsommation des véhicules} \\ \times \frac{\text{Pourcentage des coûts attribuables aux divers émissions}}{\text{Pourcentage des coûts attribuables à la surconsommation total}} \\ = \text{Coûts totaux dus à la surconsommation des véhicules} \\ \times \frac{0,8 + 0,4}{1,4} \\ = \frac{6}{7} \times \text{Coûts totaux dus à la surconsommation des véhicules}$$

avec N : le nombre total d'éléments émis.

Cette méthode apparait comme la plus pertinente étant donné le fait que les mesures effectuées par Gourvil et 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.

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 à nettoyer eux-mêmes les lieux. Ces coûts peuvent se calculer de différentes façons. Ils seront souvent identifiés sur une facture en cas de sollicitation de professionnels ou ils correspondront au temps passé à nettoyer pour un particulier (Ormsby, 2009)²¹.


3.7.2. Coûts associés à la pollution des eaux et des sols

Lors de certains bris de canalisation d'eau potable ou d'une conduite de gaz, il est possible qu'une pollution des eaux ou des sols environnants survienne (Gilchrist & Allouche, 2005). Cela peut engendrer de nombreuses complications, tant environnementales que sanitaires. Ainsi, Gilchrist et 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 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.

Pour ce qui est de la pollution des eaux, un avis d'ébullition de l'eau 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. Par exemple, à Gatineau, il y a un avis d'ébullition décrété pour 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 ou de gaz. Ces changements de comportement s'accompagnent d'une 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 les cas de contamination de l'eau peuvent entraîner 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,

²¹ 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. Cela implique donc un contrôle pour l'ensemble des lieux touchés, mais également les coûts liés aux personnes affectées et hospitalisées (Modieli Amadou, et al., 2010).



ou 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 de prise en charge des patients malades viendront s'ajouter à la précédente liste des coûts.

3.7.3. Coûts associés aux bruit et aux vibrations sur la valeur immobilière

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 bruit que les personnes travaillant dans un environnement proche. Ainsi, le bruit et les vibrations sont une 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, & 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 & 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 6 : 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 4 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 & Allouche, 2010). Celui-ci servira alors à estimer le coût relatif du bruit, ce dernier pouvant être exprimé sous la forme suivante :

Équation 23: Coût dû à la pollution sonore sur la valeur des propriétés

Coût (ou perte de valeur) dû à la pollution sonore sur la valeur des propriétés

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

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.

Exemple 6

Le loyer mensuel est de 2000 \$. Durant 6 mois, des travaux de remise en état vont provoquer une augmentation du volume sonore de 10 dBA. La perte de valeur de l'appartement sera la suivante :

Coût de la pollution sonore sur la valeur de l'appartement


$$= 10 \text{ (dBA)} \times 0,010 \text{ (\%/dBA)} \times (2000 \text{ (\$)} \times 6 \text{ (mois)}) \\ \times 0,50 \text{ (\%)} = 600 \text{ \$}$$

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.

3.8. COÛTS ASSOCIÉS À LA 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 à la suite de travaux (Khogali & 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 privées 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. Il existe plusieurs techniques d'excavation : 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 voire 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 peut induire fortement sur la perte de valeur des infrastructures, notamment routières. Des 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 & Croveti, 1987). Par conséquent, les dommages provoqués par ces travaux peuvent aussi réduire la durée de vie de la chaussée et augmenter la fréquence des programmes de maintenance engendrant ainsi la prise en charge de nouveaux coûts.

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. Les mêmes méthodes que celles utilisées pour déterminer les coûts directs liés à un bris d'infrastructure seront utilisées.

3.9. IMPACTS ÉCONOMIQUES SUR LES COMMERCES ET LES ENTREPRISES

Un autre point très important lorsque l'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. En effet, on peut penser à une diminution du chiffre d'affaires, soit due à une baisse de la productivité due à la pollution sonore dans le milieu de travail, à des retards et absences au travail (qui peuvent être dus à la congestion, etc.), à l'interruption des services (moyens de paiement / internet, etc.), à l'accessibilité difficile au commerce ou encore à des pertes d'inventaires ou des dommages d'équipements causés par une interruption du service électrique (cette dernière partie a été traitée dans la section sur les coûts liés à une interruption du service électrique et interruption du service Internet).

3.9.1. Coûts associés à la 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 :

Équation 24 : Coût de la pollution sonore dans le milieu professionnel

Coût de la pollution sonore dans le milieu professionnel

= Durée du projet (h)

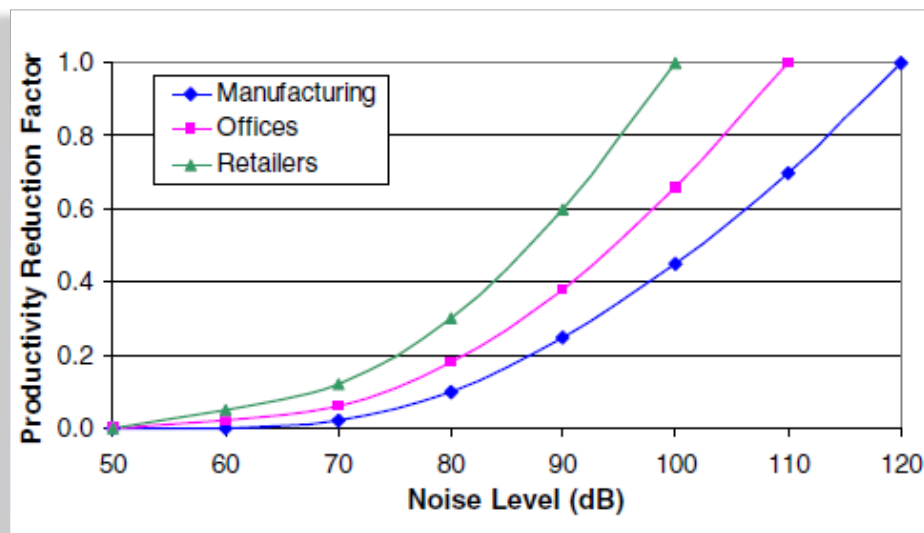
× $\sum_{i=1}^N$ (Facteur de réduction de productivité pour un travailleur i

× Taux horaire moyen d'un travailleur i (\$/h)

× Nombre de travailleurs i affectés)

Sachant que : 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.



Graphique 6 : Facteur de réduction de la productivité en fonction du bruit (Gilchrist & Allouche, 2005)

Un autre désagrément accompagne le bruit. Il s'agit des vibrations dues aux travaux de remise en état et de l'activité des machineries utilisées, mais aussi les vibrations dues au trafic routier, principalement les camions et autres véhicules lourds. Ces vibrations entravent le bien-être et la productivité des employés. 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 & Allouche, 2005) une estimation du coût des vibrations serait la suivante :

Équation 25: Impacts monétaires des vibrations sur les travailleurs (Gilchrist & Allouche, 2005)

Coût des vibrations sur les travailleurs

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

3.9.2. Coûts associés aux 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 présentisme coûte également, entre 8% et 60% de plus que les soins médicaux nécessaires.

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

Équation 27 : Coût de l'absence au travail

Coût de l'absence au travail

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

avec N : le nombre d'employés de type i.

Ce coût peut devenir très élevé lorsque, par exemple, l'accès à un bâtiment se trouve bloqué en raison d'un bris d'infrastructure souterraine.

3.9.3. Coûts associés à la diminution du chiffre d'affaires

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, mais cela ne se limite pas à toucher les employés, cela touche également les clients et se comprend surtout par la difficile accessibilité des lieux. En effet, comme nous l'avons vu, un bris d'infrastructure souterraine entraîne 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. Cependant, lorsque l'on analyse plus largement la situation, on peut considérer que cette baisse de chiffre d'affaires va se

répercuter 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 commerçants sont les pertes dues à une destruction partielle ou totale de leurs produits et de leurs marchandises (pertes de nourritures suite à une interruption de l'alimentation en électricité, etc.).

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 (Revenu Québec, 2015)

3.10. COÛTS ASSOCIÉS AUX RETARDS DANS L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

Le temps perdu à colmater la fuite, réparer la conduite, etc., occasionne souvent des délais au chantier en cours qui peuvent conduire à des pénalités de retards pour les entrepreneurs (en cause dans le bris ou qui doivent arriver après l'entrepreneur fautif dans les phases de construction) ou encore à des dépassements de coûts dus aux heures supplémentaires ou au personnel supplémentaire embauché pour faire face au retard. De plus, en cas de blessures ou pour des raisons légales, le chantier peut être fermé pour investigation, ce qui occasionne des coûts supplémentaires. 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).

3.11. COÛTS ASSOCIÉS À L'IMPACT SUR LA RÉPUTATION DE L'ENTREPRISE PROPRIÉTAIRE DE L'INFRASTRUCTURE

Cet élément est difficilement quantifiable. Toutefois, lors d'un bris, des véhicules identifiés au nom de l'entreprise propriétaire du réseau se trouvent la plupart du temps sur les lieux du bris et peuvent perturber la circulation. Ils sont donc visibles et peuvent nuire à la réputation de l'entreprise. Par ailleurs, les interruptions de services peuvent également porter atteinte à la réputation de l'entreprise.

3.12. FRAIS ADMINISTRATIFS OU LÉGAUX

Lors d'une inondation par exemple, des dépenses seront à comptabiliser au niveau administratif afin de traiter les plaintes et réclamations. Ces coûts peuvent être supportés soit par une municipalité, soit par un assureur.

3.13. COÛTS ASSOCIÉS À UNE BAISSÉ DE LA QUALITÉ DE VIE

La plupart des facteurs de coûts indirects présentés ont comme impact en plus des coûts énumérés précédemment une baisse de la qualité de vie des citoyens touchés (Gilchrist & Allouche, 2005). De la perte de temps à l'énerverment, 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 apparaît donc que l'aspect moral est à prendre en compte à côté de l'aspect plus financier que représente ce type de perturbations.

3.14. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de faire état de la revue de la littérature et des méthodes de calcul existantes pour pouvoir évaluer le coût socio-économique des bris d'infrastructures souterraines. Bien entendu, tous ces coûts ne seront pas nécessairement évalués, et leur estimation dépendra des données disponibles.

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 ajuster et de les convertir pour le Québec afin d'apporter une précision aux études.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des coûts directs et indirects engendré par un bris d'infrastructure souterraine

COÛTS DIRECTS
COÛTS DES MATÉRIAUX DE REMPLACEMENT
COÛTS DE L'ÉQUIPEMENT UTILISÉ POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES
COÛTS DE LA MAIN-D'ŒUVRE UTILISÉE POUR LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES
COÛTS ADMINISTRATIFS NÉCESSAIRES À LA REMISE EN ÉTAT DES INFRASTRUCTURES
COÛTS INDIRECTS
COÛTS ASSOCIÉS AUX INTERRUPTIONS DES SERVICES
Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service électrique
Méthode d'estimation des coûts liés à une interruption de service Internet
COÛTS ASSOCIÉS AU DÉPLOIEMENT DES SERVICES D'URGENCE
Coûts associés à l'intervention des services publics de sécurité
Coûts associés à la mise en place d'infrastructures de substitution
COÛTS ASSOCIÉS À L'ÉVACUATION DES RÉSIDENTS ET DES COMMERCES
COÛTS ASSOCIÉS AUX RISQUES DE BLESSURES OU DE DECÈS POUR LES TRAVAILLEURS
COÛTS ASSOCIÉS AUX PERTES DE PRODUITS
COÛTS LIÉS À LA PERTURBATION DE LA CIRCULATION
Coûts liés à la perte de temps pour les véhicules et les piétons
Coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien) et à la surconsommation de carburant
Coûts liés à la difficulté d'accès pour les véhicules d'urgence dans la zone où a eu lieu le bris
Coûts liés à l'augmentation possible du nombre d'accidents de la circulation
Coûts liés à la perte d'espaces de stationnement proches du bris
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX
Coûts associés à la pollution de l'air et aux gaz à effet de serre
Coûts associés à la pollution des eaux et des sols
Coûts associés à l'impact des bruits et des vibrations sur la valeur immobilière
COÛTS ASSOCIÉS À LA PERTURBATION DES SOLS ET À LA RÉDUCTION DE LA DURÉE DE VIE DES INFRASTRUCTURES ADJACENTES
IMPACTS ECONOMIQUES SUR LES COMMERCES ET ENTREPRISES
Coûts associés à la baisse de la productivité
Coûts associés aux retards et aux absences au travail
Coûts associés à la diminution du chiffre d'affaires
COÛTS ASSOCIÉS AUX RETARDS DANS L'EXECUTION DES TRAVAUX
COÛTS ASSOCIÉS A L'IMPACT SUR LA REPUTATION DE L'ENTREPRISE PROPRIETAIRE DE L'INFRASTRUCTURE
FRAIS ADMINISTRATIFS OU LEGAUX
COÛTS ASSOCIÉS À LA BAISSSE DE LA QUALITE DE VIE



CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DES COÛTS TOTAUX DE QUATRE ÉTUDES DE CAS

1. MÉTHODOLOGIE DES ETUDES DE CAS

1.1. CHOIX DES ÉTUDES DE CAS

Afin d'illustrer les méthodes d'estimation des différents types de coûts proposées et pour évaluer le ratio coûts indirects / coûts directs, quatre études de cas ont été réalisées. Ces études de cas se veulent représentatives des bris d'infrastructures souterraines au Québec. Les cas ont été choisis afin d'illustrer :

- les différents types d'infrastructures qui peuvent être touchées (télécommunication, gaz, eau) ;
- des bris d'ampleur différente ;
- les différents éléments de coûts présentés dans la revue de littérature.

Les quatre études de cas suivantes ont été retenues :


Étude de cas (1) : Bris d'une conduite de gaz dans le centre-ville d'une grande agglomération au Québec
Étude de cas (2) : Bris d'une conduite de télécommunication dans une grande agglomération au Québec
Étude de cas (3) : Bris mineur d'une canalisation d'eau dans une agglomération de taille moyenne au Québec
Étude de cas (4) : Bris majeur d'une conduite d'eau dans une ville québécoise

Les trois premiers bris sont relativement fréquents et récurrents. Par contre le dernier cas concerne un bris majeur à faible occurrence. L'étude de ces cas permet ainsi de couvrir un grand nombre de type de bris auxquels les propriétaires ou exploitants d'infrastructure sont confrontés.

Il est également important de préciser que les deux premières études de cas décrivent les coûts associés à des bris d'infrastructures souterraines occasionnés par des tiers alors que les deux derniers représentent des bris d'infrastructures causés soit par la vétusté du réseau ou par la corrosion. Toutefois en cas de bris, les conséquences sont les mêmes qu'elle qu'en soit la cause.

Pour les études de cas, il y a deux configurations possibles :

- Les études de cas de bris *a posteriori* (qui ont eu lieu avant notre étude et pour lesquels nous avons collecté des données auprès des différentes parties prenantes)
- Les études de cas de bris qui ont eu lieu pendant la réalisation de notre étude (« en direct ») et pour lesquels nous avons pu collecter des données durant l'événement et



interviewer les parties prenantes en plus de collecter des données secondaires après l'événement.


1.2. COLLECTE DES DONNÉES POUR LES ÉTUDES DE CAS

Pour calculer les coûts totaux, les coûts directs représentent les coûts communément facturés lors de travaux planifiés de longue date. 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 parlée, mais plutôt de collecte de données auprès des différents intervenants lors de la remise en état des infrastructures. En revanche, pour ce qui est des coûts indirects liés à l'accident, ceux-ci ne peuvent être calculés aussi facilement que les coûts directs. 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'infrastructure souterraine, 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 ou de nouvelles formules d'estimation.

Lors de la réalisation de nos études de cas, nous avons conduit des entrevues et mener des cueillettes d'informations dans le but d'obtenir le maximum de données provenant des acteurs qui étaient sur les lieux du bris. Selon le type d'infrastructures touchées, nos investigations ne se sont pas dirigées vers le même type de personne. 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.

1.2.1. Collecte d'informations sur les lieux des bris

Lors de la collecte d'informations 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. 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 d'urgence 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 pour chaque partie prenante 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 le 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 ont été développés afin de récolter le maximum d'informations.

1.2.2. Collecte de données a posteriori

La démarche à adopter est quelque peu différente de celle énoncée précédemment lorsqu'il s'agit de l'étude d'un bris qui a déjà eu lieu, tant sur le déroulement de la recherche de données que sur la nature des informations recherchées auprès des différents interlocuteurs.

Données concernant les interventions des services et des entreprises

Lors des collectes *a posteriori*, il est nécessaire dans un premier temps de rentrer en contact avec les services qui sont intervenus lors du bris. Qu'il s'agisse des services d'urgence tels que les pompiers ou la police, ou des autres services (service de l'eau, 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 permettent de comprendre en détail la situation alors présente sur les lieux au moment du bris.

Données concernant les causes du bris

La prise de contact avec les différents services permet de connaître la ou les causes principales du bris. La connaissance des causes et circonstance du bris permet ainsi d'appréhender de façon juste les coûts applicables ou non. Par exemple, nous pouvons considérer que la présence de travaux avant l'apparition du bris était déjà la source d'une congestion. Du coup dans un tel cas nous ne prendrons pas en compte de coûts supplémentaires de congestion ou de détour.

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. Ce type de données est parfois difficile à recenser par l'intermédiaire des différents services d'urgence.

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

Les autres données importantes pour l'étude ont été obtenues par plusieurs sources. Par exemple, des données sur le flux de circulation dans les rues de Montréal sont accessibles via le portail de données ouvertes de la Ville. Un fichier fait état du comptage des véhicules et des piétons à la majorité des intersections munies de feux de circulation, ainsi que certaines intersections où l'installation de feux était à l'étude. Pour chacune de ces intersections, le nombre de véhicules et de piétons a été relevé à différentes périodes d'une journée type (Ville de Montréal, 2013).

La figure 2 récapitule les différentes démarches suivies lors de nos différentes études de cas :

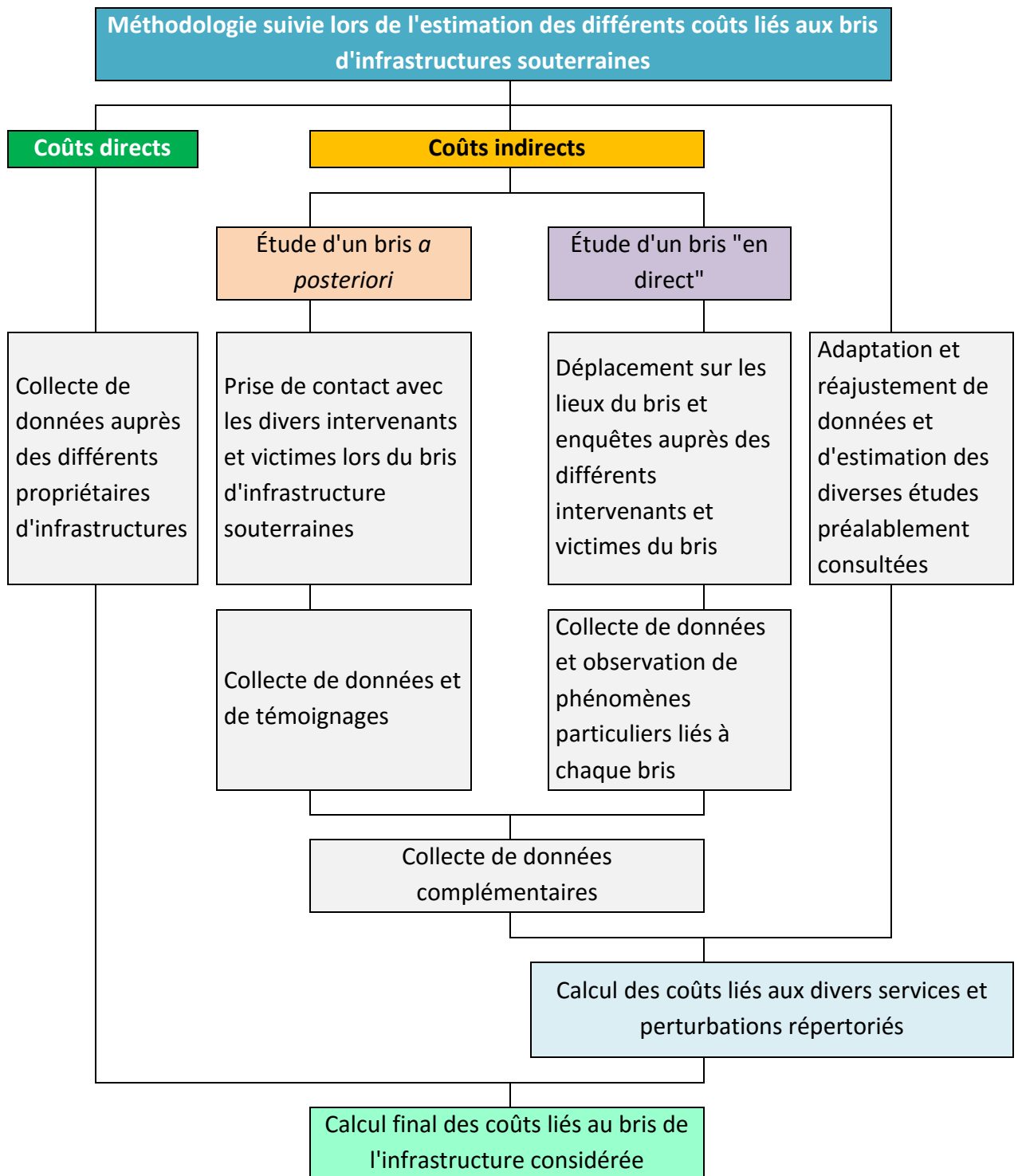


Figure 4 : Méthodologie générale adoptée lors des études de cas

Dans les études de cas qui vont suivre, nous avons utilisé les 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. Chaque cas sera documenté avec le plus de détails disponibles.

2. ÉTUDE DE CAS 1 : BRIS D'UNE CONDUITE DE GAZ DANS LE CENTRE VILLE D'UNE GRANDE AGGLOMÉRATION

L'étude de cas 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 eu lieu en milieu résidentiel au début du mois de novembre 2012, à Montréal.

2.1. LOCALISATION DU BRIS

La section de l'avenue Coloniale dans laquelle est survenu le bris se situe dans un 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. Ce quartier résidentiel regroupe un grand nombre d'habitations (de type triplex pour la plupart) ainsi que des commerces et des petites entreprises (dentiste, restaurants, etc.). Cette rue s'avère être une artère en sens unique assez peu empruntée. Ce cas permet donc d'illustrer le bris d'une infrastructure souterraine situé dans une rue au sein d'un quartier résidentiel de Montréal ou d'une ville à forte densité démographique.



