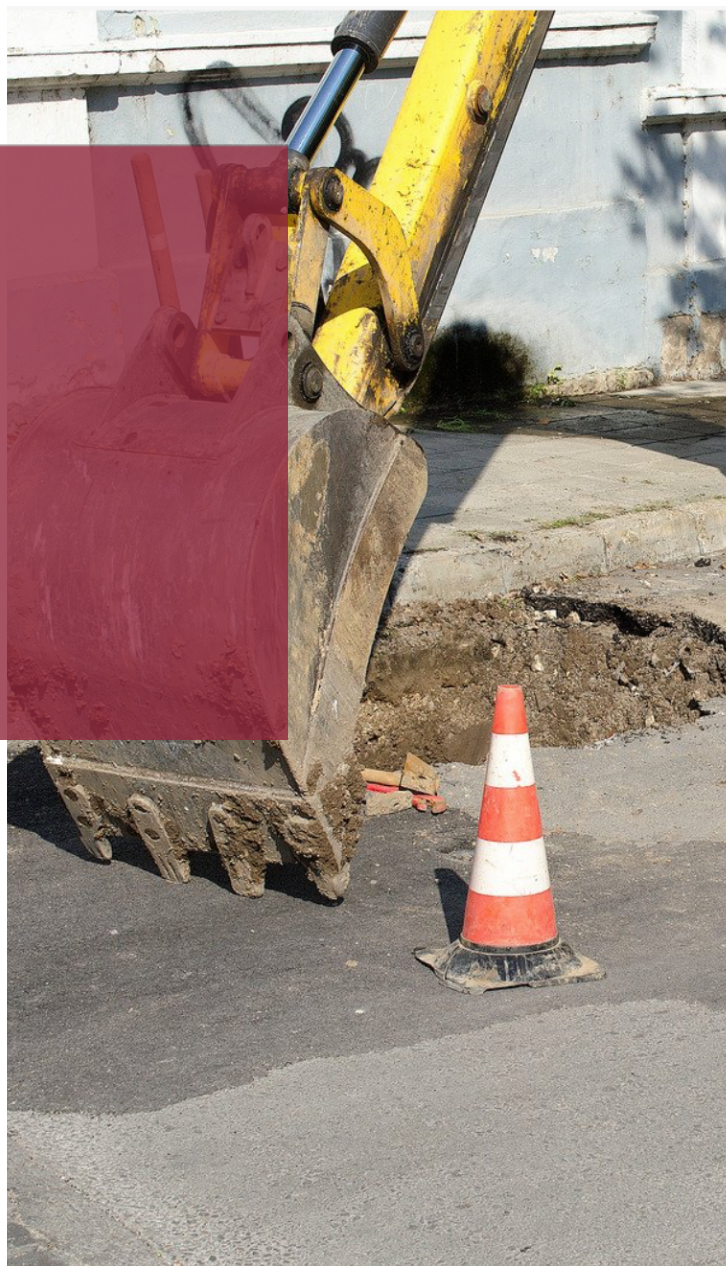


ÉVALUATION DES COÛTS
SOCIO-ÉCONOMIQUES DES
DOMMAGES AUX
INFRASTRUCTURES
SOUTERRAINES AU CANADA

NATHALIE DE MARCELLIS-WARIN
INGRID PEIGNIER



Les rapports de projet sont destinés plus spécifiquement aux partenaires et à un public informé. Ils ne sont ni écrits à des fins de publication dans des revues scientifiques ni destinés à un public spécialisé, mais constituent un médium d'échange entre le monde de la recherche et le monde de la pratique.

Project Reports are specifically targeted to our partners and an informed readership. They are not intended for publication in academic journals nor aimed at a specialized readership, but are rather conceived as a medium of exchange between the research and practice worlds.

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 gouvernement du Québec, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Quebec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the government of Quebec, and grants and research mandates obtained by its research teams.