Figure 5 : Aperçu du 3459 Avenue Coloniale

2.2. DESCRIPTION DU BRIS

Le bris est survenu, le mardi 6 novembre 2012 vers 11h. 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 rendus sur les lieux avec le Chef aux Opérations et membre de la direction de la planification stratégique. Cela nous a permis d'accéder à la zone de sinistre, où se trouvent les équipes d'intervention, moins de 10 minutes après que l'alerte ait été déclenchée. Le bris a été causé par une entreprise d'excavation qui a accroché les installations souterraines de Gaz Métro²² 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.



Figure 6 : Pelle mécanique responsable du bris

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. Leur première mission 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.

²² Principal distributeur de gaz naturel de ville au Québec



Figure 7 : Conduite de gaz touchée

Un aspect important de ce bris est que les équipes de Gaz Métro ne pouvaient pas intervenir sans une coupure générale de l'électricité car les risques d'explosion étaient trop grands. Les services de la SIM étaient alors en charge de la supervision des opérations durant la période de gestion de crise²³, 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.

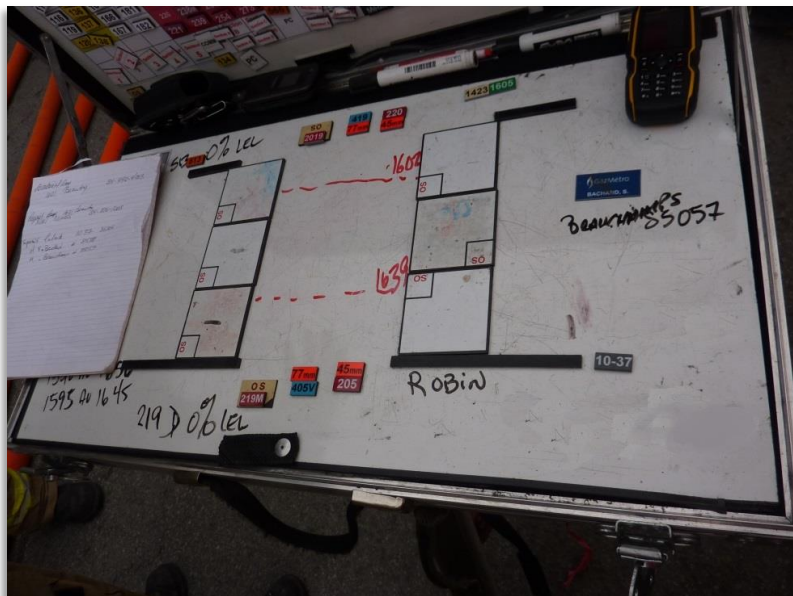



Figure 8 : Table du poste de commandement des services de la SIM

²³ Procédure habituelle pour tous les événements de fuite de gaz qui surviennent à Montréal



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 était coupée mais il a été 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 10 et 15%, les risques d'explosion se situent au niveau le plus élevé. À cela, il est également important d'ajouter les risques d'intoxication mettant en danger la santé des résidents.


2.3. 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 Excavation²⁴. À la suite de cette demande, les services d'Info Excavation ont transféré cette demande aux différentes sociétés propriétaires d'infrastructures souterraines 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 car les plans de localisation n'avaient pas été amenés sur le chantier. 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.

2.4. LES DIVERS COÛTS ENGENDRÉS

À la suite de cet événement, 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

²⁴ Mentionné dans le rapport d'intervention des équipes de Gaz Métro



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.

2.5. LES COÛTS DIRECTS

Dans cette partie, nous allons répertorier l'ensemble des coûts liés à la réparation du bris de la conduite de gaz qui apparaissent 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 qu'il supporte les coûts et que le préjudice subi soit réparé. Les coûts directs 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.

2.5.1. 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 pour la 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 danger est élevé et où les dommages matériels ainsi que les dangers pour les personnes en cas d'explosion seraient importants.

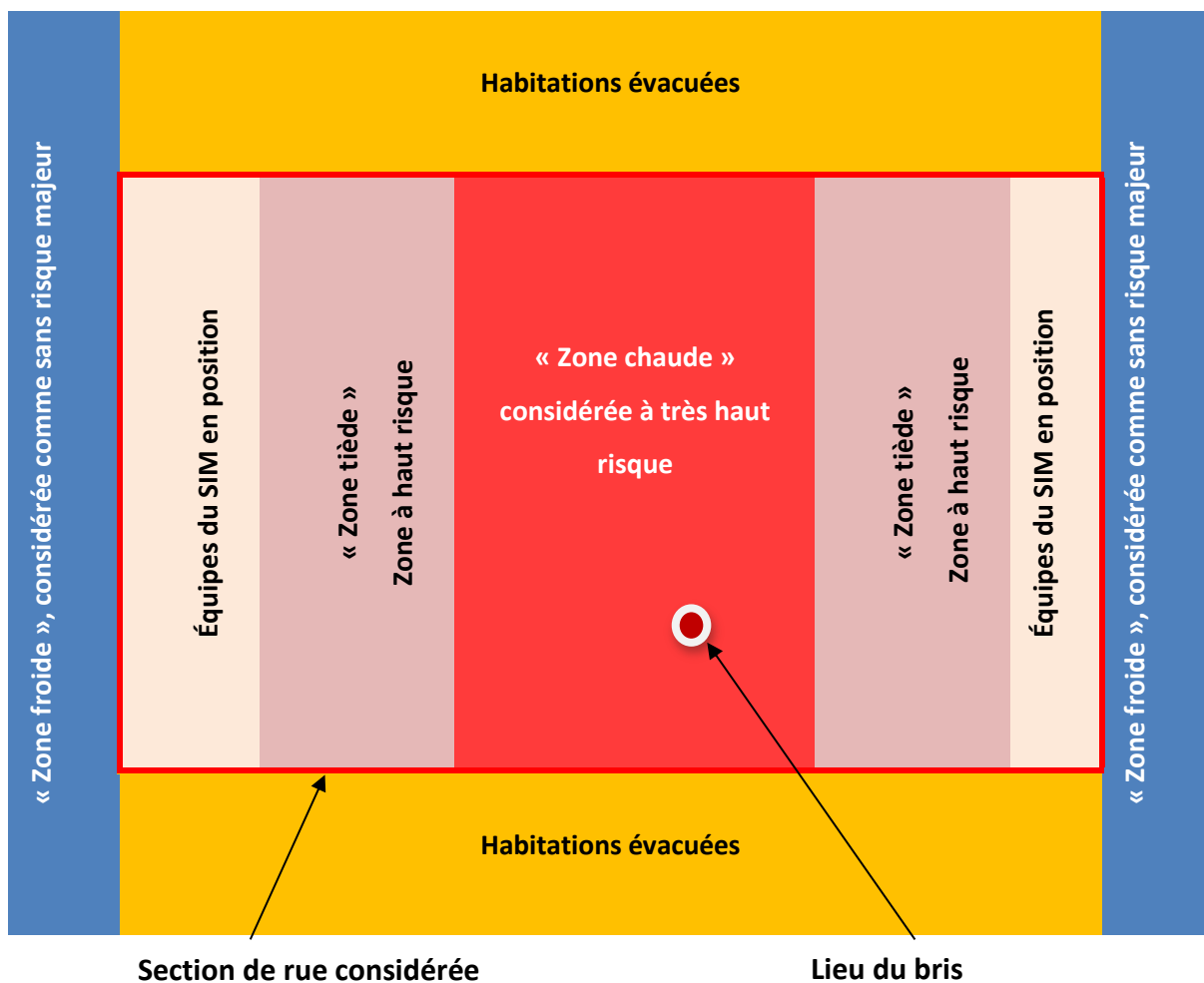


Figure 9 : Disposition type des équipes d'intervention lors d'un bris de gaz

A cela, il est également important d'inclure **les coûts d'entretien** des véhicules, les coûts du **renouvellement du parc automobile** des véhicules d'intervention²⁵ 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.

²⁵ Les véhicules d'intervention doivent être remplacés régulièrement afin d'assurer les meilleurs résultats possibles, tant d'un point de vue performance que sécurité lors des interventions

2.5.2. 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 flexible. En effet, la majorité des cas de bris d'infrastructures sont des petits bris touchant des canalisations en matériau flexible, peu coûteuses, mais très fragiles.



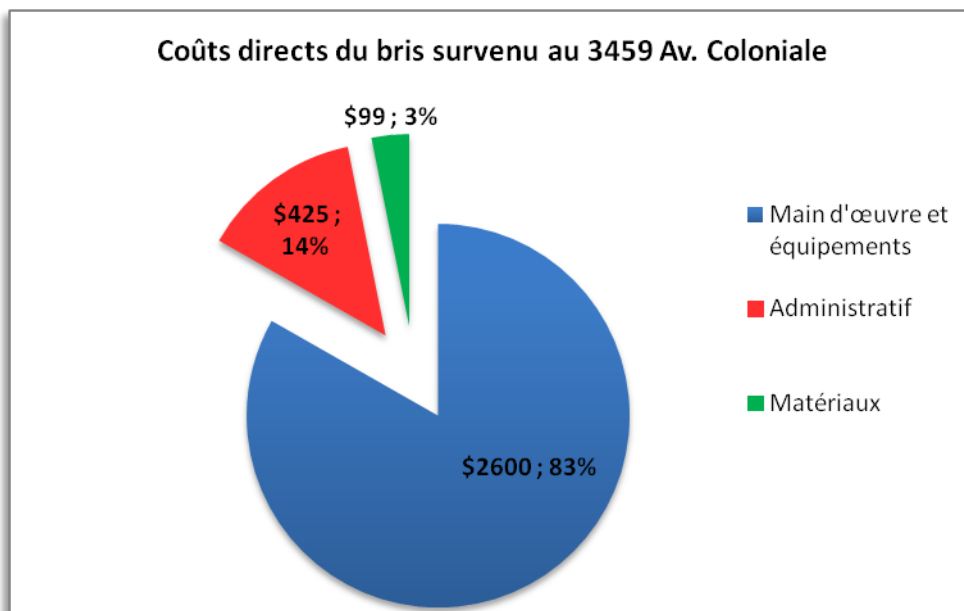
Figure 10 : Véhicule d'intervention de Gaz Métro et véhicules d'urgence

2.5.3. Les coûts administratifs

Les coûts administratifs représentent l'ensemble des coûts liés 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.

2.5.4. Bilan des coûts directs

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



Graphique 7 : Coûts directs associés au bris survenu au 3459 Avenue Coloniale (Communication personnelle 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% du montant total. Finalement, **le coût total facturé** par Gaz Métro à l'entreprise excavatrice s'élève à : 3124 \$.

Tableau 8 : Coûts directs du bris de conduite de gaz facturés par Gaz Métro

Coûts directs du bris de conduite de gaz	Montant estimé
Coût de main-d'œuvre et des équipements	2 600 \$
Coût administratif	425 \$
Coût des matériaux	99 \$
Coûts directs totaux²⁶	3 124 \$

2.6. LES 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**

²⁶ Il est important de noter que d'après une base de données fournie par les services de Gaz Métro, le montant associé à ce bris est du même ordre de grandeur que la majorité des cas de bris répertoriés par l'entreprise.

et donc de nombreux coûts pour la société, que cela se répercute au niveau de la ville, des commerçants ou des citoyens environnants.

Pour cette étude de cas, différents facteurs de coûts identifiés dans la littérature vont être pris en compte. Pour certains, une évaluation économique sera présentée alors que pour d'autres, seule une illustration et une discussion autour du concept seront fournies. Les différents facteurs et la façon dont ils sont pris en compte dans l'étude de cas se reflètent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9 : Facteurs de coûts évalué et illustrés dans l'étude du cas 1

	Facteur de coûts évalué dans l'étude de cas	Facteur de coûts illustrés dans l'étude de cas
Interruption de service électrique (incluant internet)	X	
Interruption de service internet		
Déploiement des services d'urgence	X	
Évacuation des résidents		X
Risques de blessures ou de décès pour les travailleurs		
Perte de produit		
Impacts environnementaux		
Impacts économiques pour les commerces et entreprises		
Retards dans l'exécution des travaux		X
Frais administratifs ou légaux		
Atteinte à la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine		
Perturbation des sols		
Perturbation de la circulation		

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

2.6.1. Intervention du service de sécurité incendie de Montréal (SIM)

Le premier service d'urgence 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 un dispositif de 41 pompiers, présents pendant 1h40 et même jusqu'à 2h30 pour certaines équipes.**

Comme pour les « fausses » alertes incendie, le coût d'une intervention de la part des services du SIM peut être estimé. Nous avons repris les estimations du SIM pour évaluer le coût total de l'intervention.

Tableau 10 : Données significatives et coûts allouables au SIM

Catégories	Chiffres clés
Nombre de pompiers	41 personnes
Nombre de pompiers prêts à intervenir ²⁷	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 que le montant des coûts directs associés à la réparation de la conduire ont été largement dépassés. En effet, les 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 d'urgence pouvant être considéré comme minimum** doit être maintenu en place dans le but d'assurer la sécurité de l'ensemble des citoyens. Toutefois, il est 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. Considérant que les bris par des tiers sont évitables, on peut donc conclure que ces ressources pourraient être utilisées pour d'autres interventions moins facilement évitables.

²⁷ 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.

2.6.2. Intervention du service de police de la ville de Montréal (SPVM)

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 environnant²⁸.

Dans le cas étudié, quelques minutes après leur arrivée sur les lieux, le SIM a 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 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 d'un tel évènement :

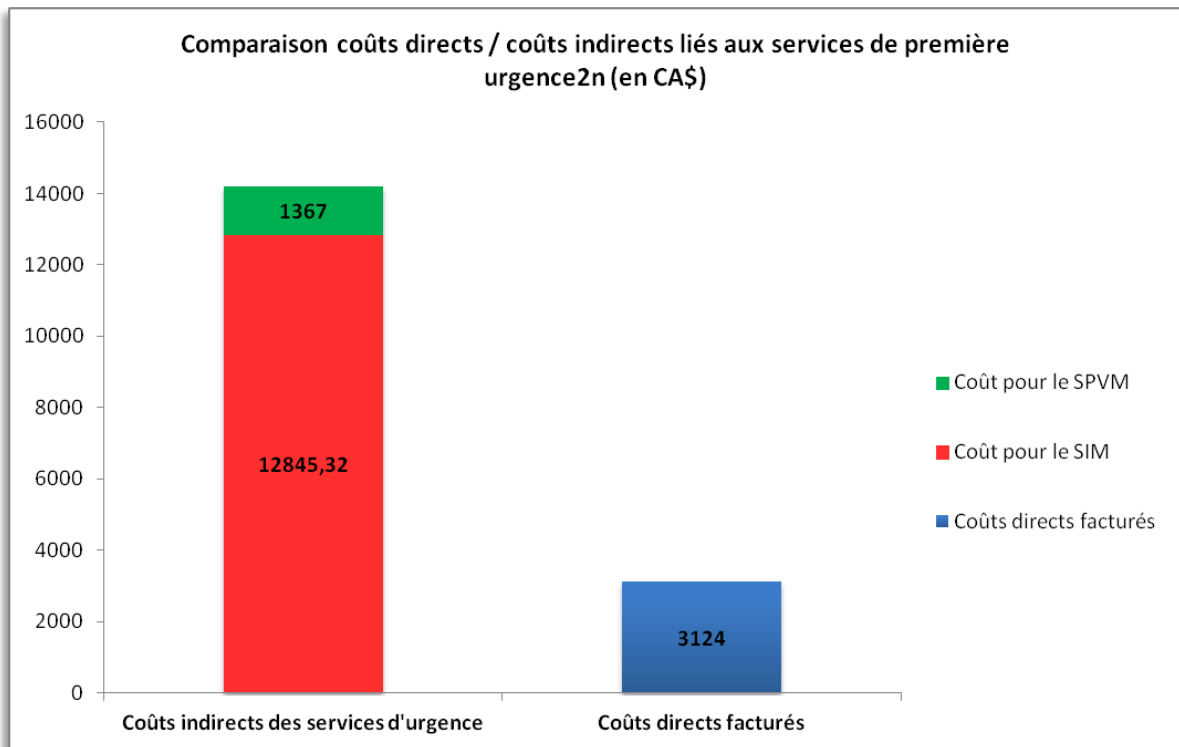
Tableau 11 : Chiffres et coûts liés à l'intervention des services du SPVM

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

Une fois encore, il est important de préciser, comme pour le SIM, que les ressources mises à disposition pour ce bris existaient de toute façon. Cependant, ces unités auraient pu être allouées à d'autres tâches.

Les coûts indirects prenant uniquement en compte les services de sécurité de première urgence s'élèvent donc à plus de 14 000 dollars, et représentent plus de 4 fois les coûts directs estimés.

²⁸ Communications personnelles avec le SIM



Graphique 8 : Comparaison des coûts directs avec les coûts indirects liés aux services d'urgence

2.6.3. 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.

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, entraînant une perte de temps cumulée considérable. A 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.

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 entraîne une coupure du chauffage pour les utilisateurs et donc les foyers touchés. 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)).

Comme 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 tout risque d'explosion durant l'intervention (explosion qui aurait pu être provoquée par une étincelle). Cependant, lorsqu'un déclenchement d'artère est décrété, c'est l'ensemble d'un quartier (ce qui correspond à plusieurs blocs) qui est privé d'électricité durant le temps de l'intervention. Cette coupure, bien que très dérangement 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. L'interruption a duré de 11h45 à 13h28, soit plus d'une heure et demie. Hydro-Québec nous a communiqué les informations sur le nombre et le type de clients touchés.

Tableau 12 : 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

Le coût d'une interruption de service électrique se calcule de la façon suivante (voir chapitre précédant) :

$$C_E(h_i) = P_R N_R C_R(h_i) + P_C N_C C_C(h_i) + P_I N_I C_I(h_i)$$

Où :

N_k \equiv Nombre total de clients du type k dans la région administrative concernée

P_k \equiv Pourcentage de clients du type k ayant été affectés

h_i \equiv Durée de l'interruption du service électrique

$C_k(h_i)$ \equiv Coût estimé pour le type de client k pour une durée h_i

$$C_R(h_i) = 2,054 h_i + 3,0597$$

$$C_C(h_i) = 782,75 h_i + 124,26$$

$$C_I(h_i) = 4894,7 h_i + 1502,3$$

Ainsi les coûts indirects liés à l'interruption de service s'élèvent à 945 345,57 \$. Ce montant est, donc, plus de 400 fois supérieur aux coûts directs estimés par Gaz Métro et transmis à l'entreprise d'excavation pour un remboursement.

2.6.4. 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.

2.6.5. 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 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 déjà présents à cause des travaux.**

Les seuls coûts éventuels que nous pourrions prendre en compte seraient ceux dus **aux délais** que le bris a entraînés 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 **à la charge de la municipalité**. On remarque donc une fois encore que les coûts indirects liés à un bris d'infrastructure souterraine peuvent s'étendre à de nombreux niveaux et ainsi représenter de très importantes sommes.


2.7. CONCLUSION

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

Tableau 13 : Estimation du coût total d'un bris de conduite de gaz dans une artère résidentielle

Coûts	Montant estimé	Pourcentage du montant total
Coût pour le Service de Sécurité Incendie de Montréal	12 845 \$	1,33 %
Coût pour le Service de Police de la Ville de Montréal	1 367 \$	0,14 %
Coût de l'interruption de service électrique	945 346 \$	98,20 %
Coûts indirects totaux chiffrés	959 558 \$	99,67 %
Coût direct total chiffré	3 124 \$	0,33 %
Coût total du bris	962 682 \$	100%

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 coupure d'électricité correspond à pratiquement 98,5% des coûts totaux, pour une somme de 945 346 \$. 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.



concessionnaires de voitures de luxe. Ces particularités seront importantes à prendre en compte lors de l'évaluation des coûts. Après une brève description du bris, nous présenterons ses impacts, notamment sur la circulation et sur les commerces environnants.

3.2. 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 de gaz sur la rue Jean Talon. En raison de leur fragilité, les câbles de fibre optique ont immédiatement rompu lors du contact avec les machineries d'excavation, entraînant la coupure instantanée des services de la compagnie de télécommunication touchée, pour les clients du quartier.

Ce bris a donc obligé l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine de télécommunication à mettre en place un service de réparation d'urgence dans le but premier de fournir à nouveau et rapidement 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. Comme le bris a eu lieu au milieu de la chaussée, il est nécessaire pour l'entreprise d'obtenir un permis d'entrave auprès de la ville de Montréal avant d'entreprendre des travaux de réparation. Une fois ce permis d'entrave obtenu, l'entreprise de télécommunication a ainsi pu commencer la remise en état de son réseau en remplaçant la partie sectionnée. La zone de travail se situait en plein milieu de la rue Jean Talon, juste avant le feu de signalisation situé au sud-ouest du croisement du Chemin de la Côte-des-Neiges.

3.3. LES COÛTS DIRECTS DU BRIS

Le remplacement des câbles de télécommunication touchés nécessite diverses ressources humaines et matérielles. Les éléments de coûts de réparation relatifs à ce bris nous ont été communiqués par l'entreprise propriétaire de l'infrastructure de télécommunication. Le premier facteur de coût est 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 une certaine 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 en heures supplémentaires. La main d'œuvre représente 61% des coûts de remise en état.

Autres coûts importants, ceux liés au matériel et aux véhicules automobiles utilisés. Pour une intervention de ce type, il est nécessaire d'avoir recours à du matériel de haute

technologie, très coûteux. Celui-ci, présent dans les camions d'intervention, entraîne ainsi l'immobilisation des véhicules et de tout autre matériel présent à l'intérieur de ceux-ci. 39% des coûts des travaux sont associés à cette utilisation et à cette immobilisation de matériel et de véhicules, nécessaires pour la remise en état des infrastructures touchées lors de l'excavation.