Les partenaires du CIRANO – CIRANO Partners

Partenaires Corporatifs - Corporate Partners

Autorité des marchés financiers
Banque de développement du Canada
Banque du Canada
Banque Nationale du Canada
Bell Canada
BMO Groupe financier
La Caisse
Énergir
Hydro-Québec
Intact Corporation Financière
Mouvement Desjardins
Power Corporation du Canada
Pratt & Whitney Canada
VIA Rail Canada

Partenaires gouvernementaux - Governmental partners

Ministère des Finances du Québec
Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie
Innovation, Sciences et Développement Économique Canada
Ville de Montréal

Partenaires universitaires - University Partners

École de technologie supérieure
École nationale d'administration publique
HEC Montréal
Institut national de la recherche scientifique
Polytechnique Montréal
Université Concordia
Université de Montréal
Université de Sherbrooke
Université du Québec
Université du Québec à Montréal
Université Laval
Université McGill

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web.
CIRANO collaborates with many centres and university research chairs; list available on its website.

© Mars 2026. Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier. Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©. *Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*

Les idées et les opinions émises dans cette publication sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas les positions du CIRANO ou de ses partenaires. *The observations and viewpoints expressed in this publication are the sole responsibility of the authors; they do not represent the positions of CIRANO or its partners.*

Évaluation des coûts socio-économiques des dommages aux infrastructures souterraines au Canada

Nathalie de Marcellis-Warin^{}, Ingrid Peignier[†]*

Résumé

Ce rapport présente la refonte complète de l'outil d'estimation des coûts socio-économiques des dommages aux infrastructures souterraines au Canada, développé initialement par le CIRANO en 2015. La version 2026 élargit la couverture géographique à l'ensemble des provinces canadiennes, enrichit le cadre d'estimation avec quatre nouvelles catégories de coûts (accidents routiers supplémentaires évités, évacuation, interruption du service d'eau, dommages matériels liés aux bris de conduites d'aqueduc), actualise les méthodologies existantes et surtout affine l'ensemble des calculs à l'échelle de la subdivision de recensement (environ 4 000 zones locales). L'outil traite les données de la base ORDI, une base de données des dommages aux infrastructures causés par des tiers remplie par les propriétaires d'infrastructures sur une base volontaire. L'outil estime huit catégories de coûts indirects en fonction du type d'infrastructure endommagée, de la localisation géographique et de la magnitude du bris.

Appliqué aux données québécoises de 2023 à 2025, l'outil estime des coûts indirects annuels variant entre 36 et 47 millions de dollars. Ces estimations demeurent toutefois conservatrices en raison de certaines limites inhérentes à la base de données sur les dommages. Elles fournissent néanmoins des ordres de grandeur solides pour éclairer les stratégies de prévention et soutenir une prise de décision fondée sur les données.

Abstract

This study presents a complete redesign of the tool used to estimate the socio-economic costs associated with damage to underground infrastructure in Canada, originally developed by CIRANO in 2015. The 2026 version expands the geographical coverage to all Canadian provinces, enhances the estimation framework by incorporating four new cost categories (additional road accidents avoided, evacuation, water service interruptions, and property damage resulting from water main breaks), updates the existing methodologies, and refines all calculations at the census subdivision level (approximately 4,000 local areas).

^{*}Professeure titulaire au Département de mathématiques et de génie industriel, Polytechnique Montréal, présidente directrice générale du CIRANO, chercheuse et Fellow CIRANO

[†]Directrice principale des partenariats et de la valorisation de la recherche et directrice de projets, CIRANO

The tool processes data from the DIRT database, a voluntary reporting system in which infrastructure owners record damages caused by third parties. It estimates eight categories of indirect costs depending on the type of infrastructure affected, the geographical location, and the magnitude of the incident.

Applied to Quebec data from 2023 to 2025, the tool estimates annual indirect costs ranging from 36 to 47 million Canadian dollars. These estimates remain conservative due to certain inherent limitations of the damage database. Nonetheless, they provide robust orders of magnitude to inform prevention strategies and support data-driven decision-making.

Keywords/Mots-clés : Coûts indirects, infrastructures souterraines, dommages, prévention, analyse coûts-avantages, coûts socio-économiques / Indirect costs, Underground infrastructure, Damages, Prevention, Cost-benefit analysis, Socio-economic costs.

To quote this document/Pour citer ce document

De Marcellis-Warin, N. et Peignier, I. (2026). Évaluation des coûts socio-économiques des dommages aux infrastructures souterraines au Canada (Rapport de projet 2026RP-06, CIRANO). <https://doi.org/10.54932/JSPF3432>

REMERCIEMENTS

Les auteures tiennent à remercier les nombreuses personnes et organisations qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Nous souhaitons d'abord exprimer notre sincère gratitude à Marco Lugo, pour le développement et la programmation de l'outil en Rust, ainsi que pour ses connaissances et son expertise en économie qui ont permis d'enrichir et de raffiner plusieurs hypothèses méthodologiques intégrées au modèle.

Nous remercions également Maya Mansour, étudiante au baccalauréat en économie à l'Université de Montréal, pour son travail rigoureux dans la réalisation de la revue de littérature, ainsi que pour l'organisation et la synthèse des nombreux entretiens réalisés dans le cadre du projet.

Nous sommes aussi reconnaissants envers le relecteur du comité scientifique du CIRANO, pour sa relecture scientifique attentive et ses commentaires éclairants, qui ont contribué à renforcer la rigueur du rapport et les hypothèses de l'outil.

Nous remercions chaleureusement les membres du Canadian Common Ground Alliance (CCGA) ainsi que leurs partenaires régionaux, qui ont accepté de participer aux entretiens et de partager leurs données, leurs connaissances opérationnelles et leur expérience de terrain. Leur contribution a été essentielle pour ancrer les hypothèses de l'outil dans les réalités pratiques du terrain.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble des parties prenantes rencontrées dans le cadre de ce projet — propriétaires d'infrastructures, municipalités, organisations de sécurité publique et autres experts du domaine — pour la générosité avec laquelle ils ont partagé leur temps, leurs informations et leurs perspectives.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE.....	4
2	QUATRE AMÉLIORATIONS CLÉS DANS LA VERSION 2026	5
2.1	UN PÉRIMÈTRE GÉOGRAPHIQUE ÉLARGI À L'ENSEMBLE DU CANADA.....	5
2.2	BONIFICATION DU SPECTRE DES COÛTS ET ACTUALISATION DES MÉTHODES D'ESTIMATION	5
2.3	DES MÉTHODES DE CALCUL PLUS GRANULAIRES.....	5
2.4	UNE CLASSIFICATION DES DOMMAGES SELON TROIS NIVEAUX DE GRAVITÉ	6
3	MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	6
3.1	REVUE DE LITTÉRATURE	6
3.2	ENTRETIENS AVEC LES PARTIES PRENANTES	7
4	LES INTRANTS ET PARAMÈTRES DE L'OUTIL	8
4.1	DONNÉES D'ENTRÉE : LA BASE ORDI	8
4.2	PARAMÈTRES DE L'OUTIL	8
4.2.1	Géolocalisation.....	8
4.2.2	Classification des services d'urgence.....	9
4.2.3	Données externes dynamiques : parc automobile, carburant et inflation	10
4.2.4	Traitement des données manquantes	10
5	REVUE DÉTAILLÉE DES GRANDES CATÉGORIES DE COÛTS.....	13
5.1	COÛTS D'INTERRUPTION DU SERVICE ÉLECTRIQUE	13
5.1.1	Champs d'application	13
5.1.2	Cadre méthodologique : Interruption Cost Estimate 2.1.0	13
5.1.3	Variables et méthodologie de calcul.....	14
5.2	COÛTS D'INTERRUPTION DU SERVICE INTERNET	16
5.2.1	Champs d'application.....	16
5.2.2	Variables et méthodologie de calcul.....	16
5.3	COÛTS D'INTERRUPTION DU SERVICE D'EAU	17
5.3.1	Champs d'application.....	17
5.3.2	Variables et méthodologie de calcul.....	17
5.3.3	Périmètre géographique et pondération.....	19
5.4	COÛTS DE LA CONGESTION ROUTIÈRE	19
5.4.1	Champs d'application et hypothèses clés	19
5.4.2	Variables et méthodologie de calcul.....	20
5.5	COÛTS DES ACCIDENTS ROUTIERS SUPPLÉMENTAIRES ÉVITÉS.....	24
5.5.1	Champs d'application	24
5.5.2	Variables et méthodologie de calcul.....	24
5.6	COÛTS DES ÉVACUATIONS	25
5.6.1	Champs d'application	25
5.6.2	Variables et méthodologie de calcul.....	25
5.7	COÛTS RELIÉS AU DÉPLOIEMENT DES SERVICES D'URGENCE	26