Tableau 14 : Estimation des coûts directs liés au bris d'un câble de télécommunication

Facteurs de coût direct	Montants	Proportion des coûts directs
Coûts de la main d'œuvre	29 600 \$	61 %
Coûts des matériaux utilisés	15 200 \$	32 %
Coûts d'utilisation et d'immobilisation de véhicules spécialisés	3 200 \$	7 %
Total	48 000 \$	100 %

3.4. LES CONSÉQUENCES DU BRIS ET LES COÛTS INDIRECTS ASSOCIÉS

Pour cette étude de cas, différents facteurs de coûts identifiés dans la littérature vont être pris en compte. Pour certains, une évaluation économique sera présentée alors que pour d'autres, seule une illustration et une discussion autour du concept seront fournies. Les différents facteurs et la façon dont ils sont pris en compte dans l'étude de cas se reflètent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 15 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 2

	Facteur de coûts évalué dans l'étude de cas	Facteur de coûts illustré dans l'étude de cas
Interruption de service électrique		
Interruption de service internet	X	
Déploiement des services d'urgence		
Évacuation des résidents		
Risques de blessures ou de décès pour les travailleurs	X	
Perte de produit		
Impacts environnementaux		X
Impacts économiques pour les commerces et entreprises		X
Retards dans l'exécution des		

travaux		
Frais administratifs ou légaux		
Atteinte à la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine		X
Perturbation des sols		
Perturbation de la circulation	X	

3.4.1. Coûts liés à la perturbation de la circulation

La réfection définitive des infrastructures brisées a été complétée le 05 novembre 2012, soit 23 jours après le bris. Ce bris a 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) a été réduite d'une voie dans chacun des sens. Cette artère a donc été pendant la durée des travaux 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).

Les coûts liés à la perturbation de la circulation peuvent se diviser en 4 grandes catégories que nous exposerons tour à tour :

1. les coûts liés à la perte de temps ;
2. les coûts liés à la surconsommation de carburant ;
3. les coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien) ;
4. les coûts liés à la pollution (ceux-ci entrent dans la catégorie des impacts environnementaux dans la revue de littérature).

Coûts liés à la perte de temps dans la congestion

Le lundi matin à l'heure de pointe, soit deux jours après le début du bris, nous sommes allés sur les lieux afin de faire un comptage des véhicules et estimer le temps d'attente dans la congestion. La zone de congestion s'étalait sur une distance de 500 mètres environ. Le temps de parcours habituel de cette portion de route est de 25 secondes alors que le temps de parcours relevé sur les lieux à l'heure de pointe deux jours après le bris était de 8 minutes et 30 secondes.

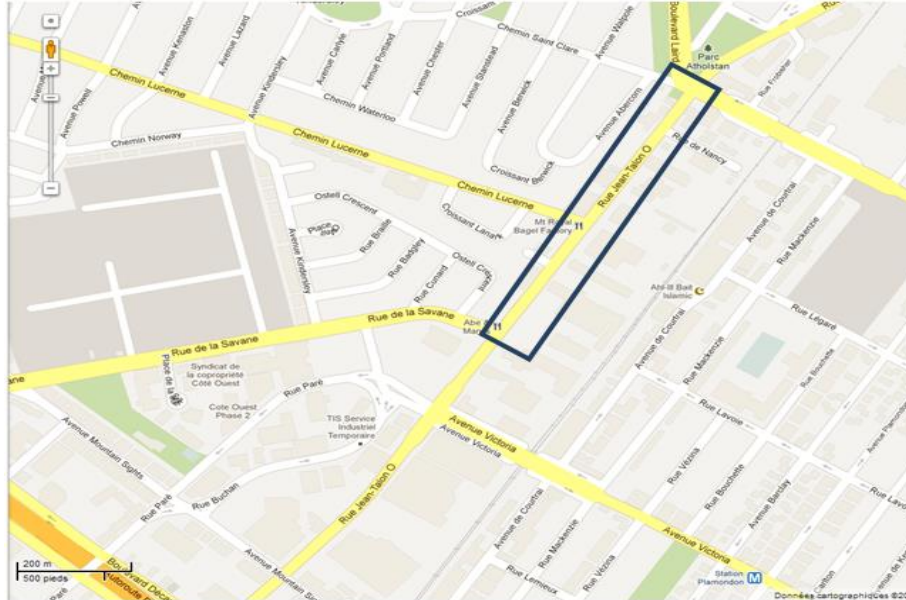


Figure 12 : Zone de congestion 2 jours après le bris à l'heure de pointe du matin

Le nombre de véhicules impacté par la congestion provient des statistiques de comptage des véhicules disponibles sur le portail de partage de données de la Ville de Montréal. Par contre, le comptage de véhicule au moment du bris a été réalisé pour avoir une connaissance du type de véhicule empruntant cette artère et pour ainsi attribuer des proportions à chaque type de véhicule. Nous avons pu noter des voitures classiques, des taxis, des camions de livraison mais aussi des autobus, des ambulances et également des voitures de luxe (de nombreux concessionnaires de voiture de luxe sont implantés sur cette artère). Ce portrait est très important afin d'attribuer un coût adéquat à la perte de temps propre à chacun des utilisateurs.

Pour cette étude de cas, plusieurs hypothèses de calcul ont été adoptées dans le calcul des coûts de congestion. Ces hypothèses ont toutes été expliquées dans la partie de revue de littérature. Tout d'abord, nous avons considéré un phénomène d'apprentissage de la part des conducteurs. Ainsi afin d'éviter la congestion, on considère que les automobilistes apprennent et se souviennent de la congestion sur la rue Jean Talon et qu'un nombre de plus en plus important au fur et à mesure des semaines va utiliser des détours quitte à ce que cela allonge sa distance de parcours. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse 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. 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. Aucune congestion durant les fins de semaines n'a été comptabilisée. Le coût horaire des

automobilistes varie en fonction des salaires moyens au Québec et des différents types de véhicules circulant sur cet axe.

En utilisant l'Équation 8, nous obtenons les taux horaires suivants :

Tableau 16 : Taux horaire selon le type de véhicule sur la rue Jean Talon

Type de véhicule	Part du trafic total	Taux horaire	Justification
Voitures classiques	85%	23,23 \$/h	Basé sur le salaire moyen à Montréal
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 à la section 6 du rapport en utilisant les hypothèses suivantes :

- Taux occupation des véhicules : 1,2
- Taux horaire moyen pour l'étude de cas en tenant compte du taux d'occupation uniquement pour les voitures classiques = 30,53 \$/h
- Nombre de voiture au jour 1 prises dans la congestion : 4 668 véhicules (tous types confondus)
- Temps de congestion jour 1 : 8 min
- Distance du détour : 1km
- Distance de la congestion : 0,5km
- Coût évalué par CAA Québec²⁹ pour le fonctionnement d'une voiture (entretien + pneu) : 5 cents du km parcouru
- Prix essence en 2012 à Montréal : 1,376
- Consommation au 1km : 0,1287

Tel qu'expliqué dans la revue de littérature, le nombre de voiture congestionné va diminuer en fonction du temps au profit du nombre de voiture qui vont utiliser le détour. Voici graphiquement l'évolution au cours des 23 jours du bris du nombre de véhicules perturbés.

²⁹ Référence :

https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur_la_route/Couts_utilisation/2013_CAA_Driving_Costs_French.pdf

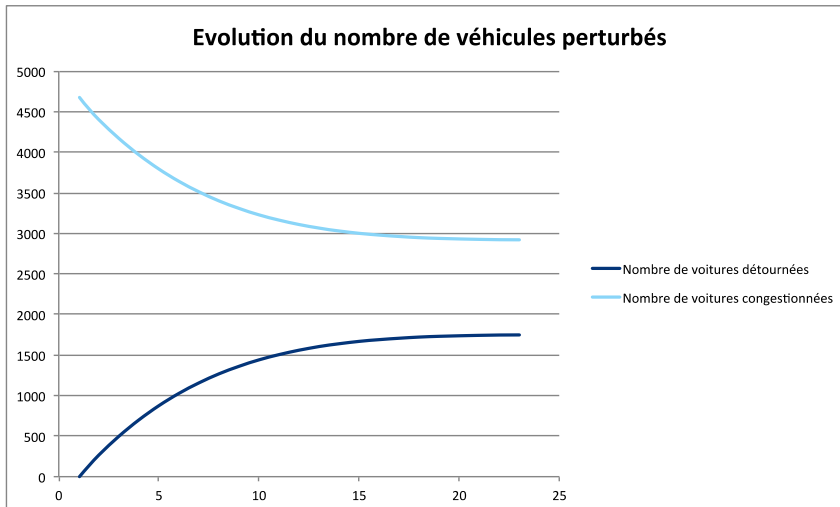


Figure 13 : Évolution du nombre de véhicules perturbés en fonction du nombre de jours suivant le bris

De la même façon, voici graphiquement l'illustration de l'évolution du temps supplémentaire pour les voitures prises dans la congestion et pour celles empruntant le détour.

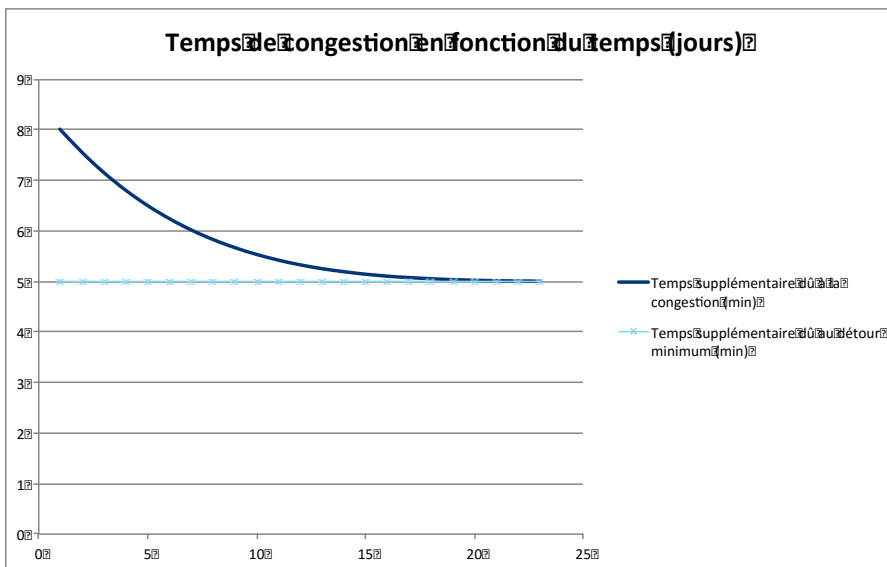


Figure 14 : Évolution du temps de congestion en fonction des jours suivant le bris

Tableau 17 : Estimation des coûts liés à la perte de temps dans la congestion en fonction des semaines

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3 (+ 2 derniers jours)	Total
Nombre de véhicules impactés	28 152	22 300	26 523	76 975
Coûts liés à la perte de temps dans la congestion	\$99,664	\$62,058	\$68,182	\$229,904

Nous pouvons donc conclure que les coûts liés à la perte de temps dans la congestion, sont plus de deux fois supérieurs aux coûts directs.

Coûts liés à la perte de temps dans les détours

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. En appliquant les formules développées précédemment ainsi que les hypothèses présentées ci-dessus, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 18 : Coûts des détours dus au bris de la rue Jean Talon

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3 (+ 2 jours)	Total
Nombre de véhicules impactés	4 524	10 376	15 489	30 389
Coûts liés à la perte de temps dans les détours	\$11,511	\$26,400	\$39,410	\$77,321

Cela donne donc :

$$\begin{aligned} &\text{Coûts totaux liés à la perte de temps pour les automobilistes} \\ &= \text{Coûts liés à la perte de temps dans la congestion} \\ &+ \text{Coûts liés à la perte de temps dans les détours} \end{aligned}$$

Tableau 19 : Récapitulatif des coûts liés à la perte de temps dus au bris pour les automobilistes

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3 (+ 2 jours)	Total
Coûts liés à la perte de temps dans la congestion	\$99,664	\$62,058	\$68,182	\$229,904
Coûts liés à la perte de temps dans les détours	\$11,511	\$26,400	\$39,410	\$77,321
Coûts liés à la perte de temps totale	\$111,174	\$88,459	\$107,592	\$307,225

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 causes : celle liée aux détours occasionnés et celle due à la conduite en situation de congestion. Au fur et à mesure du temps, le fait que de plus en plus de véhicules ont emprunté un parcours de substitution a entraîné une hausse croissante de la consommation de carburant.

En prenant comme hypothèse une vitesse moyenne de 40km/h entraînant une consommation de 0,08 litre par kilomètre, avec une augmentation de parcours minimum de 1 kilomètre, un prix moyen du carburant de 130 cents par litre et l'évolution du nombre de véhicule explicité plus haut, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 20 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (détours)

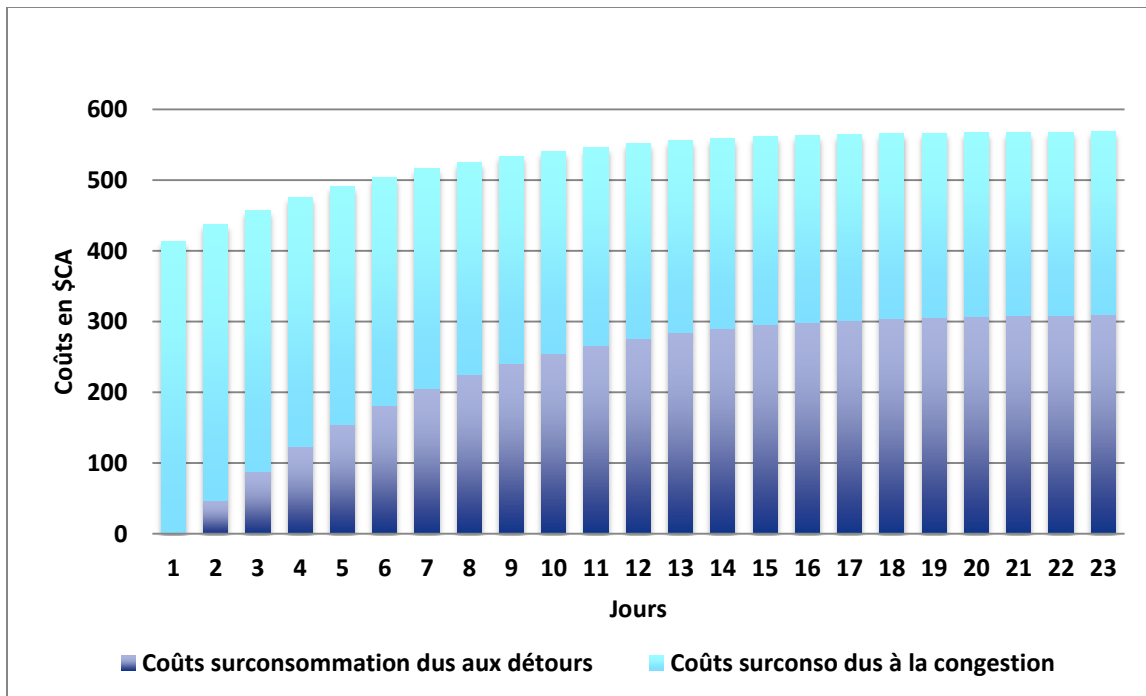
	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts dus à la surconsommation (dans les détours)	\$801	\$1,837	\$2,743	\$5,382

En situation de congestion, les accélérations et décélérations à bas régime ainsi que le changement fréquent de rapport de vitesse entraînent 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, nous pouvons estimer un coût liés à la surconsommation dans la congestion.

Tableau 21 : Coûts hebdomadaires dus à la surconsommation (congestion)

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Total
Coûts dus à la surconsommation (dans la congestion)	\$2,493	\$1,975	\$2,348	\$6,816

Finalement, on estime les coûts totaux liés à la surconsommation pour ce bris à 12 197\$ pour les trois semaines.



Graphique 9 : Évolution quotidienne des coûts de surconsommation de carburant

Coûts liés à la 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. En utilisant la méthode proposée dans la première partie du rapport, nous pouvons calculer les coûts que représentent les particules émises ainsi que les gaz à effet de serre.

Coût de la pollution de l'air et des émissions de gaz à effet de serre

= Coût de la surconsommation total

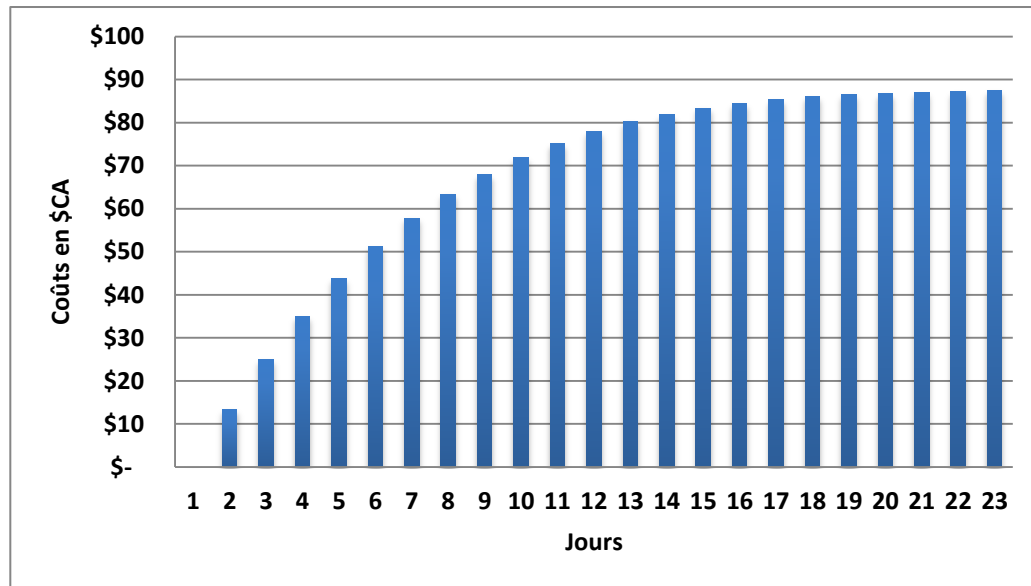
× $\frac{\text{Pourcentage des coûts attribuables aux divers émissions}}{\text{Pourcentage des coûts attribuables à la surconsommation total}}$

= $12\,197 \times \frac{(0,8 + 0,4)}{1,4} = 10\,455 \$$

Coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien)

Un dernier point à aborder en ce qui concerne les automobiles est la surutilisation des véhicules, c'est à dire les frais liés à l'entretien et au pneu. Nous ne considérerons des coût de surutilisation uniquement pour les véhicules ayant emprunté un parcours de substitution.

Ainsi, en réutilisant les hypothèses précédentes et en supposant un coût d'utilisation de 5 cents par véhicule et par kilomètres, nous obtenons le profil suivant :



Graphique 10 : Coûts liés à la surutilisation des véhicules dans les détours lors du bris

Les coûts totaux liés à la surutilisation s'élèvent à 1 519\$ sur les 23 jours du bris.

Coûts liés à l'affaiblissement de la sécurité

Les personnes n'ont pas nécessairement les mêmes réactions en conduite normale et en conduite dans une situation de congestion. Ainsi, lors de nos présences sur les lieux du bris, plusieurs réactions ou comportements inappropriés ont pu être constatées. Des entrevues avec des automobilistes ont permis de mettre en avant un certain énervement et une tension importante chez ceux-ci. Ces deux facteurs ont provoqué des actions pour le moins dangereuses de la part de certains individus. Il a été ainsi fréquent de remarquer des voitures faire demi-tour en plein milieu de la circulation, mettant ainsi les automobilistes empruntant la voie opposée en danger. Nous avons même assisté à l'engagement à contre sens d'une ambulance, 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.



Figure 15 : Engagement d'un véhicule ambulancier à contre sens lors des travaux de remise en état sur la rue Jean Talon

Même si l'on ne peut pas associer un coût à des réactions ou des comportements, il n'en reste pas moins que la congestion due au bris a entraîné un affaiblissement considérable de la sécurité.

3.4.2. Les coûts liés à la sécurisation des lieux du bris

Certains services sont 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 (blocs et les plots de signalisation) a été nécessaire afin d'assurer la sécurité des équipes de travail, mais également des automobilistes sur les lieux du bris (bien que des comportements inappropriés ont quand même été remarqués). En plus de la location longue durée de ces équipements, du personnel a dû être employé afin de positionner l'ensemble de ce matériel. La manutention des blocs de béton constitue notamment une grande partie des coûts associés à la sécurisation des lieux par la signalisation s'élevant au total à 32 000 \$.



Figure 16 : Exemple de signalisation utilisée pour sécuriser les lieux d'un bris

Ce montant est une étape obligée dans le bon déroulement des opérations et continue de faire croître la somme des coûts indirects, déjà très importants en raison de la congestion occasionnée.

3.4.3. Coût d'interruption de service internet

Il faut savoir que le bris a occasionné une interruption de service internet d'une durée de 6h30. En utilisant l'équation 2 reposant sur la méthode du taux horaire du produit intérieur brut, l'estimation du coût lié à cette interruption s'élève à 1 033,5 \$.

3.4.4. Impacts économiques

La congestion ainsi que l'interruption de service de télécommunication pendant une durée de 6h30 ont engendré certains impacts économiques pour les commerçants. Ces impacts sont toutefois difficilement quantifiables. Certains commerçants se sont plaints de voir l'accès à leur succursale difficile voir même impossible. Par exemple, une firme de location de voiture a dû exiger des frais de pénalités à certains de ces clients ayant rapporté la voiture de location en retard. D'autres commerces ont mentionnés des retards de leurs employés pouvant aller jusqu'à 30 minutes. D'autres encore, particulièrement des enseignes de restauration rapide et de livraison de pizzas ont eu des plaintes de clients pour des retards de livraison. Ces différents aspects, même si nous ne leur avons pas associé un coût monétaire, représentent un réel coût moral important.

3.4.5. Perturbation des réseaux de transports collectifs de Montréal

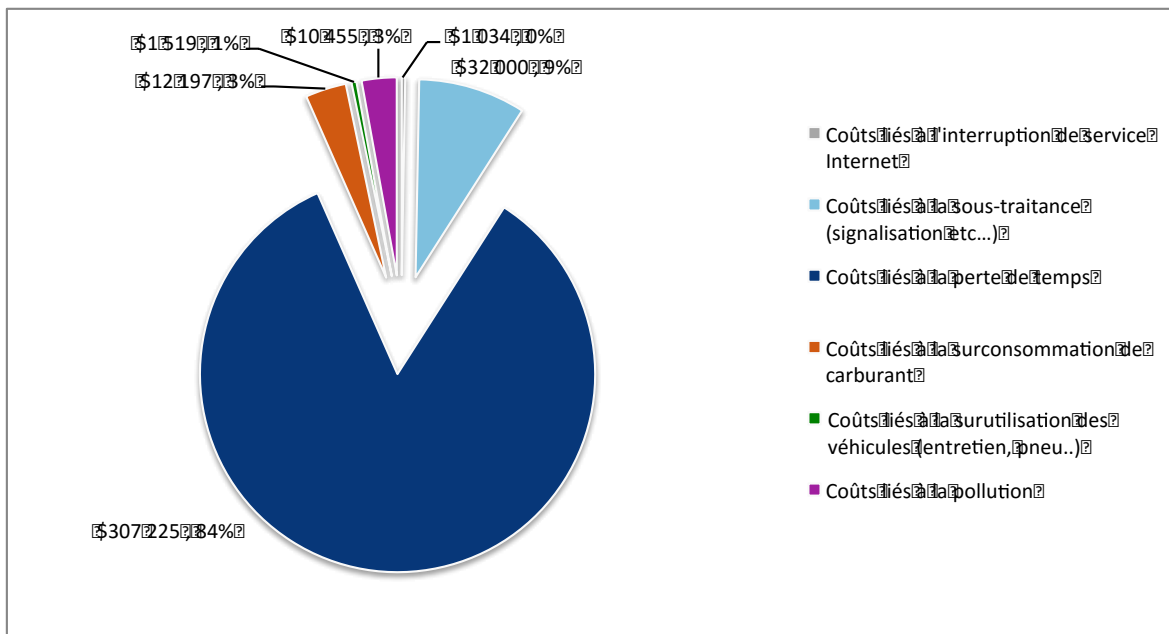
Non seulement un bris a un impact sur la circulation automobile « classique » mais peut également avoir des conséquences sur les réseaux de transports collectifs. Dans notre cas, le bris a eu un impact sur le service de la Société de Transport de Montréal qui a du supprimer un arrêt sur la ligne de bus 92. Toutefois, aucune plainte de client n'a été faite auprès de la Société de Transport de Montréal.

3.4.6. Impact sur la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine

Il ne faut pas oublier de prendre en compte les coûts difficilement quantifiables liés à la perte de réputation de l'entreprise de télécommunication. En effet, lors du bris et des 23 jours qui ont suivi, de nombreux camions de l'entreprise de télécommunication étaient sur les lieux du bris et entravaient la circulation. En interrogeant les automobilistes, piétons et commerçants du quartier, on s'aperçoit très clairement que la faute est rejetée sur l'acteur visible, ici, l'entreprise de télécommunication présente sur les lieux pour la réparation du bris, alors que le bris au départ a été causé par un tiers.

3.4.7. Récapitulatif des coûts indirects

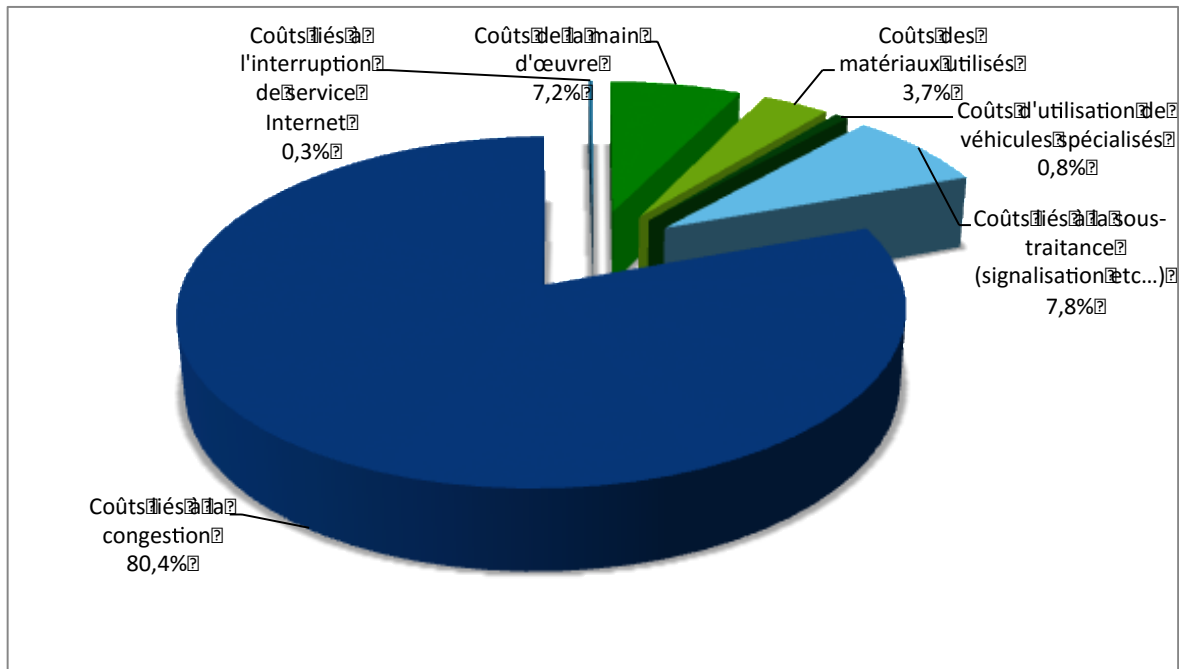
À la suite de ces diverses évaluations, nous pouvons estimer les coûts indirects totaux occasionnés par le bris des câbles de télécommunication à 364 430 \$. La répartition de ces coûts indirects est résumée sur le graphique suivant :



Graphique 11 : Répartition des coûts indirects liés au bris

3.5. CONCLUSION

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. Les facteurs de coûts directs sur le graphique ci-dessous sont tous représentés dans des teintes de vert.



Graphique 12 : Répartition des coûts directs et indirects du bris survenu sur la rue Jean Talon

La part la plus importante des coûts totaux est associée à la perte de temps liée à la congestion et aux détours, qui est estimée à 307 225 \$ soit plus de 74 % du coût total final estimé. Finalement les coûts indirects sont estimés à 364 430 \$ sur un montant total estimé pour le bris à 412 430 \$ (voir tableau ci-dessous). La répartition CD/CI pour le bris survenu au croisement Jean-Talon Côte-des-Neiges s'élève à 12%-88%.

Tableau 22 : Rappel des divers coûts liés au bris

Coûts	Montant	Part des coûts totaux
Coûts de main-d'œuvre	29 600 \$	7,2 %
Coûts des matériaux de remplacement	15 200 \$	3,7 %
Coûts de l'utilisation des véhicules	3 200 \$	0,8 %
Total des coûts directs	48 000 \$	11,6%
Coûts liés à la sécurisation des lieux (signalisation)	32 000 \$	7,8 %
Coûts liés à la perte de temps	307 225 \$	74,5 %
Coûts liés à la surconsommation de carburant	12 197 \$	3 %
Coûts liés à la surutilisation des véhicules (entretien et pneu)	1 519 \$	0,4 %
Coûts liés à la pollution	10 455 \$	2,5 %
Coûts liés à l'interruption de service internet	1 034 \$	0,3 %
Total des coûts indirects	364 430 \$	88,4 %
Total	412 430\$	100 %

4. ÉTUDE DE CAS 3 : BRIS MINEUR D'UNE CANALISATION D'EAU DANS UNE AGGLOMÉRATION DE TAILLE MOYENNE AU QUÉBEC

Le bris suivant que nous avons étudié représente un cas « classique » de bris de canalisation d'eau dans un quartier résidentiel d'une agglomération de taille moyenne.

4.1. LOCALISATION DU BRIS

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

Tableau 23 : Historique des bris du croisement rue d'Auvergne et 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

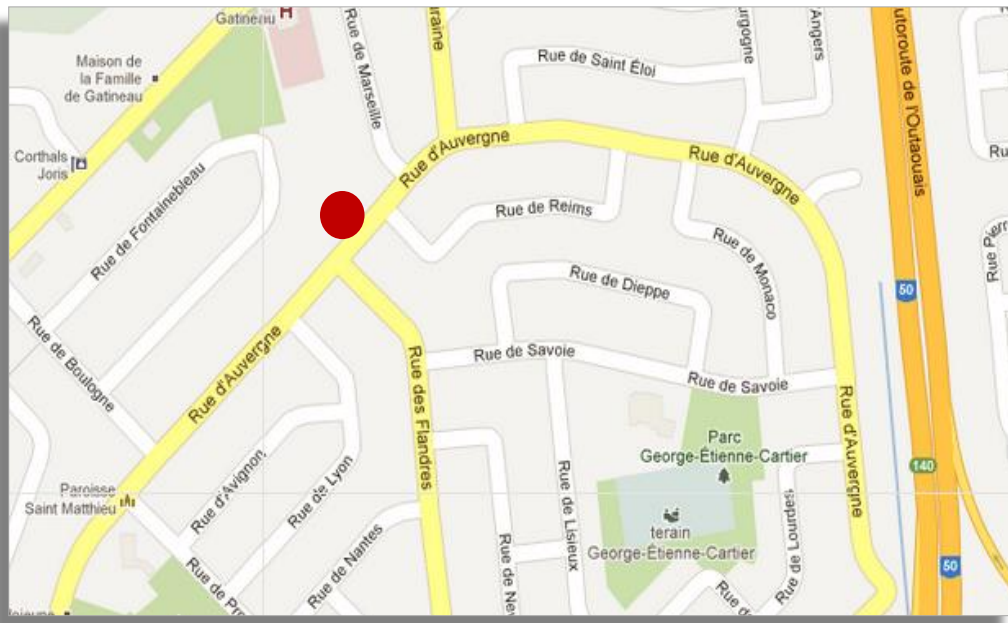


Figure 17 : Localisation du bris

On peut remarquer sur la photo ci-dessous la présence de nombreuses sections d'asphaltes qui correspondent aux travaux de réparation des 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 18 : Carrefour où les bris ont eu lieu

La cause principale de la récurrence des 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. La municipalité de Gatineau a connu 243 bris en 2012. Ce chiffre se démarque fortement de celui pour 2011 (187 bris) et marque ainsi une progression de 25%.

Le bris que nous avons étudié a eu lieu sur une conduite d'eau potable de 200mm de diamètre. Ce cas peut être considéré comme typique et récurrent pour la ville de Gatineau. Son analyse est donc importante pour mieux évaluer l'ampleur de la récurrence de bris.

4.2. 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. Compte tenu de la localisation du bris, les services d'urgence (police ou pompiers) n'ont pas été sollicités. Le bris a nécessité la remise en état 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 24 : Coûts directs de remise en état des infrastructures touchées

Nature des coûts directs	Montant estimé
Coût de la main-d'œuvre et des équipements	3 841 \$
Coût des matériaux	3 621 \$
Total	7462 \$

Contrairement à la plupart des cas de bris, la part du coût des matériaux dans le coût de remise en état correspond pratiquement à la moitié, ce qui peut paraître surprenant quand on sait que lors de travaux civils, la majorité des coûts est souvent 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. Comme les travaux se sont déroulés 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 temps chaud. Selon les services d'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 qui sont effectués à d'autres saisons.

4.3. LES CONSÉQUENCES DU BRIS ET LES COÛTS INDIRECTS ASSOCIÉS

En raison de la présence d'habitations et d'activités aux alentours de la zone qui a été touchée par le bris de la canalisation d'eau, plusieurs perturbations ont eu lieu.

Pour cette étude de cas, différents facteurs de coûts identifiés dans la littérature vont être pris en compte. Pour certains, une évaluation économique sera présentée alors que pour d'autres, seule une illustration et une discussion autour du concept seront fournies. Les différents facteurs et la façon dont ils sont pris en compte dans l'étude de cas se reflètent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 25 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 3

	Facteur de coûts évalué dans l'étude de cas	Facteur de coûts illustrés dans l'étude de cas
Interruption des services		
Déploiement des services d'urgence		
Évacuation des résidents		
Risques de blessures ou de décès pour les travailleurs		
Perte de produit	X	
Impacts environnementaux		

Impacts économiques pour les commerces et entreprises		
Retards dans l'exécution des travaux		
Frais administratifs ou légaux		
Atteinte à la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine		
Perturbation des sols		
Perturbation de la circulation	X	

4.3.1. Coûts associés à la déclaration d'avis d'ébullition

Une rupture d'aqueduc contenant de l'eau potable va souvent entraîner la réalisation de tests liés à la qualité de l'eau. Si cela est nécessaire, la municipalité, émet un avis d'ébullition. Cela se décompose en plusieurs phases. Des tests sont 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 coûts de laboratoire pour le bris étudié se sont élevés à 209 dollars (cela comprend le coût du test mais aussi un surcoût de 100 dollars car les tests ont du être menés en fin de semaine)³⁰.

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 entraîne 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

³⁰ Ce coût peut sembler minime, mais si l'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 coût un montant de 8 205 dollars, uniquement pour ce qui concerne les coûts liés aux avis d'ébullition.

garde. Avec un taux horaire variant de 21,55 à 26,96 \$/h, plus les avantages sociaux (35%), cela correspond ainsi à un coût de 10 dollars par appel.

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. Toutefois, il est difficile d'estimer le coût que représente cette augmentation de la consommation d'énergie.

4.3.2. Coûts associés à la perte d'eau

Une rupture de canalisation s'accompagne souvent d'une perte importante d'eau potable. Le coût de purification et d'acheminement de l'eau est estimé à 0,40 dollar par mètre cube (Ville de Gatineau, 2013). Ainsi, après enquête sur le terrain, il s'avère que la fuite a provoqué une perte d'eau potable d'environ 1 590 164 litres, ce qui représente donc un coût de 636 \$.

4.3.3. Coûts associés à la congestion

Même si le secteur est résidentiel, il est important de prendre en compte la congestion et les retards occasionnés par la survenance du bris. Dans le cas du bris étudié, le secteur a été interdit à l'ensemble de la circulation et l'ensemble du trafic a été détourné via d'autres itinéraires, plus longs. Outre l'augmentation du temps de transport, ces détours ont également occasionné une augmentation des coûts d'entretien des véhicules, une surconsommation de carburant, etc. Pour estimer ces coûts, nous avons estimé l'état du trafic dans un contexte normal. Dans ce secteur, 1 400 véhicules circulent par jour, dont 50 bus citoyens. Le détour, en moyenne de 800 mètres, a occasionné 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, nous avons fait l'hypothèse de 1,2 personne par véhicule. Ainsi, considérant une perturbation du trafic de 2 jours, période durant laquelle les travaux ont eu lieu, les coûts attribuables à cet incident sont les suivants :

Tableau 26 : Coûts indirects liés au trafic automobile

Cause des surcoûts	Montant estimé pour la durée du bris
Coûts liés à la perte de temps dans les détours	2231,04 \$
Coûts liés à la surconsommation de carburant	371,6 \$
Coûts liés à la surutilisation des véhicules	112 \$
Coûts liés à la pollution occasionnée	318,5 \$
Total	3 033,1 \$

4.4. COÛTS TOTAUX

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 :

Tableau 27 : Ensemble des coûts imputables au bris de la canalisation au croisement des rues d'Auvergne et des Flandres

Type de Coûts	Facture	Part Totale
Coûts directs	7462\$	66%
Main d'œuvre et Équipements	3841	34%
Matériaux	3621	32%
Coûts indirects	3888\$	34%
Coûts associés à la perte d'eau	636\$	6%
Coûts liés aux détours	3033\$	27%
Coûts liés à l'avis d'ébullition	219\$	2%
Coûts Totaux	11350\$	100%

Comme nous pouvons le remarquer, les coûts directs (coûts de matériaux et coûts de la main d'œuvre et des équipements) représentent 66 % du coût total. Cela prend 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 coûts directs/coûts indirects se serait portée à 60% / 40% pour le même bris en été.

5. ETUDE DE CAS 4 : BRIS MAJEUR D'UNE CONDUITE D'EAU DANS UNE VILLE QUÉBÉCOISE

Le bris analysé dans cette section est un bris majeur d'une canalisation d'eau du réseau principal d'une ville du Québec survenu sur la rue Albert (rue fictive). La cause la plus probable est attribuée à de la corrosion et à une usure prématurée de l'infrastructure. Ce cas est très intéressant pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, l'ampleur de ce bris permet de balayer une grande palette de coûts directs et indirects attribuables à des bris d'infrastructures souterraines. D'autre part, compte tenu de son importance, ce bris a été à l'origine de multiples effets dominos, générant à leur tour des coûts directs et indirects.

5.1. LOCALISATION DU BRIS

L'autoroute Albert est l'un des axes majeurs de circulation d'une agglomération. Elle est empruntée par des centaines de milliers de voitures tous les jours. La rue Albert, qui constitue la voie de service de l'autoroute du même nom, comprend deux voies de circulation. Le bris a eu lieu sur la rue Albert. L'autoroute et la rue Albert représentent des axes majeurs et indispensables à une fluidité de la circulation, tant par leur localisation que par leur rôle au sein du réseau routier.

5.2. DÉROULEMENT DU BRIS ET INTERVENTION DES SERVICES SPÉCIALISÉS

5.2.1. Les services de sécurité incendie et de police

Le jour du bris, tôt le matin, le Service de sécurité incendie de la ville a reçu un appel pour une fuite d'eau à hauteur de la rue Albert, entre la rue B et la rue C. Après avoir fait état de la situation, le service de sécurité incendie a contacté le service de police de la ville afin de bloquer rapidement les accès et éviter de mettre en danger les citoyens. Étant donné l'importance de la fuite, de nombreux véhicules ont été mobilisés dans le but d'assurer au mieux la sécurité des habitants du quartier. Ainsi, plusieurs véhicules autopompes et véhicules d'élévation ont été dépêchés sur les lieux afin de pouvoir répondre rapidement en cas de besoin. Le bris aurait pu en effet, potentiellement affecter le mur de soutien de l'autoroute Albert qui est située en contrebas de la rue Albert.

5.2.2. Les équipes en charge de l'eau du réseau secondaire

Également sur place dès les premières minutes, les équipes de l'eau en charge de l'entretien et de la réparation du réseau secondaire des aqueducs ont fait état des lieux afin de juger de la gravité du bris. Compte tenu de la gravité du bris qui venait de survenir sur une conduite d'eau principale de la ville, la présence et l'intervention du service en

charge du réseau primaire des aqueducs ont été requises. En effet, la conduite touchée était d'un diamètre de 36 pouces et ne pouvait être prise en charge par les services responsables du réseau secondaire.

5.2.3. Les équipes en charge de l'eau du réseau primaire

Une heure après que le bris ait été déclaré, les équipes de la ville en charge de l'eau du réseau primaire sont arrivées sur les lieux. Après une analyse rapide de la situation, les équipes de la ville se sont aperçues qu'en plus des flots en surface provoqués par le bris de la conduite, la chaussée avait été soulevée sur plusieurs dizaines de mètres (entre 120 et 150 mètres), ce qui signifiait des dégâts considérables en sous-sol. Les équipes d'intervention ont donc tout d'abord fermé totalement les conduites d'alimentation situées en amont du bris afin de stopper le déversement des eaux sur la rue Albert. Dix heures après le bris, l'eau ne s'écoulait plus sur cette partie de route, fermée à la circulation depuis le début de la matinée.

Les travaux sur la rue restaient toutefois considérables. Le travail a duré une partie de la nuit afin de permettre une remise en état de presque 200 mètres de chaussée le plus rapidement possible.

5.3. LES CONSÉQUENCES DU BRIS

L'intérêt de l'étude de ce bris réside dans la diversité de ses conséquences et surtout dans l'illustration du concept des effets dominos. On constate effectivement les conséquences relativement classiques d'un bris d'infrastructure souterraine, notamment les inondations, la congestion, les retards des transports en commun, les pertes de chiffre d'affaires, les biens perdus, etc. D'autres bris ont néanmoins eu lieu suite au bris initial de la conduite d'eau primaire. En effet, la fermeture de la conduite principale a occasionné des augmentations de pression dans le quartier limitrophe qui, en raison de la vétusté et de la fragilité des canalisations, ont entraîné d'autres bris mineurs sur les conduites secondaires. 19 bris ont été recensés.

Dans cette étude de cas, il est donc important de considérer à la fois les coûts indirects du bris initial mais également tous les coûts des effets dominos, c'est à dire, tous les coûts liés aux bris qui ont découlé du premier. Même si chacun des bris induits par le bris majeur ne représente individuellement qu'une faible partie du coût total, lorsque l'on prend en compte les 19 bris, la part des coûts est plus importante.

Ainsi trois grandes catégories de coûts vont être étudiées dans les sections qui suivent :

- 1) les coûts directs du bris initial majeur de la rue Albert ;
- 2) les coûts indirects du bris initial majeur de la rue Albert ;

- 3) les coûts totaux (directs et indirects) des 19 bris engendrés par la suppression dans le réseau suite au bris initial majeur de la rue Albert combinée à l'état vétuste des conduites.

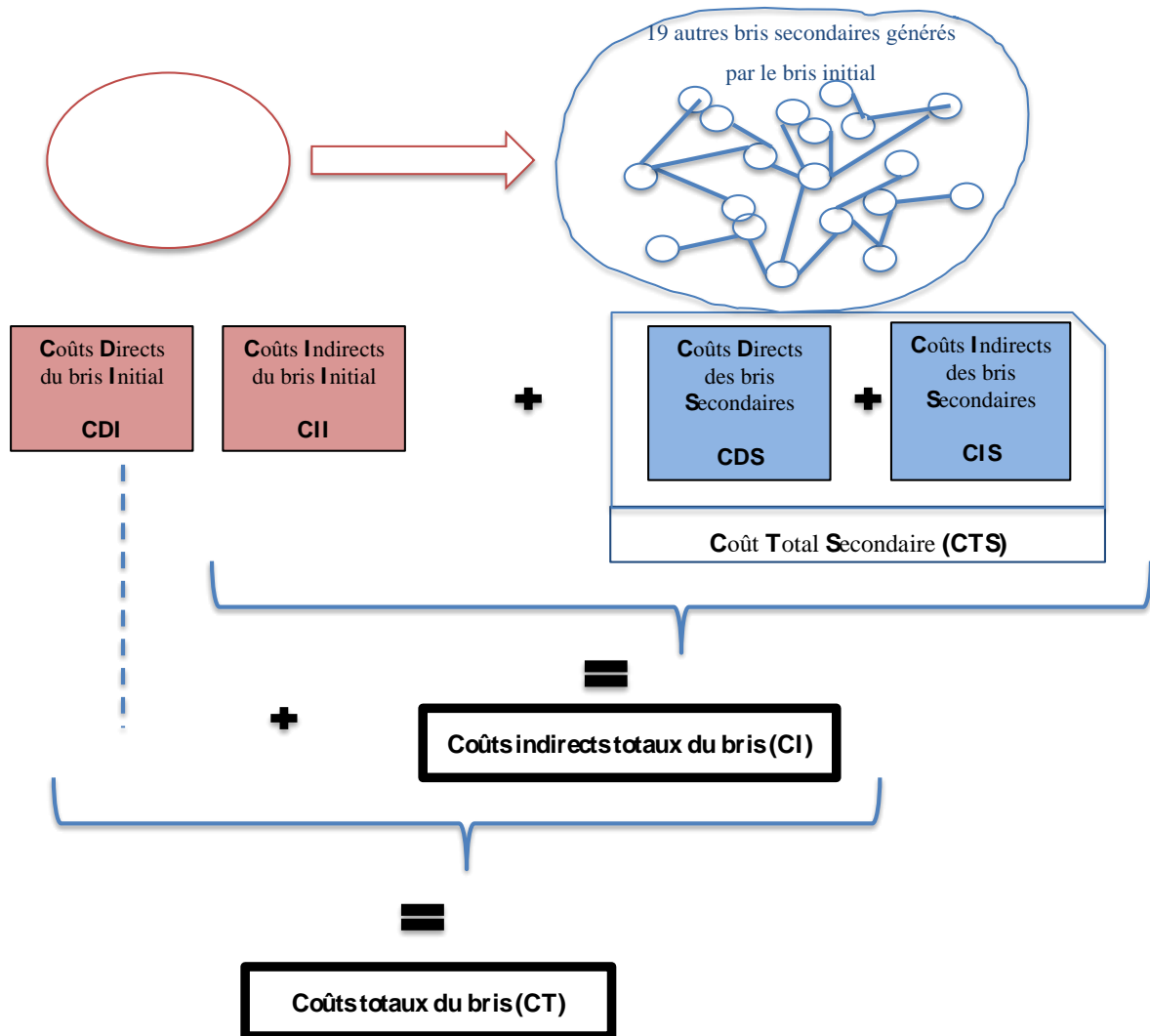


Figure 19 : Représentation des coûts totaux du bris de canalisation survenu sur la rue Albert

5.4. ÉVALUATION DES COÛTS DIRECTS ENGENDRÉS PAR UN BRIS MAJEUR (CDI)

Bien que ce bris ne soit pas le résultat de travaux d'excavation réalisés par un tiers, nous pouvons tout de même analyser ce bris en suivant la même méthodologie que celle

utilisée précédemment et rendre compte ainsi du rapport existant entre les coûts directs et les coûts indirects pour un évènement majeur.