5.7.1	<i>Champs d'application</i>	26
5.7.2	<i>Variables et méthodologie de calcul</i>	26
5.8	COÛTS DES DOMMAGES MATÉRIELS LIÉS AUX BRIS DE CONDUITES D'AQUEDUC	27
5.8.1	<i>Champs d'application</i>	27
5.8.2	<i>Variables et méthodologie de calcul</i>	27
5.9	CATÉGORIES DE COÛTS INDIRECTS CONSIDÉRÉS SELON LE TYPE D'INFRASTRUCTURE TOUCHÉE.....	28
6	RÉSULTATS ET ANALYSE DES COÛTS INDIRECTS ESTIMÉS POUR LE QUÉBEC (2023–2025)	29
6.1	VOLUME ET RÉPARTITION DES INCIDENTS	29
6.2	COÛTS INDIRECTS TOTAUX ESTIMÉS	30
7	PORTÉE, LIMITES ET VALEUR STRATÉGIQUE DE L'OUTIL	31
7.1	DES ESTIMATIONS PRÉCISES, MAIS CONSERVATRICES.....	31
7.2	LA QUALITÉ DES DONNÉES ORDI : LE PRINCIPAL DÉFI	32
7.3	VALEUR STRATÉGIQUE POUR LES PARTIES PRENANTES ET LES DÉCIDEURS	34
8	RÉFÉRENCES	36

1 Introduction et mise en contexte

Les dommages aux infrastructures souterraines — conduites de gaz naturel, câbles électriques, réseaux de télécommunications, conduites d'eau et d'égouts — génèrent des coûts qui vont bien au-delà de la simple facture de réparation. Ces coûts dits « cachés », ou coûts indirects, représentent l'ensemble des perturbations économiques et sociales subies par les ménages, les entreprises et la collectivité à la suite d'un bris : pannes d'électricité, interruptions d'Internet, évacuations, congestion routière, interventions des services d'urgence, dommages aux infrastructures d'eau. Malgré les progrès importants réalisés au Canada en matière de prévention, les bris causés par des tiers demeurent fréquents et continuent de générer des impacts considérables pour la société. Or, ces impacts sont encore largement sous-estimés : les évaluations disponibles se concentrent principalement sur les coûts directs de réparation, sans tenir compte des conséquences socio-économiques bien plus larges.

C'est dans ce contexte que le CIRANO avait développé, en 2015, un premier outil d'estimation des coûts indirects des bris d'infrastructures souterraines, initialement conçu pour le Québec. Dix ans plus tard, l'évolution du contexte économique, la disponibilité de nouvelles données à granularité fine et l'identification de nouvelles catégories de coûts pertinentes ont conduit à une refonte complète de l'outil.

Il importe de préciser que les coûts directs — soit les dépenses de réparation telles que les matériaux et la mobilisation des techniciens — ne font pas l'objet de cet outil. Ce dernier se concentre exclusivement sur les **coûts indirects**, définis comme l'évaluation économique de l'ensemble des perturbations associées aux dommages aux infrastructures souterraines, selon la formule suivante :

Coût total (CT) = Coûts directs (CD) + Coûts indirects (CI)

L'objectif fondamental du projet est de rendre ces coûts cachés visibles et mesurables, afin que les efforts de prévention des dommages puissent s'appuyer sur des données probantes et solides et non sur une vision partielle qui ne reflète qu'une fraction de l'impact réel des bris.

Le présent rapport est organisé comme suit. La section 2 présente les quatre améliorations majeures qui distinguent la version 2026 de la version originale. La section 3 décrit la méthodologie générale ayant guidé la refonte, incluant la revue de littérature et les entretiens avec les parties prenantes. La section 4 détaille les données d'entrée et les paramètres de l'outil, notamment la gestion de la géolocalisation et des données manquantes. La section 5 constitue le cœur

méthodologique du rapport : elle présente en détail les huit catégories de coûts indirects estimées par l'outil, leurs champs d'application respectifs et les formules de calcul retenues. La section 6 illustre les capacités de l'outil à travers une application aux données québécoises de 2023 à 2025, en analysant l'évolution des coûts indirects sur cette période. Enfin, la section 7 discute de la portée et des limites de l'outil, en particulier le rôle central de la qualité des données de l'outil de rapport sur les dommages aux infrastructures souterraines (ORDI), avant de conclure sur la valeur stratégique de l'outil pour les parties prenantes et les décideurs.