5.4.1. LES ÉQUIPES DE LA VILLE EN CHARGE DE L'EAU DU RÉSEAU SECONDAIRE

Comme évoqué précédemment, les équipes de la ville en charge de l'eau du réseau d'aqueducs secondaire ont été les premières à être dépêchées sur les lieux. En arrivant sur les lieux du bris, les équipes d'intervention ont mesuré la gravité du bris et estimé qu'un tel flux ne pouvait pas être provoqué par une conduite de moins de 16 pouces, diamètre maximal du réseau dont elles ont la responsabilité. Après avoir sécurisé le périmètre, les équipes d'intervention ont contacté les équipes en charge de l'eau du réseau primaire afin que celles-ci puissent procéder à la fermeture des vannes en amont puis aux réparations nécessaires. Elles ont également débuté la remise en état des installations. Comme pour toute intervention des services de la ville, les coûts se sont répartis à travers deux grandes catégories : le coût de la main-d'œuvre employée pour la remise en état des installations (auquel il faut y ajouter le taux horaire d'utilisation des équipements tels que les véhicules de transport ou de réparation) et les matériaux utilisés.

Tableau 28 : Coûts estimés de remise en état assuré par les équipes en charge du réseau secondaire

Coûts	Montant
Coût de la main d'œuvre et des équipements utilisés	10 183 \$
Coût des matériaux	7 930 \$
Total estimé des coûts de remise en état	18 113 \$

5.4.2. INTERVENTION DES ÉQUIPES DE LA VILLE EN CHARGE DE L'EAU DU RÉSEAU D'AQUEDUC PRIMAIRE

Le bris ayant touché une conduite de 36 pouces, ce sont les équipes en charge de l'eau du réseau primaire qui ont poursuivi les travaux de réparation. La fermeture des vannes a eu lieu dans le courant de la matinée. Cependant, la quantité d'eau échappée étant très importante, la situation ne fut stabilisée qu'en début de soirée. Entre-temps, les équipes de la ville ont mis en place un plan d'intervention et de détournement du trafic afin de réguler au mieux la circulation avoisinante.

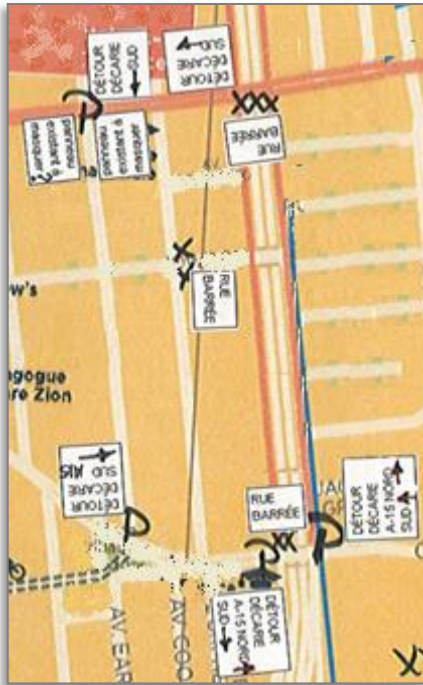


Figure 20 : Plan d'intervention des équipes en charge du réseau primaire

Durant plus d'une semaine, des travaux ont été entrepris sur la rue Albert afin de remettre le plus rapidement possible les installations en état et permettre au quartier touché de reprendre ses activités. Le bris a nécessité le remplacement de toute une section de canalisation. La conception d'une canalisation est telle que l'assemblage général se fait grâce à un assemblage de type mâle-femelle. Il a donc fallu retirer deux parties afin de pouvoir remettre en état l'ensemble de la section considérée. En outre, la remise en fonctionnement du réseau a entraîné la rupture d'un joint de pression annexe, gonflant ainsi les coûts liés au bris.

Tableau 29 : Coûts de remise en état assurée par les équipes en charge du réseau primaire

Coût	Montant
Coût de la main-d'œuvre et des équipements	128 553 \$
Coût des matériaux	74 131 \$
Total estimé des coûts de remise en état	202 684 \$

En additionnant les coûts supportés par les différents services de l'eau, on s'aperçoit que les coûts estimés totaux s'avèrent très élevés.

Tableau 30 : Ensemble des coûts de remise en état par les équipes en charge de l'eau

Coût	Montant
Coût de la main d'œuvre et des équipements	138 736 \$
Coût des matériaux	82 061 \$
Total estimé des coûts de remise en état (CDI)	220 797 \$

5.5. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS LIÉS AU BRIS MAJEUR DE LA CANALISATION PRINCIPALE (CII)

Pour cette étude de cas, différents facteurs de coûts identifiés dans la littérature vont être pris en compte. Pour certains, une évaluation économique sera présentée alors que pour d'autres, seule une illustration et une discussion autour du concept seront fournies. Les différents facteurs et la façon dont ils sont pris en compte dans l'étude de cas se reflètent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 31 : Facteurs de coûts évalués et illustrés dans l'étude de cas 4

	Facteur de coûts évalué dans l'étude de cas	Facteur de coûts illustrés dans l'étude de cas
Interruption de service électrique (incluant internet)	X	
Déploiement des services d'urgence	X	
Évacuation des résidents		X
Risques de blessures ou de décès pour les travailleurs		
Perte de produit		X
Impacts environnementaux		
Impacts économiques pour les commerces et entreprises	X	
Retards dans l'exécution des travaux		
Frais administratifs ou légaux	X	
Atteinte à la réputation de l'entreprise propriétaire de l'infrastructure souterraine		
Perturbation des sols	X	
Perturbation de la circulation	X	

Une intervention d'une telle envergure a nécessité la présence d'autres services que les équipes en charge de l'eau. En effet, les torrents qui se sont déversés sur la rue Albert au

moment du bris, ont mis en danger la sécurité des résidents, ce qui a immédiatement entraîné le déploiement du Service de sécurité incendie et du Service de police de la ville.

5.5.1. Coûts liés à l'intervention des services d'urgence

Le matin du bris, 11 camions d'intervention et 3 véhicules de supervision du service de sécurité incendie ont été dépêchés sur les lieux. Les véhicules autopompes ou les véhicules d'élévation, sont communément utilisés lors de fortes inondations afin d'apporter les premiers secours aux citoyens sur place. Il est important de noter le changement des équipes alors que l'équipe du matin a remplacé l'équipe de nuit. Une telle rotation entraîne la plupart du temps des coûts supplémentaires liés au temps de déplacement.

Le Service de sécurité incendie fut assisté par le Service de police de la ville afin de réguler la circulation automobile et l'accès aux piétons aux abords du bris. Ainsi, ce n'est pas moins de 55 policiers qui ont été sollicités lors de ce bris.

En faisant le bilan de la mobilisation humaine liée à cet évènement, on se rend très rapidement compte de l'ampleur de ce dernier, qu'il s'agisse du nombre de personnes réquisitionnées ou du nombre d'heures travaillées.

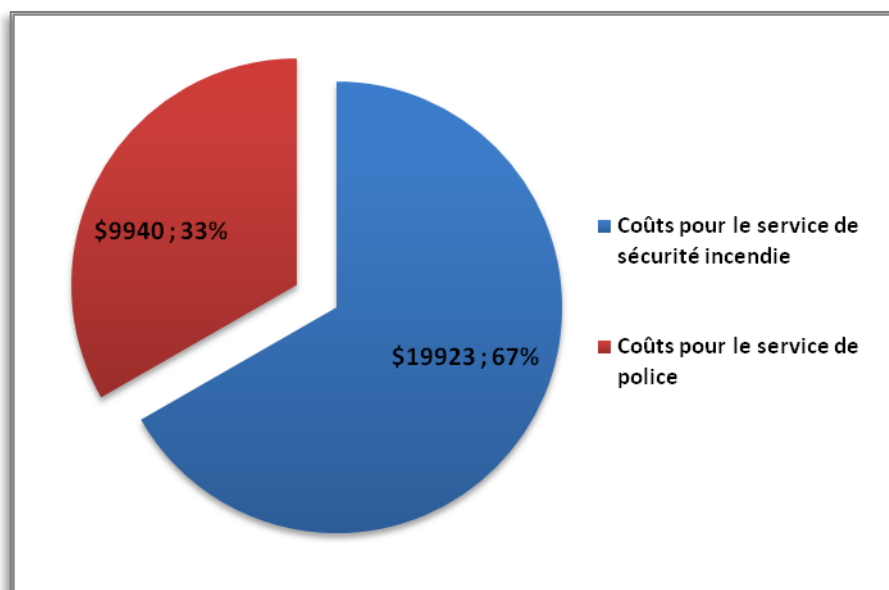
Tableau 32 : Mobilisation humaine des services d'urgence

Services	Personnel sollicité	Nombre d'heures travaillées
Service de sécurité incendie	37	110
Service de police	55	160

En combinant les coûts du personnel d'urgence et les coûts d'utilisation et d'immobilisation des véhicules, on obtient une évaluation des coûts totaux pour l'intervention des services d'urgence de près de 30 000\$.

Tableau 33 : Montants de l'intervention des services d'urgence

Coûts	Montant
Coûts pour le service de sécurité incendie	19 923 \$
Coûts pour le service de police	9 940 \$
Total des coûts estimés pour l'intervention des services d'urgence	29 863 \$



Graphique 13 : Répartition des montants des interventions des services d'urgence

5.5.2. Coûts des réclamations pour les dommages

Dans le quartier touché par le bris, on dénombre de nombreux appartements ou commerces en demi-sous-sol. Lors de fortes inondations, comme cela a été le cas suite au bris sur la rue Albert, les préjudices pour les habitants ou commerçants du secteur peuvent être considérables. Il peut s'agir de dommages aux infrastructures (mur, infiltration d'eau, etc.), aux biens (voitures, meubles, appareils électroniques, etc.) ou encore de pertes en termes de denrées alimentaires (nourriture perdue, etc.). Dans le cas du bris sur la rue Albert, 37 réclamations ont été ainsi déposées auprès du service des réclamations de la ville afin de couvrir le coût des dommages. 29 d'entre elles ont été jugées recevables.

Lorsque l'on évalue les coûts des réclamations, il est important de prendre en compte à la fois le montant des allocations données aux plaignants mais aussi les coûts administratifs de traitement des dossiers.

Tableau 34 : Montant et répartition des coûts des réclamations liés au bris de la canalisation principale

Nombre de réclamations	37
Montant total du traitement des dossiers	886 681 \$
Part des coûts de traitement de dossier	8 %
Part des coûts de remboursement	92 %

La somme totale atteignant pratiquement la somme de 900 000 \$ est un montant considérable pour la ville et représente plus de 4 fois les coûts directs liés au bris évalués à 220 800\$.

5.5.3. Coûts liés au détournement du trafic automobile

Bien que ce ne soit pas l'autoroute Albert mais la voie de service qui ait été touchée, cela représente tout de même un flux de circulation très important, surtout pendant les heures de pointe. Comme indiqué précédemment, un détournement a été mis en place. Un détournement peut entraîner des pertes de temps pour les automobilistes, une augmentation de la consommation d'essence ainsi qu'une augmentation des émissions de gaz et particules polluantes.

Examinons de plus près le détournement préconisé dans le plan d'urgence déployé lors du bris de conduite sur la rue Albert et ses coûts associés.

Considérons tout d'abord les coûts liés à la perte de temps. En se basant sur les données de Google Maps, un détournement par la rue D allonge la durée de parcours de 2 minutes. Afin d'évaluer les coûts engendrés par le détournement, nous avons utilisé les hypothèses suivantes : un salaire moyen pour cette ville de 22,81 dollars par heure et une durée des travaux de 2 semaines. En ne prenant en compte que les heures de pointe (correspondant à un probable temps de travail), nous pouvons calculer un coût relié à la perte de temps en fonction du trafic sur cette section de route. Le temps hors heure de pointe n'étant pas significatif, il n'est pas pris en compte dans l'évaluation des coûts de congestion.

En plus des coûts liés à la perte de temps, il est important de noter que ce détournement en allongeant le parcours de 500 mètres, engendre d'autres coûts. En effet, il représente une source de surconsommation d'essence et donc de pollution (gaz à effet de serre et particules mobiles) ainsi qu'une source de sur-utilisation des véhicules (donc d'usure prématurée). Un détournement de 500m peut paraître minime, mais en considérant un trafic journalier de plus de 16 800 véhicules aux heures de pointe, ce détournement ne peut être omis. En reprenant l'ensemble des hypothèses de l'étude³¹, nous avons pu obtenir les résultats suivants (en se basant sur les formules de calcul présentées dans le chapitre 2) :

Tableau 35 : Montants des coûts affectant le trafic automobile

Coûts dus au détournement du trafic routier	Montant
Coût de la perte de temps	153 283 \$
Coût de la surconsommation	14 454 \$
Coût de la pollution additionnelle	12 389 \$
Coût de la sur-utilisation des véhicules	4 200 \$
Coût total	184 326 \$

³¹ Il s'agit des hypothèses exposées propres au cas, ainsi que des éléments fixes présentés dans la revue de littérature, à savoir coûts liés à l'entretien (CAA, 2013) égaux à 0,05c/km, consommation au 1km égale à 0,1287L, prix essence pour la ville de l'étude de cas égal à 1,337\$/L et le taux d'occupation des voitures égal à 1,2.

Ainsi, l'augmentation du temps de parcours due au détour mis en place représente des coûts estimés à 184 326 \$. Ces coûts indirects s'élèvent à plus de 80% des coûts directs.

5.5.4. Coûts liés à la coupure d'électricité

Comme cela est fréquent lors d'inondations de grande ampleur, le service électrique a été interrompu, et ce pendant 1h41. D'après les informations d'Hydro Québec, environ 914 clients (882 particuliers et 32 professionnels) ont été privés d'électricité. Nous faisons l'hypothèse que dans le quartier dans lequel le bris a eu lieu, il n'y a aucun client majeur du réseau électrique.

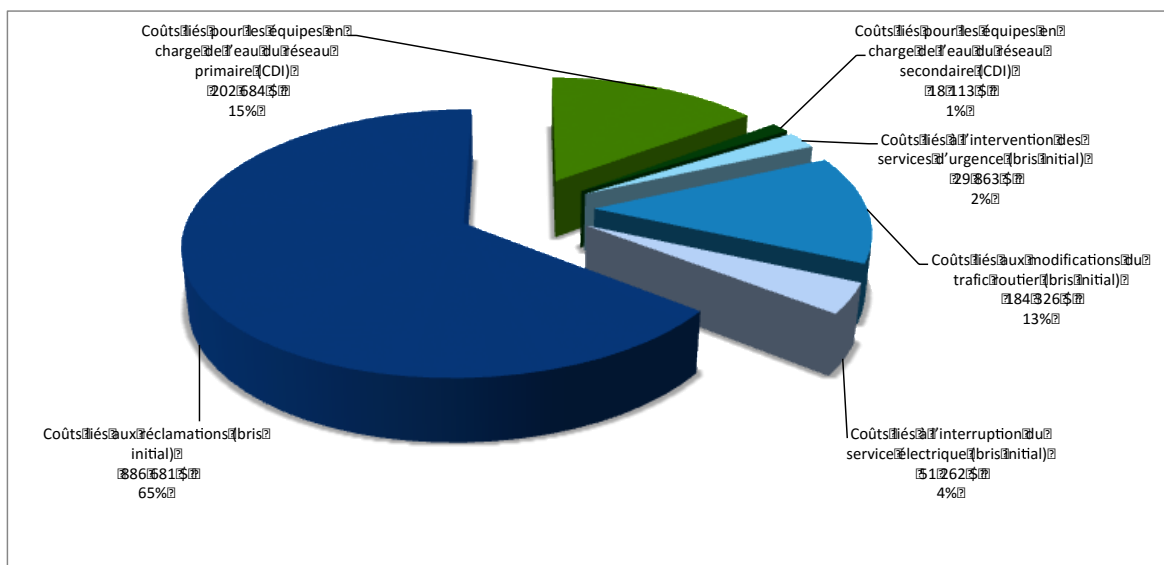
Nous avons appliqué la méthodologie, présentée précédemment, qui permet d'évaluer les coûts liés aux interruptions de service électrique en fonction du nombre et du type de clients touchés. Les coûts estimés pour la coupure électrique s'élèvent ainsi à 51 262 dollars. Cela représente approximativement 23% des coûts directs du bris.

5.5.5. Récapitulatif de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale

L'ensemble des éléments que nous venons de décrire nous permet d'établir un premier bilan concernant les facteurs de coûts directs et indirects liés au bris de la conduite principale sur la rue Albert. Le tableau suivant synthétise l'information.

Tableau 36 : Récapitulatif de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale

Coûts	Montant
Coûts liés pour les équipes en charge de l'eau du réseau primaire	202 684 \$
Coûts liés pour les équipes en charge de l'eau du réseau secondaire	18 113 \$
Coûts directs (CDI)	220 797 \$
Coûts liés à l'intervention des services d'urgence	29 863 \$
Coûts liés aux modifications du trafic routier	184 326 \$
Coûts liés à l'interruption du service électrique	51 262 \$
Coûts liés aux réclamations suite à l'évènement survenu sur la rue A	886 681 \$
Coûts indirects (CII)	1 152 132 \$
Coûts totaux liés au bris de la conduite principale (CTI)	1 372 929 \$



Graphique 14 : Répartition de l'ensemble des coûts liés au bris de la canalisation principale

Nous remarquons aisément que les coûts directs pour un bris majeur tel que celui qui a eu lieu sur la rue Albert ne représentent que 16% des coûts totaux (soit une somme de 220 797\$ pour un coût total estimé à 1 372 929 \$) alors que les coûts indirects représentent 84%. Nous observons ainsi que pour un évènement majeur, la proportion coûts directs/coûts indirects se situe au-delà de l'estimation 20/80 avancée lors de la revue de littérature.

En outre, il est important de ne pas oublier, dans ce cas particulier, les coûts liés aux autres bris, engendrés par le bris principal. En effet, les coûts de ces effets dominos viennent s'ajouter aux 1 152 132 \$ de coûts indirects cités précédemment.

5.6. ÉVALUATION DES COÛTS LIÉS AUX EFFETS DOMINOS ENGENDRÉS PAR LE BRIS DE LA CANALISATION PRINCIPALE (CDS ET CIS)

Rappelons que 19 bris ont eu lieu en raison des surpressions créées sur le réseau secondaire au cours des 10 jours suivants le bris de la conduite principale de même qu'en raison de l'état vétuste et fragile des conduites. Comme pour le bris survenu sur la rue Albert, de nombreux services ont été sollicités tant au niveau des interventions d'urgence sur les lieux des différents sinistres que pour de la remise en état des infrastructures touchées.

5.6.1. Les interventions des équipes de la ville en charge du réseau secondaire

Comme nous avons pu le constater dans la première partie de l'étude de cas, les équipes en charge de l'eau du réseau secondaire ont été sollicitées pour remettre en état les 19 canalisations touchées par ces bris. Contrairement au bris principal, aucune équipe responsable du réseau primaire n'a été sollicitée.

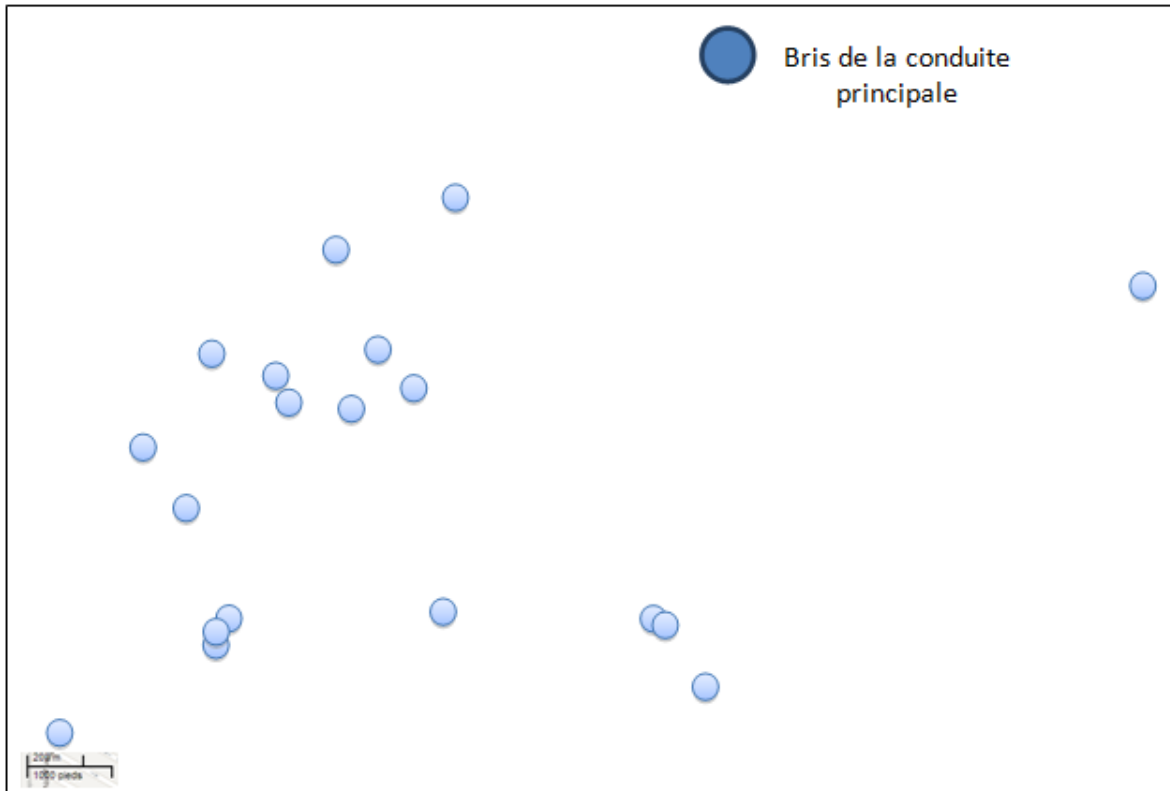


Figure 21 : Localisation des bris qui ont suivi l'accident survenu sur la rue Albert

Le tableau ci-dessous récapitule les coûts associés à chacun des bris engendrés par le bris principal. Il fait état d'une part des coûts liés à la main-d'œuvre et aux équipements et d'autre part des coûts des matériaux.

Tableau 37 : Ensemble des coûts liés à l'intervention des équipes en charge de l'eau pour la réparation des bris d'aqueduc du réseau secondaire dus aux surpressions causées par le bris principal de la rue Albert combiné à l'état vétuste des conduites.

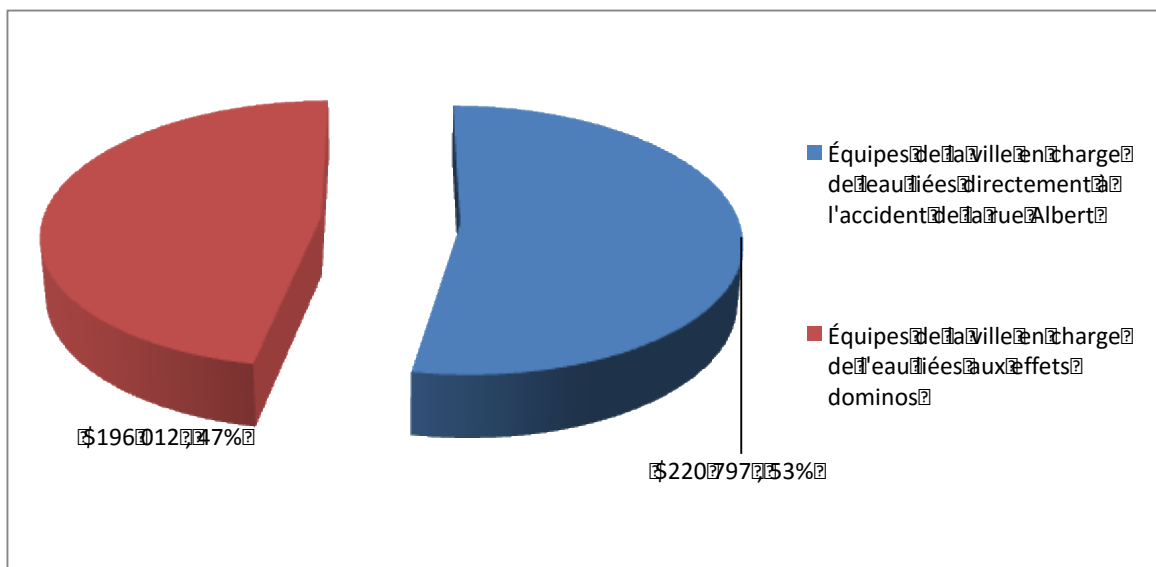
Localisation	Coûts de la main d'œuvre et des équipements	Coûts des matériaux	Total
Localisation 1	5 896 \$	2 072 \$	7 968 \$
Localisation 2	7 301 \$	3 830 \$	11 131 \$
Localisation 3	6 014 \$	1 873 \$	7 887 \$
Localisation 4	4 257 \$	1 292 \$	5 549 \$
Localisation 5	2 648 \$	1 242 \$	3 890 \$
Localisation 6	4 327 \$	1 430 \$	5 757 \$
Localisation 7	7 597 \$	4 852 \$	12 449 \$
Localisation 8	5 003 \$	2 986 \$	7 989 \$
Localisation 9	4 527 \$	2 633 \$	7 160 \$
Localisation 10	10 468 \$	2 444 \$	12 912 \$
Localisation 11	11 888 \$	4 117 \$	16 005 \$
Localisation 12	8 427 \$	1 610 \$	10 037 \$
Localisation 13	8 253 \$	3 826 \$	12 079 \$
Localisation 14	7 400 \$	1 288 \$	8 688 \$
Localisation 15	12 340 \$	5 264 \$	17 604 \$
Localisation 16	5 593 \$	1 279 \$	6 872 \$
Localisation 17	5 075 \$	4 141 \$	9 216 \$
Localisation 18	11 174 \$	6 916 \$	18 090 \$
Localisation 19	6 194 \$	2 902 \$	14 727 \$
Total	140 015 \$	55 997 \$	196 012 \$

Globalement, on remarque que la répartition des coûts pour la réparation des 19 bris suit sensiblement la même que celle du bris principal, en terme de coûts liés à la main-d'œuvre et aux équipements et coûts liés aux matériaux.

Tableau 38 : Coûts liés à l'intervention des équipes en charge de l'eau du réseau secondaire de la ville pour la réparation de l'ensemble des bris dus aux surpressions causés par le bris principal de la rue Albert combiné à l'état vétuste des conduites

	Montant	Part des coûts totaux de réparation
Coûts de la main d'œuvre et des équipements	140 015 \$	71%
Coûts des matériaux	55 997 \$	29%
Coûts totaux estimés de remise en état des 19 bris par les services de l'eau de la ville (CDS)	196 012 \$	100%

Nous pouvons ici remarquer un fait très intéressant. Au-delà de l'ampleur des coûts liés à la réfection des 19 conduites du réseau secondaire, qui s'élèvent à 196 012 \$, on remarque également que ce coût direct total est pratiquement le même que celui déboursé pour la remise en état de la canalisation principale de la rue Albert (220 797 \$) par les équipes en charge de l'eau de la ville.



Graphique 15 : Répartition des coûts des équipes de la ville en charge de l'eau entre le bris principal et les bris dus aux effets dominos

Les coûts des équipes de la ville en charge de l'eau sont sensiblement aussi élevés pour la rue Albert (53%) que pour les autres rues, correspondant aux effets dominos (47%).

5.6.2. Les interventions des équipes du service de sécurité incendie de la ville

Même si les 19 bris sont considérés comme mineurs, il n'en reste pas moins que certains ont nécessité une intervention des services d'urgence. Nous avons des données concernant les sorties du service de sécurité incendie, mais il nous a toutefois été impossible d'obtenir des informations concernant d'éventuelles interventions du service de police de la ville.

Sur les 19 bris, 5 ont requis une intervention des services de sécurité incendie. Les interventions ont provoqué le déplacement de plusieurs équipes pour parfois seulement quelques minutes. Un seul déplacement a nécessité une intervention avec 9 camions au total (il s'agit du bris situé à la localisation 7). Au total, cela représente pratiquement 77 heures de travail cumulées pour des coûts estimés à 17 057\$.

Tableau 39 : Coût des interventions du service de sécurité incendie

Nombre d'heures travaillées	76 h 52 min
Coût total pour le service de sécurité incendie	17 057 \$

5.6.3. Coûts des réclamations pour les dommages liés aux bris des effets dominos

Comme cela a été le cas pour le bris survenu sur la rue Albert, des réclamations ont été déposées par les citoyens victimes de ces divers bris. Bien que le nombre de bris engendrés par les effets dominos soit important, le nombre de réclamations est resté relativement faible, les dommages étant moindres.

La ville n'a effectivement reçu que 10 réclamations, celles-ci étant relatives à 5 bris. Allant de quelques centaines de dollars à plusieurs dizaines de milliers de dollars, le coût estimé pour ces 10 réclamations s'est élevé à 142 931 \$.

5.6.4. Coûts divers

L'ensemble des nuisances pour la population répertoriées pour le bris principal, s'applique également sur l'ensemble des bris survenus sur le réseau secondaire. Certaines nuances peuvent toutefois être apportées concernant l'ampleur des nuisances qui dépend bien entendu de la durée et de la localisation des bris. En effet, l'impact d'un bris sur un réseau secondaire est généralement proportionnellement plus faible qu'un bris qui survient sur une conduite principale. Ces nuisances sont toutefois à prendre en compte.

5.6.5. Bilan des coûts liés aux effets dominos

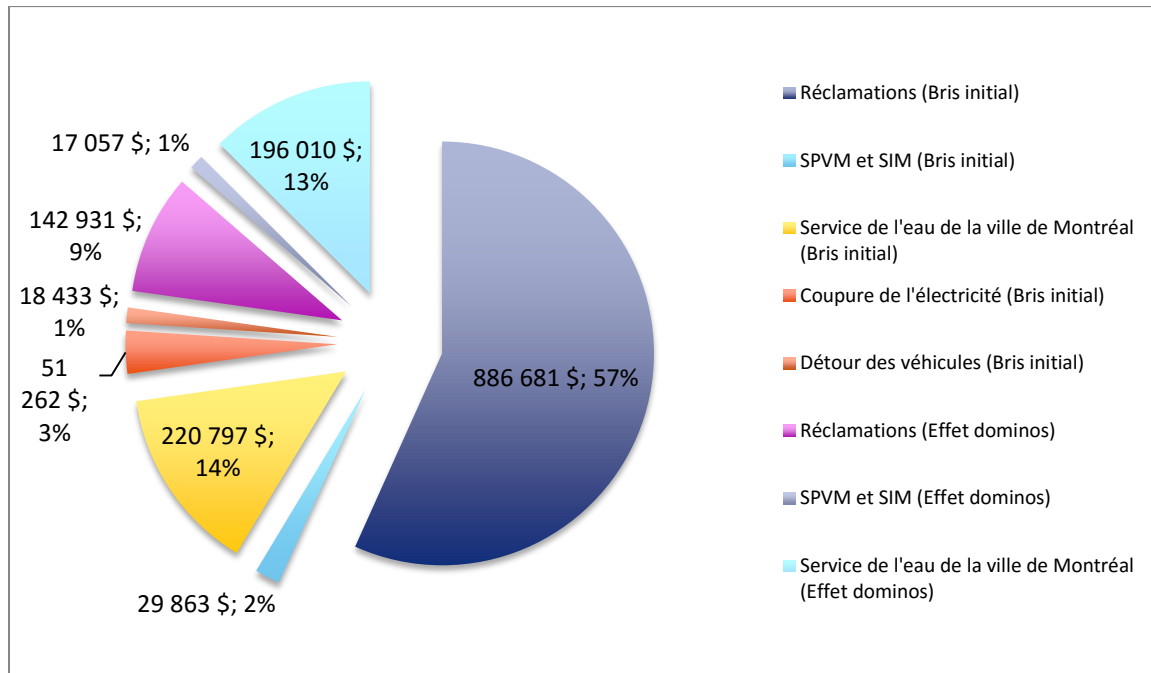
L'ensemble des coûts liés aux 19 bris engendrés par les effets dominos du bris principal représente en réalité des coûts indirects liés à ce bris initial. S'élevant à près de 356 000 \$ au total, les coûts liés aux effets dominos viennent donc gonfler le montant des coûts indirects liés au bris initial de la rue Albert.

Tableau 40 : Coûts liés aux 19 bris engendrés par les effets dominos du bris principal

Coûts des effets dominos	Montant	Part dans le coût total des effets dominos
Coûts directs secondaires (CDS)		
Coûts pour le service de l'eau	196 012 \$	55%
Coûts indirects secondaires (CIS)		
Coûts des réclamations	142 931 \$	40%
Coûts pour le service de sécurité incendie	17 057 \$	5%
Coûts totaux estimés des effets dominos (CTS)	356 000 \$	100%

5.7. BILAN GÉNÉRAL

Cette étude de cas illustre la complexité de l'évaluation des coûts d'un bris majeur. En effet, au-delà des coûts qui sont associés au bris principal, nous avons pu remarquer que d'autres événements, directement liés, avaient eux aussi contribué au coût total. En regardant précisément la part qu'occupent les coûts dus aux effets dominos (CTS), on remarque que ceux-ci représentent 21% du coût total et qu'ils représentent plus d'une fois et demi les coûts directs associés au bris initial (CDI).



Graphique 16 : Répartition de l'ensemble des coûts liés au bris survenu sur la rue Albert et ceux liés aux effets dominos

Tableau 41 : Part des différents coûts dans les coûts totaux

Coûts	Montant	Proportion des coûts totaux du bris initial (CTI) ou des bris secondaires	Proportion des coûts totaux du bris (CT)
Coûts totaux liés au bris initial survenu sur la rue Albert (CTI)	1 372 929 \$		79,4 %
<i>Coûts directs bris initial (CDI)</i>	220 797 \$	18%	12,8 %
<i>Coûts indirects bris initial (CII)</i>	1 152 132 \$	82%	66,6 %
Coûts totaux liés aux bris secondaires (CTS)	356 000 \$		20,6 %
<i>Coûts directs liés aux bris secondaires (CDS)</i>	196 012 \$	55%	11,3 %
<i>Coûts indirects liés aux bris secondaires (CIS)</i>	159 988 \$	45%	9,3 %
COÛT TOTAL DU BRIS (CT)	1 728 929 \$		100%


Dans ce cas particulier, nous remarquons que les coûts directs du bris initial (qui représentent en réalité aussi les coûts directs du bris au sens large) atteignent près de 13 % du coût total du bris, soit 220 797 \$ sur un montant total estimé d'environ 1 728 929 \$. Cela s'éloigne donc de la répartition 20/80%, évoquée pour la majorité des cas, le rapport étant ici d'environ 13/87%. Comme on pouvait ainsi s'y attendre, plus le bris initial est grand, plus l'importance des coûts indirects augmente. L'ampleur initiale d'un bris influence les possibles effets dominos et ainsi le coût final global que représente un bris.

6. BILAN ET DISCUSSIONS AUTOUR DES ÉTUDES DE CAS

Les 4 études de cas exposées montrent la part des divers coûts indirects liés aux bris d'infrastructures souterraines et l'importance qu'ils représentent dans les coûts totaux d'un bris. Rappelons que deux de ces bris (celui de la conduite de gaz et celui du réseau de télécommunication) ont été causés par des tiers alors que les deux autres bris, concernant des bris de conduite d'eau, ont été causés « naturellement » soit par la vétusté du réseau ou encore par la corrosion de la conduite. Mais peu importe la cause du bris, les conséquences en termes de coûts indirects sont très semblables. Les variations dans le rapport entre les coûts directs et indirects dépendent plutôt du type de bris considéré, de l'importance de celui-ci ainsi que de sa localisation. 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, les deux facteurs de coûts les plus importants sont l'intervention des services d'urgence et l'interruption de service d'électricité. Il est important toutefois de relever que ces deux facteurs de coûts sont spécifiques compte tenu du fait que le bris a eu lieu à Montréal. En effet, dans de nombreuses municipalités du Québec, les interventions du service de sécurité incendie sont assurées par des pompiers volontaires, ayant des procédures et des moyens d'interventions différents et plus restreints. Cela engendre deux modifications de taille. Premièrement, moins d'hommes et de matériel sont mis à disposition. Ensuite, la procédure de déclenchement d'artère (coupure d'électricité ordonnée par le service de sécurité incendie pour diminuer les risques) ne sera pas forcément demandée. En conjuguant ces deux points avec la durée plus ou moins importante de l'intervention, de nombreux facteurs de coûts indirects ne seraient pas présents ou seraient moindres pour une intervention en dehors de l'île de Montréal. Finalement, comme au moment du bris, la rue était déjà barrée à cause des travaux en cours, aucun coût de congestion n'a été associé à ce bris.

Le cas du bris d'infrastructure souterraine de télécommunication sur la rue Jean Talon nous permet de prendre conscience de l'importance des coûts que représente la congestion. Nous avons ainsi pu remarquer que pour des perturbations significatives sur le trafic routier, les montants liés à la surconsommation, à la pollution, à la surutilisation et surtout aux pertes de temps peuvent rapidement devenir importants (particulièrement pour une perturbation de plusieurs semaines). Cette étude de cas a permis 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 d'une recherche approfondie sur le détournement d'une partie du trafic pendant la durée des travaux. Les coûts estimés pour la congestion dans cette étude de cas sont très semblables aux estimations faites par



(Gourvil & Joubert, 2004) sur l'évaluation de la congestion routière générale dans la région de Montréal.

Le cas de la rupture de la canalisation survenue 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 une plus grande part des coûts totaux que les coûts indirects. Toutefois, comme la Ville de Gatineau connaît plus de 200 bris similaires annuellement, c'est la récurrence de ce type de bris qui en fait une réelle préoccupation, tant au niveau des coûts qu'au niveau de la sécurité et de la qualité de vie des habitants des localités touchées.

Le deuxième cas de bris de canalisation présente une étude qui permet de mettre en lumière un événement de très grande envergure et ayant des impacts importants. Ce bris nous a ainsi permis d'illustrer clairement ce que représentent les effets dominos et l'importance que ces derniers représentent. Ces événements sont le fruit d'un premier aléa. Cependant, leur prise en compte est nécessaire et ne fait qu'alourdir le bilan final des coûts totaux.



CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS TOTAUX DES BRIS D'INFRASTRUCTURES POUR LE QUÉBEC

1. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS LIÉS AUX BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES

Nous avons présenté une large revue de la littérature exposant l'ensemble des coûts qui peuvent se matérialiser en cas de bris d'infrastructures. Cette revue de littérature a été illustrée au travers de quatre études de cas de bris survenus au Québec. Afin d'avoir un portrait complet de la situation au Québec, il est intéressant d'avoir une estimation des coûts indirects totaux liés aux bris d'infrastructures souterraines.

Il est important de préciser que l'analyse qui suit ne considère que les bris d'infrastructures causées par les tiers puisque ce sont des données qui se retrouvent dans la base de données ORDI. La nature volontaire de la signalisation des bris dans la base de données ORDI implique que les bris analysés dans cette étude sont probablement un sous-ensemble du total des incidents dans la province et par conséquent, que l'estimation des coûts fournie dans cette section est moins importante qu'elle ne le serait si la base de données était complète.

Afin d'estimer les coûts indirects de tous les bris d'infrastructures causés par des tiers au Québec en 2014, les informations de la base de données ORDI ont été regroupées et analysées en fonction des méthodes de calcul élaborées dans le projet et également en fonction des résultats des études de cas.

Basée sur la revue de littérature et les études de cas, une méthodologie générale d'évaluation des coûts indirects totaux a été développée et intègre différents types de coûts en fonction des infrastructures touchées.

En raison des spécificités de chaque dommage et étant donné le nombre de bris d'infrastructures souterraines, il est quasiment impossible de prendre en compte tous les différents types de coûts indirects énumérés dans la revue de littérature dans l'évaluation globale. Ainsi, quatre types de coûts entrent dans la composante de l'estimation des coûts indirects :

- Coûts d'interruption du service électrique (**E**)
- Coûts de déploiement des services d'urgence (**S**)
- Coûts de congestion (perte de temps, usure véhicule, pollution, etc.) (**C**)
- Coûts d'interruption du service Internet (**I**)

Les coûts indirects par incident sont définis comme la somme des différents coûts horaires attribuables multipliés par la durée de l'incident. Formellement, pour un bris i :

$$\sum_{t=\{E,S,C,I\}}^T C_t(h_i)$$

Où :

- $C_t \equiv$ Coût horaire du type t
- $h_i \equiv$ Durée du bris i en heures
- $E \equiv$ Type de coût: interruption du service électrique
- $S \equiv$ Type de coût: services d'urgence
- $C \equiv$ Type de coût: congestion routière
- $I \equiv$ Type de coût: interruption du service internet

Les coûts indirects totaux sont donnés par la somme des coûts indirects de chaque bris i , pour un total de N bris soit :

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=\{E,S,C,I\}}^T C_t(h_i)$$

Il est important de noter que nous avons considéré, compte tenu des données disponibles, que la durée du bris correspondait à la durée de l'interruption de service à la suite de l'incident. Cette hypothèse tend à sous-estimer les coûts puisqu'il arrive que le service soit rétabli alors même qu'il subsiste encore par exemple une entrave à la circulation dus aux travaux de réparation. Dans les cas où nous ne possédions pas d'informations sur la durée du bris, nous avons attribué, en s'appuyant sur les études de cas au Québec, une durée de 1h30 pour les bris du réseau électrique et une durée de 2h pour les autres types de bris.

Les coûts sont évalués à partir du type d'infrastructure qui a été touché par l'incident. Le tableau suivant résume les coûts assignés selon le type d'infrastructure touché.

Tableau 42 : Coûts selon le type d'infrastructure touché

Type d'infrastructure touché lors du bris	Types de coûts indirects associés pris en compte
Électrique	Coûts d'interruption du service électrique. Coûts d'interruption du service Internet Coûts de congestion.
Gazière	Coûts de déploiement des services d'urgence. Coûts d'interruption du service Internet Coûts d'interruption du service électrique. Coûts de congestion.
Télécommunications	Coûts d'interruption du service internet. Coûts de congestion.
Égouts et aqueducs	Coûts de congestion.
Autres	Coûts de congestion.

La méthode de calcul de chacun de ces coûts sera expliquée dans les sections suivantes.

2. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS D'INTERRUPTION DU SERVICE D'ÉLECTRICITÉ

La méthode de calcul retenue prend en considération les coûts indirects suivants :

- les dommages causés aux équipements suite à la coupure de service,
- les salaires payés sans qu'il y ait de production et
- les ventes ou production perdues.

Le calcul se fait net des coûts sauvés par l'interruption (e.g. salaires qui n'ont pas dû être versés, coûts d'énergie épargnés). Elle prend, également, en considération le fait que certaines industries disposent de génératrice en cas de panne.