2 Quatre améliorations clés dans la version 2026

La refonte de l'outil en 2026 s'appuie sur quatre améliorations majeures. Leur présence le distingue fondamentalement de la version originale développée dix ans plus tôt.

2.1 Un périmètre géographique élargi à l'ensemble du Canada

La version 2015 de l'outil ne couvrait qu'un nombre limité de provinces. La version 2026 intègre désormais des données régionales spécifiques pour l'ensemble des provinces canadiennes, de la Colombie-Britannique aux provinces atlantiques. Chaque province dispose de ses propres paramètres économiques, ce qui permet de produire des estimations adaptées aux réalités locales plutôt que de recourir à des valeurs nationales moyennes.

2.2 Bonification du spectre des coûts et actualisation des méthodes d'estimation

Sur le plan des catégories de coûts, la version 2026 comprend deux changements. D'une part, quatre nouvelles catégories de coûts ont été ajoutées : les coûts évités des accidents de la route, les coûts d'évacuation, les coûts d'interruption du service d'eau et les coûts de dommages aux infrastructures liés aux bris de conduites d'eau. Ces catégories, absentes du modèle initial, permettent de capturer des impacts socio-économiques réels jusqu'alors ignorés. D'autre part, les méthodologies de quatre catégories existantes ont été entièrement révisées à la lumière des meilleures pratiques actuelles et de la littérature : la congestion routière, l'intervention des services d'urgence, l'interruption du service électrique et l'interruption du service Internet.

2.3 Des méthodes de calcul plus granulaires

La version 2026 introduit une granularité géographique nettement supérieure. Les calculs de coûts tiennent désormais compte de l'environnement local de chaque incident en descendant jusqu'au niveau de la subdivision de recensement de

Statistique Canada, soit environ 4 000 zones locales à l'échelle du pays. Cette approche permet d'intégrer des données économiques et démographiques précises pour chaque localité — comme la composition de la population locale, la structure industrielle ou le nombre de ménages — plutôt que d'utiliser des données agrégées au niveau provincial. Les résultats sont ainsi bien plus réalistes et localement ancrés.

2.4 Une classification des dommages selon trois niveaux de gravité

Enfin, la version 2026 introduit une classification formelle des bris en trois niveaux de magnitude, fondée sur le type d'infrastructure affectée :

- les incidents mineurs (sur des infrastructures de service/branchement) : l'impact est localisé, par exemple un branchement résidentiel
- les incidents modérés (sur des infrastructures de distribution) : l'impact se situe à l'échelle d'un quartier ou d'un réseau de distribution locale
- les incidents majeurs (infrastructures de transport) : ils touchent les réseaux structurants, soit les lignes de transport à haute tension pour l'électricité et les conduites de grand diamètre pour le gaz naturel ou l'eau, entraînant des impacts potentiellement étendus sur le territoire.

Cette gradation permet d'estimer les coûts indirects de manière plus nuancée, en adaptant notamment le rayon d'impact géographique utilisé dans les calculs d'évacuation par exemple, le nombre de clients affectés et les durées d'intervention selon la gravité réelle de l'incident.

Au total, la version 2026 de l'outil est plus large dans son périmètre, plus solide sur le plan méthodologique et mieux adaptée aux réalités régionales — offrant ainsi un portrait nettement plus fidèle des coûts indirects des dommages aux infrastructures souterraines à travers le Canada. Ces améliorations n'ont pas été construites en vase clos : elles sont le fruit d'une démarche méthodologique combinant revue de littérature approfondie et validation de terrain auprès de plus de vingt parties prenantes à travers le Canada, dont la description fait l'objet de la section suivante.

3 Méthodologie générale

La méthodologie repose sur une approche multidimensionnelle alliant rigueur académique et expertise de terrain.