L'évaluation des coûts de l'interruption électrique se base entre autre sur une méta-analyse réalisée en 2009 et mise à jour en 2015 par le Berkeley Lab, affilié à l'University of California, Berkeley, et financée par l'Office of Electricity Delivery and Energy Reliability du U.S. Department of Energy (Sullivan et al., 2015). Les données de cette étude ont été utilisées pour l'estimation après qu'elles aient été adaptées afin de refléter la composition industrielle du Québec. Pour ce faire, le pourcentage du produit intérieur brut de la province, par industrie, selon le Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) a été utilisé dans le but d'alimenter la fonction des dommages des clients et obtenir les estimations.

Les fonctions de coûts utilisées pour chaque type de client sont des fonctions affines croissantes. À titre d'exemple, 1h d'interruption de service occasionne des coûts s'élevant à environ 5\$ pour un client résidentiel, à 900 \$ pour un client moyen (petits clients commerciaux et industriels avec une consommation annuelle de moins de 50 000kWh) et à 6000 \$ pour un client majeur (petits clients commerciaux et industriels avec une consommation annuelle de plus de 50 000kWh).

L'estimation de la proportion des clients affectés par une interruption de service électrique due à un bris au Québec (P_k) a été effectuée grâce à l'une des études de cas et a été ajustée pour tenir compte de la densité de population³² de la ville dans laquelle a lieu le bris.

Pour chaque bris étant à l'origine d'une interruption de service électrique, la distribution retenue des clients affectés par région administrative est la suivante :

Tableau 43 : distribution retenue des clients affectés par région administrative

Type de client	Pourcentage affecté
Résidentiel (R)	0,13%
Client moyen (m)	0,76%
Client majeur (M)	0,36%

Le nombre de client total par catégorie d'usage et par région administrative a été obtenu auprès d'Hydro-Québec³³. Ainsi, le coût relié à une interruption du service électrique pour un bris est donné par la formule suivante :

³² Les données pour les densités sont tirées de Statistique Canada, [https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hlt-fst/pd-pl/Table-](https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hlt-fst/pd-pl/Table-Tableau.cfm?LANG=Eng&T=302&SR=1&S=51&O=A&RPP=9999&CMA=0&PR=24)

[Tableau.cfm?LANG=Eng&T=302&SR=1&S=51&O=A&RPP=9999&CMA=0&PR=24](https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hlt-fst/pd-pl/Table-Tableau.cfm?LANG=Eng&T=302&SR=1&S=51&O=A&RPP=9999&CMA=0&PR=24)

³³ Information tirée du « Profil régional des activités d'Hydro-Québec, 2011 », disponible à la page <ftp://ftp.mrn.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Perio/0918568/2011.pdf>


$$C_E(h_i) = P_R N_R C(h_i, R) + P_m N_m C(h_i, m) + P_M N_M C(h_i, M)$$

Où :

N_k = Nombre total de clients du type k dans la région administrative concernée
(k pouvant prendre la valeur R pour les clients résidentiels, m pour les clients moyens et M pour les clients majeurs)

P_k = Pourcentage de clients du type k ayant été affectés

$C(h_i, k)$

= Coût estimé avec adaptation de la méthode du Berkeley Lab pour le type de client k en fonction de la durée de l'interruption h_i

3. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS DE MOBILISATION DES SERVICES D'URGENCE

Lorsque l'incident a lieu à Montréal, les services d'urgence (pompiers et policiers) sont obligatoirement dépêchés sur les lieux, ce qui entraîne certains coûts, notamment les salaires des effectifs d'urgence et l'utilisation des équipements qui leur sont assignés pour répondre à l'appel.

Des entrevues avec le Service de sécurité incendie de Montréal (SIM) lors de l'étude de cas présentée auparavant dans ce rapport ont permis d'établir les moyens d'intervention des pompiers en cas de bris de conduite de gaz à Montréal. Ces coûts comprennent les charges d'opération des véhicules d'urgence ainsi que de la main d'œuvre de ces services. L'intervention présentée dans l'étude de cas était une grosse intervention et ne représente pas les coûts liés à une intervention moyenne. Une estimation, faite à l'aide des études de cas et de discussions avec le SIM, indique un coût horaire moyen de 5 500 \$ (2012\$). Ces montants sont multipliés par le nombre d'heures d'intervention afin d'obtenir le coût de la mobilisation des services d'urgence lors du bris.

Il serait possible, à juste titre, de s'interroger sur le fait que les coûts de la mobilisation des services d'urgence seraient de toute façon engagés peu importe que les pompiers soient appelés pour une intervention ou non. De ce fait, il serait plausible de se pencher sur la possibilité que les coûts supportés par les services d'urgence soient surestimés. Toutefois, les ressources humaines et matérielles des services d'urgence montréalais, qui sont dépêchés sur les lieux d'un bris d'infrastructure gazière, ne peuvent pas être déployées dans le but de répondre à d'autres urgences, ce qui peut poser des difficultés s'il n'y a plus de ressources disponibles ou si le temps de réponse est allongé du fait des bris de gaz. Or, le risque de chevauchement des incidents n'est pas négligeable, compte

tenu qu'en 2014, Montréal a connu au moins 170 bris d'infrastructures gazières liés à des travaux d'excavation³⁴ et un total de 4 253 incendies, dont 336 majeurs, ainsi que 80 829 interventions du SIM en tant que premiers répondants³⁵. Ce coût d'opportunité n'est pas estimable à partir des données disponibles et n'est donc pas inclus dans le calcul mais il demeure pertinent comme facteur des coûts socio-économiques des bris³⁶.

Cette situation n'est pas unique à la Ville de Montréal. Les services d'incendie des villes de Québec et de Laval déploient également leurs effectifs dès qu'un tel incident est signalé³⁷. Même si le coût monétaire marginal assumé par la Ville de Québec est nul³⁸, le coût d'opportunité est tout de même présent. Par exemple, en l'absence de bris d'infrastructures gazières, les effectifs pourraient allouer davantage de temps à d'autres activités (e.g. la prévention). Également, étant donné que les effectifs futurs sont prévus en fonction du nombre total de sorties, il serait possible à plus long terme d'avoir un effectif réduit et donc moins coûteux si moins d'incidents gaziers étaient attendus.

Finalement, pour l'évaluation des coûts annuels indirects totaux, nous avons attribué un coût horaire relié à un déploiement des services d'urgence dès lors que le bris touchait une infrastructure gazière et avait lieu à Montréal. En effet, on sait, dans ce cas précis seulement, qu'une intervention des pompiers est obligatoire et systématique.

4. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS DE CONGESTION ROUTIÈRE

Nous faisons l'hypothèse réaliste voulant que tout incident ayant lieu sur une voie publique³⁹ entraîne un coût indirect de congestion. Cette hypothèse s'est largement vérifiée dans nos études de cas peu importe le type d'infrastructure touchée. Par conséquent, la distance supplémentaire parcourue et le temps perdu dans la congestion sont comptabilisés dans les coûts indirects.

Conformément à la revue de littérature, les coûts de congestion sont évalués par la somme des coûts suivants :

³⁴ Information obtenue à partir de la base de données ORDI

³⁵ Rapport des activités 2014, Service de sécurité incendie de Montréal.

³⁶ Lors d'un arrêt cardiaque, par exemple, chaque minute additionnelle d'attente avant la défibrillation réduit le taux de réussite de la réanimation de 7 à 10%. Pour une discussion approfondie, voir : Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier et David Boisclair. Évaluation économique de l'implantation du service de premiers répondants au sein du Service de Sécurité Incendie de Montréal, janvier 2004, pp. 41-46.

³⁷ Il s'agit d'une liste non exhaustive. Il s'ensuit que les coûts de mobilisation des services d'urgence sont potentiellement sous-estimés.

³⁸ Communication personnelle avec le SPIQ.

³⁹ L'information sur le type de voie touchée a été obtenue à partir de la base de données ORDI.

- a) **les coûts liés à la perte de temps =**
 nombre de véhicules pris dans la congestion
 × taux d'occupation des véhicules
 × salaire moyen pour la région
 × temps congestion en heure
- b) **les coûts liés à la surconsommation de carburant =**
 nombre de véhicules ayant pris le détour
 × distance détour
 × consommation d'essence sur 1 km
 × prix moyen de l'essence dans la région considérée
- c) **les coûts liés à la surutilisation des véhicules (maintenance et entretien) =**
 nombre de véhicules ayant empruntés le détour
 × distance détour
 × Coûts d'utilisation d'une automobile
- d) **les coûts liés à la pollution =**
 Coûts surconsommation × 6/7

L'hypothèse retenue est que pour tous les bris sur une route publique, chaque véhicule touché par la congestion doit rallonger son trajet d'une minute et d'un kilomètre. On considère également l'hypothèse de 5000 véhicules à l'heure potentiellement affectés par le bris. Cette estimation provient d'une étude de cas à Montréal et elle est ajustée à la densité de la population de la municipalité touchée par le bris. Selon les données de l'enquête Origine Destination, on estime un taux d'occupation des véhicules à 1,2 personnes par véhicule. Pour le coût d'utilisation d'une automobile, les coûts estimés pour l'entretien et les pneus par CAA-Québec⁴⁰ ont été retenus. Nous avons considéré le minimum des coûts évalués par CAA c'est à dire ceux correspondant à la plus petite voiture (Honda Civic). Les coûts liés à l'entretien et à la maintenance sont donc évalués à 5 cents par km parcouru. On fait l'hypothèse que le temps d'entrave est égal au temps d'interruption de service. Cette dernière hypothèse a, donc, tendance à sous-estimer les coûts liés à la congestion.

⁴⁰ Source :

https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur_la_route/Couts_utilisation/2013_CAA_Driving_Costs_French.pdf

5. ÉVALUATION DES COÛTS INDIRECTS SPÉCIFIQUES EN CAS D'INTERRUPTION DU SERVICE INTERNET

Les coûts pris en considération sont l'ensemble des activités économiques auxquelles internet contribue :

- les transactions ne pouvant pas avoir lieu et
- l'arrêt ou le ralentissement de la production.

Les estimations sont faites en utilisant la part du produit intérieur brut attribuable à internet. L'apport d'internet dans le produit intérieur brut canadien est estimé à 2,7% selon une étude du McKinsey Global Institute (Pélissier du Rausas et al., 2011). On considère que ce coût est uniformément distribué dans le temps (méthode du taux horaire du PIB de Cromwell & Pearson (2002)). L'hypothèse est que pour tous les bris d'infrastructures de télécommunication, gazières et électriques qui entraînent des interruptions de service, on considère des coûts liés aux interruptions de service internet⁴¹. La proportion de l'économie touchée est approximée grâce au nombre de consommateurs d'électricité qui auraient été affectés en cas de bris électrique. L'estimation de la proportion des clients affectés par l'interruption du service électrique a été effectuée grâce à l'une des études de cas et ajustée pour chaque bris pour tenir compte de la densité de population.

Nous obtenons ainsi la formule suivante pour l'estimation des coûts d'interruption du service Internet :

$$C_I(h_i) = 0,027 \frac{PIB_t}{(24 \cdot 365)} h_i \left(\frac{N_k}{N_T} \right)$$

Où :

N_k \equiv Nombre total de clients de la région affectés par l'interruption de service

N_T \equiv Nombre total de clients HydroQuébec

PIB_t \equiv Produit intérieur brut du Québec à l'année de l'estimation

Il est important de noter que la méthode utilisée pour l'estimation des coûts indirects des interruptions du service des télécommunications est statique. Il est donc assumé qu'il n'y a pas de conséquences dynamiques (e.g. impact sur la réputation et donc perte subséquente de clients). Il s'agit d'une des limitations de la méthode qui estime ces coûts.

⁴¹ Le service téléphonique est ignoré, car internet peut souvent agir en tant que substitut du téléphone (e.g. communications, transactions) et englobe également davantage de services que celui-ci. Cette hypothèse peut entraîner une surestimation si elle n'est pas vérifiée. Les données disponibles ne permettent pas de procéder à une vérification.



**CHAPITRE 4 : ESTIMATION DES COÛTS
INDIRECTS TOTAUX DES BRIS
D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES EN 2014
ET IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX
FACTEURS EXPLICATIFS DES BRIS**

1. ESTIMATION DES COÛTS INDIRECTS TOTAUX DES BRIS D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES AU QUÉBEC POUR L'ANNÉE 2014

Afin d'estimer les coûts indirects de tous les bris d'infrastructures causés par des tiers au Québec en 2014, les informations de la base de données ORDI ont été regroupées et analysées en fonction de la méthodologie présentée précédemment. L'estimation s'est faite en deux étapes :

Étape 1 :

Les 1 198 cas de bris d'infrastructures causés par des tiers recensés en 2014 ont été regroupés en 4 catégories (ces catégories reflètent celles renseignées dans la base de données ORDI) :

- Les bris sur des infrastructures électriques
- Les bris sur des infrastructures gazières
- Les bris sur des infrastructures de télécommunication
- Les bris sur des infrastructures publiques diverses (canalisations, etc.).

Étape 2 :

En utilisant la méthode décrite précédemment, nous avons estimé que les bris d'infrastructures souterraines au Québec en 2014 étaient à l'origine d'un coût indirect annuel total minimum d'environ 125 millions de dollars.

Pour l'ensemble du Québec, les coûts indirects estimés sont donc équivalents à 0,38% du PIB du secteur de la construction

Tous les calculs ont été faits à partir de la base de données ORDI, où les différents intervenants peuvent enregistrer en ligne de l'information relative à un événement afférant à une infrastructure souterraine (dommage ou quasi-dommage). Cette base de données appelée DIRT (Damage Information Reporting Tool), en français ORDI (Outil de rapport sur les dommages aux infrastructures), a été créée en 2003 pour la Common Ground Alliance (CGA) et est gérée par Info-Excavation au Québec. Elle a été complétée à l'aide d'autres sources par des données telles que :

- le nombre estimé de clients d'Hydro-Québec touchés,
- la densité de la population de la ville dans laquelle a eu lieu le bris,
- le salaire moyen par région,
- le prix moyen de l'essence par région et par mois.

Ainsi, nous avons calibré les différentes fonctions de calcul de coûts en fonction de chaque zone géographique analysé (région ou ville).

Malgré la baisse dans le nombre absolu de bris par rapport à 2013, les bris d'infrastructures gazières et les bris d'infrastructures électriques, c'est-à-dire ceux dont les coûts sont les plus élevés en moyenne, ont tout de même connu des augmentations.

Tableau 44 : Variation du taux de bris entre 2014 et 2013 par type infrastructure endommagée

Type de bris	Taux de variation du nombre de bris
Infrastructures électriques	21,13%
Infrastructures gazières	12,65%
Infrastructures de télécommunication	-16,86%
Infrastructures publiques diverses (canalisations, etc.)	-3,95%
Total	-4,0%

Les coûts totaux des bris d'infrastructures avaient été estimés à plus de 75 millions pour 2012 et 2013. Compte tenu que nous avons utilisé pour 2014 une nouvelle méthodologie qui a permis de raffiner le calcul des coûts indirects, on ne peut pas comparer directement le montant de 2014 aux montants de 2012 et 2013. Si nous avions utilisé la nouvelle méthodologie pour les années antérieures, les couts totaux indirects auraient vraisemblablement été estimés autour de 100M\$.

Il est très important de souligner que ce chiffre est conservateur et pourrait être beaucoup plus élevé si l'on tient compte des aspects suivants :

- Cette estimation ne considère que les bris d'infrastructures causés par des tiers puisque ce sont ces données qui se retrouvent dans la base de données ORDI. Si l'on avait accès à des données sur le nombre de bris d'infrastructures total (causés par des tiers et autres), le montant estimé pour le Québec serait bien plus important.

- Les bris sont rapportés sur une base volontaire à la base de données ORDI, ce qui donne un portrait partiel de la réalité.
- Toutes les estimations effectuées sont basées sur les coûts pour un bris moyen alors il n'est toutefois pas exclu qu'un événement majeur se soit produit (e.g. perte d'un produit de très grande valeur, arrêt d'un service névralgique), avec des conséquences beaucoup plus importantes que celles considérées dans l'évaluation globale. Or nous avons pu constater dans l'étude de cas qu'un bris majeur d'infrastructure d'eau peut avoir des coûts très importants⁴².
- Les coûts indirects évalués ne prennent pas en compte certains aspects tels que l'impact d'un bris sur la réputation du propriétaire de l'infrastructure touchée ou encore la perte de vie humaine ou les blessures associées.
- Nous n'avons pas de données sur la présence de sites sensibles à proximité des bris (tels que hôpitaux, aéroports, usines, etc.). La proximité d'un bris avec de tels sites ne ferait qu'augmenter les conséquences du bris et occasionneraient nécessairement des coûts indirects beaucoup plus élevés.

Compte tenu de l'ensemble de ces limites, il est fort possible que le montant de 125 millions de dollars associé au coût indirect total des bris d'infrastructures souterraines causés par un tiers au Québec pour 2014 soit en réalité beaucoup plus élevé.

Après avoir fait cet exercice d'évaluation des coûts indirects annuels totaux liés aux bris d'infrastructures pour le Québec, nous pouvons émettre certaines recommandations au sujet de la base de données ORDI :

- Les champs du formulaire de déclaration de bris sont très nombreux et couvrent une grande partie des données importantes, toutefois, il serait souhaitable que l'ensemble de ces champs soit rempli plus systématiquement. On constate par exemple, que certains champs ne sont remplis que dans 10% des bris ce qui limite les analyses détaillées ; On pense particulièrement aux variables « Interruption de service » (oui ou non) et « Durée de l'interruption de service ».
- d'autres champs devraient être ajoutés au formulaire de déclaration de bris, incluant mais ne se limitant pas au nombre de clients touchés par l'interruption de service, le temps d'intervention du service de sécurité incendie, une description sommaire de l'environnement du bris (zone résidentiel, urbaine, commercial, industriel, etc.), l'heure à laquelle s'est produit le bris...

⁴² Dans l'étude de cas concernée, les coûts totaux indirects avoisinaient les 1,7 millions de dollars.

2. ANALYSE DES BASES DE DONNÉES POUR IDENTIFIER LES PRINCIPAUX FACTEURS EXPLICATIFS DES BRIS : VERS UNE PRÉVENTION PLUS EFFICACE

En analysant les demandes de localisation suivies d'un bris, cela nous permet de mieux comprendre les facteurs expliquant les bris alors même qu'il y a eu une demande de localisation d'effectuée et ainsi mieux cibler les activités de prévention afin qu'elles donnent le plus de bénéfices possibles.

Pour ce faire, nous avons réalisé une importante agrégation de données : pour les années 2011 à 2013, la base de données des demandes de localisation a été fusionnée à celle des bris rapportés (ORDI), à l'aide des identifiants uniques reliant les demandes aux bris. Ce processus nous a permis de croiser 1741 bris issus de la base ORDI avec la base de donnée des demandes de localisation d'Info-Excavation, soit environ 65% des bris précédés par une demande de localisation entre 2011 et 2013. Ensuite, des données météorologiques (Température, Pression atmosphérique, Humidité relative, Vitesse du vent, etc.) et sismiques ont été compilées puis intégrées à la base de données afin d'explorer leurs éventuels effets sur les bris étudiés. La nouvelle base de données intégrée contient plus de 500 000 observations.

Nous présentons ici quelques résultats intéressants issus de l'analyse de cette nouvelle base de données.

La majorité des bris (70%) surviennent dans une zone de travaux où il y a 4 infrastructures ou moins. C'est par ailleurs en présence de 4 infrastructures souterraines que plus du cinquième de tous les bris surviennent.

Les travaux de type « égouts et aqueducs » sont à l'origine de 36% des demandes suivies par un bris et pourtant ils ne concernent que 20% du total des demandes de localisation. À l'inverse les travaux de type « Rues est routes » qui compte pour 22% du total des demandes de localisation ne sont à l'origine que de 10% des demandes suivies par un bris.

La méthodologie d'évaluation des coûts indirects des bris d'infrastructures souterraines pour l'année 2014 a mis en évidence l'impact significatif de la durée d'interruption de service électrique sur les coûts. En outre, et comme montré par les diagrammes de boîtes ci-dessous, il y a une forte variance dans le nombre d'heures d'interruption de service, notamment dans les bris affectant les infrastructures électriques et gazières.

Il paraît donc pertinent d'explorer ce qui caractérise les bris dont la durée d'interruption est considérée comme anormale (5 heures et plus). Ces bris ont un coût médian de 241 000\$ et un coût moyen de 841 000\$ tandis que pour l'ensemble des bris, le coût médian est de 8 800\$ et le coût moyen de 81 000\$. Bien que ces bris ne représentent que 3,5% du nombre total des bris, ils sont responsables de 37% des coûts indirects. En utilisant des modèles d'arbres décisionnels, on peut constater que les bris d'infrastructures électriques dont l'interruption est de longue durée ont majoritairement lieu dans les municipalités dont la densité de population est inférieure à mille habitants par kilomètre carré. Dans le cas de bris d'infrastructures gazières, les bris qui occasionnent des interruptions de services de plus de 5 heures sont surtout causés par des travaux touchant aux égouts et aqueducs.

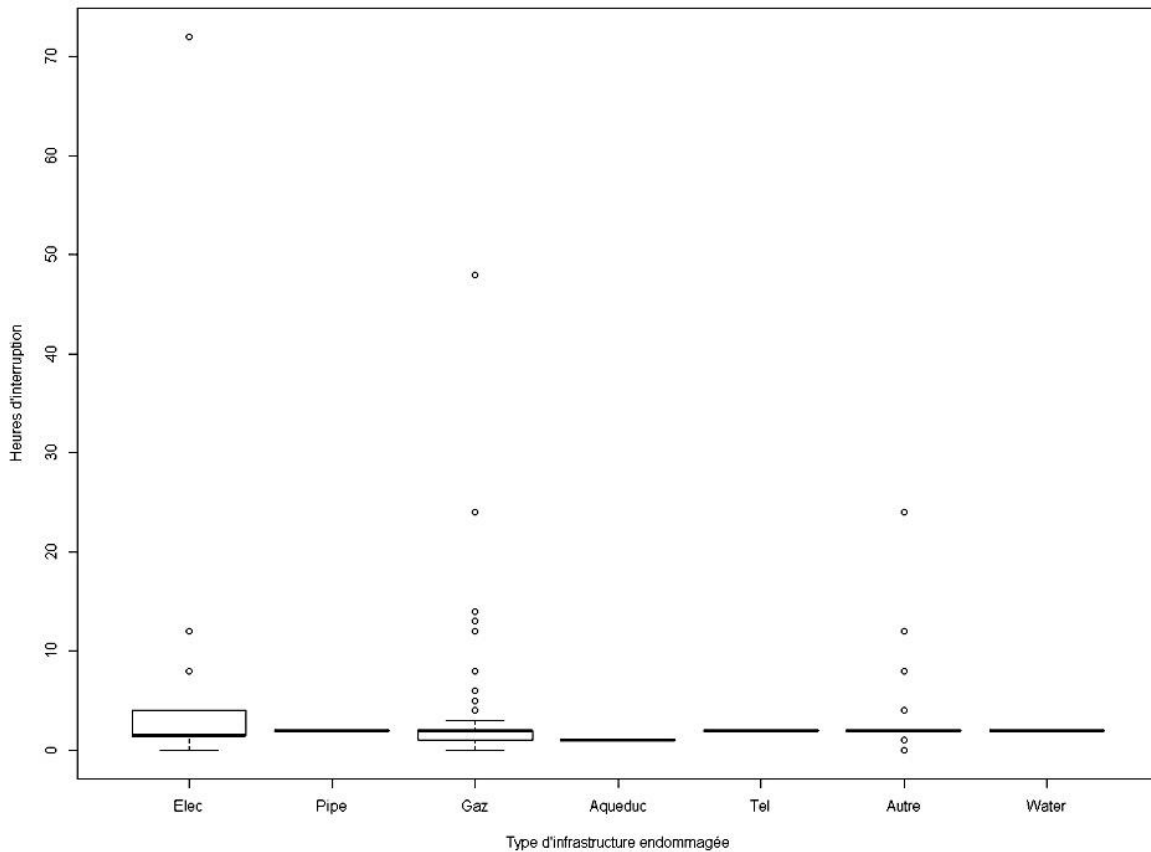


Figure 22 : Variance du nombre d'heures d'interruption en 2014 selon le type d'infrastructure souterraine endommagée

Afin de compléter ce constat et surtout mieux expliquer comment prédire une interruption à durée anormalement élevée afin de limiter les coûts indirects qui en découlent, nous avons utilisé un modèle d'arbres décisionnels.

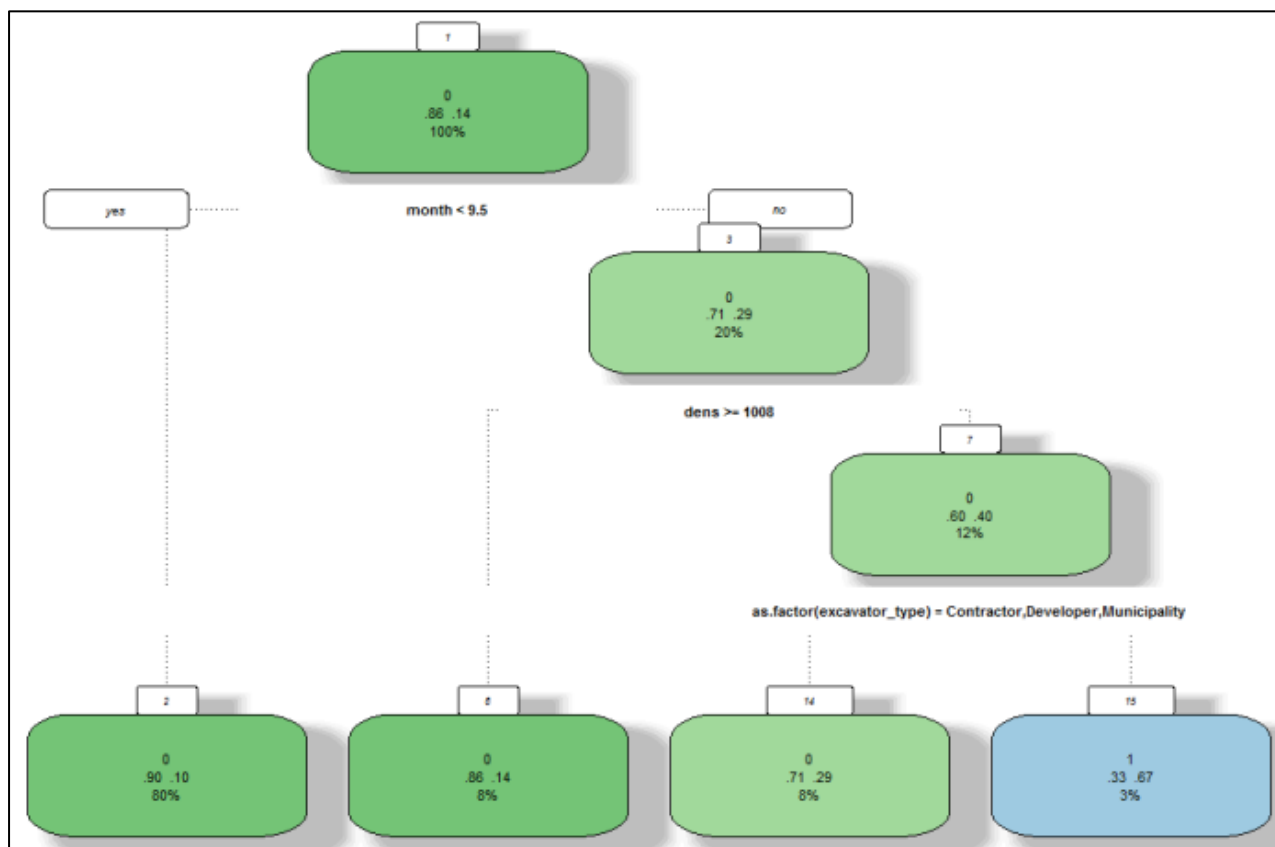


Figure 23 : Prédiction d'un bris d'infrastructure électrique avec une interruption >5h par la méthode des arbres décisionnels

Le diagramme, ci-haut, montre que les bris d'infrastructures dont l'interruption affiche une durée anormalement élevée (au moins cinq heures) ont le profil suivant:

- Ils sont plus fréquents dans le dernier trimestre de l'année
- L'incidence est plus élevée dans les municipalités dont la densité de la population est inférieure à 1008 (i.e. les grands centres urbains sont exclus).
- Les catégories « Entrepreneur », « Municipalité » et « Promoteur » sont les plus souvent fautives. Ce n'est pas surprenant pour les deux premières étant donné que la majorité des travaux sont effectués par ces deux instances. Pour la catégorie « Promoteur » il n'y a pas assez d'observations pour que ce soit jugé significatif.


DISCUSSIONS ET CONCLUSION

Ce rapport a permis de faire un portrait des coûts totaux liés aux bris d'infrastructures souterraines au Québec. Les études d'Ormsby, (2009), de Rahman, et al., (2005), de Gilchrist & Allouche, (2005) et de Allouche, et al., (2000) nous ont aidé dans un premier temps à 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, telles que Manuilova, et al., (2009), Pélissier du Rausas et al. (2011), Rylska, et al., (2006), Sullivan et al. (2015) et LaCommare & Eto, (2006), nous avons expliqué et défini chaque facteur de coût direct et indirect lié à des bris d'infrastructures souterraines, ainsi qu'énoncé un certain nombre de méthodes d'estimation de ces coûts. Ces méthodes de calcul ont été utilisées tout au long des études de cas.

Nous avons par la suite présenté 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 quatre études de cas ont permis d'illustrer de nombreux facteurs de coûts indirects liés aux bris d'infrastructures souterraines et l'importance que ceux-ci représentent dans les coûts totaux. Nous avons pu constater que selon le type de bris considéré, son importance ainsi que sa localisation, le ratio coûts directs sur coûts indirects pouvait varier.

Afin d'avoir un portrait complet de la situation au Québec et de compléter les études de cas, nous avons développé une méthodologie rigoureuse pour évaluer les coûts annuels indirects totaux liés aux bris. La méthode prend en considération 4 grandes catégories de coûts : les coûts d'interruption du service électrique, les coûts d'interruption du service Internet, les coûts de déploiement des services d'urgence et les coûts de congestion.

Nous avons estimé pour 2014 que les bris d'infrastructures souterraines au Québec étaient à l'origine d'un coût indirect total d'environ 125 millions de dollars. Il est très important de souligner que ce chiffre est conservateur et pourrait être beaucoup plus élevé. Tout d'abord, cette estimation est basée sur les bris recensés dans la base de données ORDI sur une base volontaire, ce qui donne un portrait partiel de la réalité. Comme nous l'avons signalé précédemment, ce chiffre reste conservateur et ne prend pas en compte un certain nombre de paramètres, tels que les événements de grande envergure, les bris non causés par des tiers, les coûts liés à la perte de réputation de l'entreprise propriétaire d'infrastructure souterraine, les coûts liés aux retards dans les travaux pour les entrepreneurs, etc. Il faut signaler aussi 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.

De l'importance de la prévention...

L'évaluation réalisée des coûts réels des bris d'infrastructures souterraines causés par des tiers au Québec peut permettre :

- (1)** d'appuyer l'importance de la prévention et de justifier par conséquent certains investissements en prévention et en formation sur les bonnes pratiques pour les ingénieurs qui planifient les projets, les donneurs d'ouvrage (dont les municipalités) et les entrepreneurs;
- (2)** d'aider les décideurs publics concernant l'allocation des ressources pour les services de prévention des bris et le maintien d'un réseau de qualité ;
- (3)** d'évaluer la pertinence de mettre en place des partenariats (par ex, avec les assureurs ou avec d'autres intervenants en mesures d'urgence).

En effet, les résultats de notre recherche vont aussi permettre d'aider tous les intervenants du domaine (les municipalités, les services incendies, Info-Excavation, les compagnies propriétaires des infrastructures, les entrepreneurs, etc.) à estimer les risques réels des projets incluant des travaux d'excavation et, par conséquent, identifier les pistes d'actions afin de diminuer les bris au Québec, les coûts socio-économiques liés ainsi que les risques pour la sécurité des travailleurs et du public.

L'évaluation réalisée des coûts réels des bris d'infrastructures souterraines non causés par des tiers au Québec, quant à elle, peut permettre d'aider les décisions publiques concernant l'allocation des ressources pour les services de prévention des bris et le maintien d'un réseau de qualité.

L'estimation économique des coûts indirects totaux conjuguée à l'aspect santé-sécurité montre l'importance que représente la prévention, se matérialisant entre autre par un appel systématique à Info-Excavation avant tout travail de creusage ou encore par l'utilisation de bonnes pratiques d'excavation.

RECOMMANDATIONS

Compte tenu de l'ensemble des constats et résultats de notre recherche, nous pouvons émettre des recommandations pour les différents acteurs intervenant lors d'un bris d'infrastructure :

POUR LES ENTREPRISES OU LES PARTICULIERS FAISANT DES TRAVAUX D'EXCAVATION :

- Il faudrait que les entreprises d'excavation suivent des formations en prévention des dommages et connaissent les guides à leur disposition sur les bonnes pratiques d'excavation.
- Il serait important de rendre obligatoire une demande de localisation auprès d'Info-Excavation avant tout travaux d'excavation au Québec.

POUR LES PROPRIETAIRES D'INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES :

- Il faudrait obliger tout propriétaire d'infrastructures souterraines au Québec à s'enregistrer et à déclarer la localisation de ses réseaux auprès d'Info-Excavation.
- Il faudrait que les propriétaires d'infrastructures souterraines améliorent la qualité de leurs données concernant la localisation de leur réseau souterrain et poursuivent leurs efforts pour répertorier leurs installations.

POUR LES DONNEURS D'OUVRAGES (INCLUANT LES MUNICIPALITES)


- Il faudrait obliger les donneurs d'ouvrages à faire une demande de plan auprès d'Info-Excavation avant la rédaction des documents d'appel d'offre afin que les estimés initiaux soient plus précis et que les plans et devis soient plus détaillés en terme de contraintes de creusage pour les entreprises qui vont soumissionner.
- Il faudrait que les donneurs d'ouvrage incluent dans leurs appels d'offres une clause obligeant à faire une demande de localisation auprès d'Info-Excavation avant tout travaux d'excavation.

POUR LES MUNICIPALITES

- Les municipalités devraient utiliser les résultats de cette étude afin de les intégrer dans leur prise de décision pour la planification de la maintenance de leurs réseaux souterrains.

POUR LES RESPONSABLES DE LA BASE DE DONNEE ORDI

- L'heure de début de l'incident devrait être ajoutée à la base ORDI afin de réduire les erreurs et donc d'améliorer l'estimation des coûts de la congestion routière, étant donné que la quantité de voitures sur les routes varie grandement selon la période de la journée.
- De nouvelles informations sur la localisation géographique de l'incident, telles que le nom de la rue, le code postale, voire la géolocalisation à partir d'une application



mobile, permettraient d'identifier les bris à proximité de structures névralgiques (e.g. hôpitaux, aéroports, ports) et donc d'augmenter les chances d'identifier des bris causant des coûts important attribuables à la perturbation de ces structures. Dans le même but, l'adresse civique, déjà présente dans le formulaire servant à rapporter un incident, ne devrait plus être facultative. La base de données actuelle n'a permis de géolocaliser que 78% des bris grâce à un outil développé par CIRANO.

POUR LES ACTEURS QUI ALIMENTENT DE FAÇON VOLONTAIRE LA BASE DE DONNEE ORDI

- Il est important de mieux documenter la base de données ORDI en particulier en ce qui concerne les variables «interruption de service» et «nombre d'heure d'interruption de service » afin de pouvoir évaluer le plus justement possible les coûts indirects annuels totaux. En effet, avec des données de haute qualité au sujet des bris, l'évaluation ne pourrait en être que plus juste.


BIBLIOGRAPHIE

- Allouche, E., Ariaratnam, S., & AbouRizk, S. (2000). *Multi-Dimensional Utility Model for Selection of a Trenchless Construction Method*.
- 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*
- Arudi, R., Pickering, B., and Flading, J. (2000) "Planning and Implementation of a Management System for Utility Cuts." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*"
- Boyce, G., & Bried, E. (1994). Benefit–cost analysis of microtunneling in an urban area. *Proceedings of North American No-Dig, 94*.
- Bryden, J., E, Laurel, B., A., and 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*
- Button, K. (1994) *Overview of Internalising the Social Costs of Transport*.
- CAA. (2013). Coût d'utilisation d'une automobile.
https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur_la_route/Couts_utilisation/2013_CAA_Driving_Costs_French.pdf
- Consommation d'essence en fonction de vitesse et rapport. (2013).
- Convention collective des employés de l'Université de Montréal entre 2006 et 2014.
- Cromwell, J. E., & Pearson, N. (2002). *Costs of infrastructure failure: Amer Water Works Assn*.
- Emery, J., J., and ohnson, TH. (1987). "*Influence of Utility Cuts on Urban Pavement Performance*."
- Enquête origine destination 2011. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/salle-de-presse/nouvelles/Documents/enquete-origine-destination-2011.pdf>
- Enquête origine destination 2013. Faits saillants.
<https://www.amt.qc.ca/Media/Default/pdf/section8/enquete-od-2013-faits-saillants.pdf>
- Ferland, Anne-Marie. (2007). Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport. Partie 3 : PARAMÈTRES (Valeurs de 2006). Ministère des Transports du Québec.
- 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.

- Goel, L. and R. Billinton, "Prediction of Customer Load Point Service Reliability Worth Estimates in an Electric Power System," IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution 1994; 141(4): 390-6
- 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., and Jones, C.,N. (2006). *An Analysis of the Direct and Indirect Costs of Utility and Right-of-Way Conflicts on Construction Roadway Projects*.
- 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*.
- Ikpe, E., O., (2009). *Development of Cost Benefit Analysis Model of Accident Prevention on Construction Projects*.
- Info Excavation, (2015), « Rapport 2014 – Outil de rapport sur les dommages aux infrastructures ».
- Jung, Y., J, and Sinha, S., K., (2007). *Evaluation of Trenchless Technology Methods for Municipal Infrastructure System*.
- 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.
- Larson, D.M. (1993). "Separability and the Shadow Value of Leisure Time," *American Journal of Agricultural Economics*, 75, pp. 572-577.

- 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
- 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
- Mouchikhine, Vincent. (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.
- Ormsby, C. M. (2009). A framework for estimating the total cost of buried municipal infrastructure renewal projects.
- Pélissié du Rausas, M., Manyika, J., Hazan, E., Bughin, J., Chui, M. , Said, R., 2011, « Internet matters: The Net's sweeping impact on growth, jobs, and prosperity », Rapport McKinsey Global Institute.
- 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., & Newton, L. (2005). MIIP Report: Social Cost Considerations for Municipal Infrastructure Management.
- Report on the Cost of Asthma in Australia, National Asthma Campaign, 1992.
- RevenuQuébec. (2015). Revenu Québec - TPS/TVH et TVQ.
- RTE. (2012). Quelle valeur attribuer à la qualité de l'électricité ? L'avis des consommateurs. 16.
- 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). *DETERMINING THE EFFECTS OF UTILITY 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. Final Report.*
- Sullivan, M. and D. Keane. *Outage Cost Estimation Guidebook*. Report no. TR-106082. Palo Alto, CA: EPRI; (1995).
- Sullivan, M. G. Mercurio, and J. A. Schellenberg. (2009). "Estimated Value of Service Reliability for Electric Utility Customers in the United States," Lawrence Berkeley National Laboratory Research Project Final Report, Juin.
- Sullivan, M. G., Schellenberg, J. and Blundell, M. (2015). « Updated Value of Service Reliability Estimates for Electric Utility Customers in the United States », Research Project Final Report, Janvier.
- 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., and Haas, R. (1999). "Traffic Delay Cost Savings Associated with Trenchless Technology." *Journal of infrastructure systems* 5, no. 2
- Vilfrant, E., C., (2010). "Analysis of Parameters Affecting Costs of Horizontal Directional Drilling Projects in the United States for Municipal Infrastructure." Paper presented at the Masters Abstracts International.
- 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.*
- 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 1 – Valeurs numériques 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 2 – Durée du temps de parcours supplémentaire dû à la congestion, fonction du temps

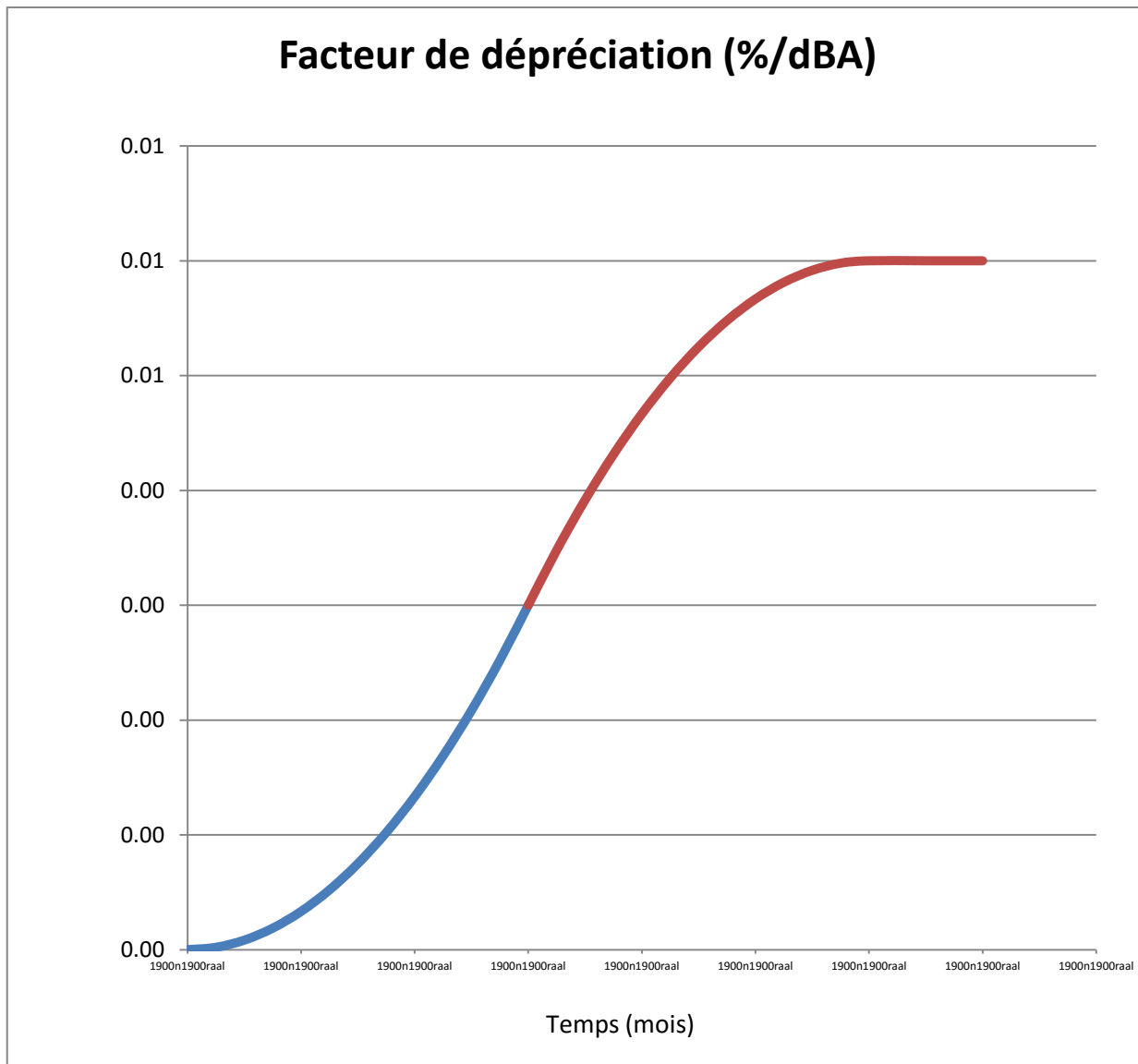
t (jours)	Tc (t) (en minute)	Tdminimum (en minute)
1	8,00	5,00
2	7,65	5,00
3	7,33	5,00
4	7,03	5,00
5	6,75	5,00
6	6,50	5,00
7	6,27	5,00
8	6,06	5,00
9	5,88	5,00
10	5,71	5,00
11	5,56	5,00
12	5,44	5,00
13	5,33	5,00
14	5,24	5,00
15	5,16	5,00
16	5,11	5,00
17	5,06	5,00
18	5,03	5,00
19	5,01	5,00
20	5,00	5,00
21	5,00	5,00
22	5,00	5,00
23	5,00	5,00
24	5,00	5,00

ANNEXE 3 – Évolution du nombre de véhicules perturbés, en 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 4 – Évolution d'un facteur de dépréciation sonore

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



ANNEXE 5 – Ajustement des données de coûts en fonction des années d’estimations passées

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 ajuster et de les convertir afin d’apporter une précision 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 prendrons en compte le « GDP Deflator ». Cet indice permet d’évaluer la valeur d’une devise au cours 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 a été adoptée, l’illustration suivante est proposée.

Exemple

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 :

Coût réel pour un canadien (\$2012)

= Coût initial pour un américain réajusté (\$2002)

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

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

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.