3.1 Revue de littérature

Une revue exhaustive de la littérature scientifique et grise a été conduite pour chaque catégorie de coûts.

L'objectif de cette revue de la littérature était d'explorer les avancées récentes dans la méthodologie utilisée pour évaluer les coûts indirects identifiés par De Marcellis-Warin et coll. (2015) mais encore non estimés. Par conséquent, cette revue de la littérature suit de près la classification des coûts décrite dans le rapport original, qui s'appuie sur les travaux de Gilchrist et Allouche (2005) - une référence clé encore largement citée dans la littérature récente sur les coûts socio-économiques de la construction.

La revue de littérature a permis d'identifier les meilleures pratiques méthodologiques, les cadres de référence existants (notamment le calculateur « Interruption Cost Estimate » du Lawrence Berkeley National Laboratory pour les coûts électriques), et les paramètres de valorisation disponibles pour le contexte canadien. Cette revue de littérature a fait l'objet d'un rapport de stage de Maya Mansour dans le cadre de son baccalauréat en économie à l'Université de Montréal, sous la direction de William Arbour.

3.2 Entretiens avec les parties prenantes

La conduite des entretiens a suivi un protocole rigoureux en quatre étapes : (1) élaboration d'un questionnaire semi-dirigé permettant d'aborder de manière systématique les hypothèses méthodologiques propres à chaque catégorie de coûts; (2) obtention de l'approbation éthique de l'Université de Montréal (UdM) préalablement à tout entretien, conformément aux standards de la recherche impliquant des participants humains ; (3) réalisation des entretiens auprès d'experts et de praticiens à travers le Canada ; et enfin (4) validation des résultats, les résumés de chaque entretien ayant été soumis aux participants pour vérification afin de garantir l'exactitude des informations collectées.

Au total, plus de vingt entretiens semi-dirigés ont été réalisés entre janvier et septembre 2025 avec d'une part les sept partenaires régionaux du CCGA et d'autre part, seize propriétaires d'infrastructures et autres parties prenantes à la grandeur du Canada : trois municipalités, trois compagnies de gaz, deux entreprises de télécommunications, quatre compagnies d'électricité, deux organisations de sécurité incendie (nationales et provinciales), une organisation nationale de l'énergie et une organisation municipale de réseaux souterrains.

Ces entretiens ont permis de valider les hypothèses méthodologiques, de collecter des données de terrain inaccessibles autrement (notamment les données réelles d'un grand fournisseur national de services télécommunication sur les durées et volumes d'incidents), et d'ancrer les modèles dans les pratiques opérationnelles réelles.

4 Les intrants et paramètres de l'outil

4.1 Données d'entrée : la base ORDI

L'outil traite les données de la base ORDI (*Outil de Rapport sur les Dommages aux Infrastructures*), qui recense les dommages aux infrastructures souterraines déclarés par les opérateurs de réseaux au Canada.

L'outil utilise les champs suivants pour ses calculs :

- **DATE_OF_DAMAGE** : date de l'incident, utilisée pour déterminer la saison, le jour de la semaine, et l'année de référence pour l'inflation.
- **STATE_PROV** : province de l'incident, élément central de nombreux calculs différenciés par géographie.
- **CITY** et **ADDRESS** : utilisés pour la géolocalisation.
- **LATITUDE/LONGITUDE** : coordonnées GPS, utilisées directement si disponibles.
- **FAC_DAMAGED** : type d'infrastructure endommagée (électricité, gaz naturel, eau, égouts, télécommunications, etc.).
- **FAC_AFFECTED** : genre d'exploitation affectée (service/branchement, distribution, transport), utilisé pour déterminer la magnitude du bris.
- **RIGHTOFWAY_TYPE** : type de voie concernée, déterminant les calculs de congestion.
- **SERVICE_INTERRUPTED** : indique si le service a été interrompu.
- **OUTAGE_HOURS_DURATION** : durée de l'interruption de service.
- **NUM_CUSTOMERS_AFFECTED** : nombre de clients affectés.
- **EXCAVATOR_DOWNTIME** : durée d'immobilisation de l'excavateur, utilisée dans certains calculs.

4.2 Paramètres de l'outil

L'outil est développé en *Rust*, un langage de programmation orienté performance et sécurité mémoire. Cette approche garantit une exécution rapide, même pour de grandes bases de données comportant des milliers de bris, et une fiabilité élevée du traitement.

4.2.1 Géolocalisation

La localisation précise des incidents est essentielle pour plusieurs composantes du calcul des coûts. Lorsque les coordonnées GPS sont déjà présentes dans la base ORDI, elles sont utilisées directement. Dans le cas contraire, une adresse composite est construite à partir des champs adresse, ville et province, puis transmise à un service de géocodage externe. En cas d'échec du géocodage, les coûts dépendant

de la localisation ne sont pas calculés. En revanche, les incidents pour lesquels la géolocalisation échoue sont consignés dans un fichier dédié, avec l'adresse originale et l'adresse composite utilisée pour la tentative de géocodage. Ainsi, au besoin, l'utilisateur peut aller corriger les adresses mal renseignées dans ORDI à la main en sachant quel dommage pose un problème.

L'outil associe également l'incident à une subdivision de recensement (CSD) (environ 4 000 secteurs à l'échelle nationale), ce qui permet d'obtenir la densité de population locale exprimée en habitants par kilomètre carré. Cette densité joue un rôle structurant dans plusieurs calculs :

- Un seuil¹ de 400 hab/km² est utilisé pour distinguer les zones urbaines denses (au-dessus du seuil) des zones rurales ou périurbaines (en dessous).
- En l'absence de secteurs de recensement identifiables, la densité provinciale moyenne est utilisée comme valeur de substitution.

En rattachement chaque bris à sa subdivision de recensement (CSD), cela fournit également des informations sur le volume d'activité économique, le nombre de ménages et les ratios résidentiel/non résidentiel pour un point très précis.

4.2.2 Classification des services d'urgence

Le coût des interventions des services d'incendie varie selon le type d'organisation du service mobilisé. L'identification des trois types de services d'incendie ainsi que les modèles de rémunération associés reposent sur les données du Recensement des services d'incendie du Canada 2024 (Canadian Association of Fire Chiefs, 2024) ainsi que sur les entrevues réalisées. On distingue :

- Les services d'incendie des régions métropolitaines (temps plein) : il s'agit des services d'incendie des 23 grandes villes membres du Big City Mayors' Caucus de la Fédération canadienne des municipalités (Federation of Canadian Municipalities, 2025); ces services disposent d'effectifs permanents à temps plein, d'équipements lourds et d'une structure organisationnelle professionnalisée, ce qui se traduit par des coûts horaires élevés, mais une capacité d'intervention rapide et bien dimensionnée.
- Les services d'incendie avec des pompiers professionnels : on considère dans cette catégorie 94 municipalités de taille intermédiaire qui ont toutes des pompiers à temps plein ;

¹ Ce seuil est celui défini et utilisé par Statistique Canada pour différencier un centre de population (région urbaine) d'une zone rurale (<https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2011001/geo/pop/def-fra.htm>).

- Les services d'incendie volontaires ou composites : il s'agit de toutes les autres municipalités dont le service incendie repose sur des pompiers volontaires ou une composition mixte de volontaires et professionnels.

Cette classification des municipalités détermine également les paramètres de trafic routier, les temps de congestion, les distances de détour et la composition des équipes de services d'urgence utilisés dans les calculs.

4.2.3 Données externes dynamiques : parc automobile, carburant et inflation

Les caractéristiques du parc automobile sont prises en compte à partir de données provinciales décrivant la composition des véhicules (Statistics Canada, 2025), notamment les types de véhicules, les types de carburant utilisés, leur consommation ainsi que les coûts d'entretien associés (CAA, 2025). Les prix du carburant sont intégrés de manière dynamique à partir des données de Statistique Canada (Statistics Canada, 2025b) pour l'année et le mois de chaque incident.

L'ensemble des coûts estimés dans l'outil sont ajustés à l'année du bris à l'aide des indices d'inflation publiés par Statistique Canada.

4.2.4 Traitement des données manquantes

L'un des défis majeurs de l'outil réside dans la gestion des données manquantes, inévitables dans une base de données agrégée comme ORDI. L'outil adopte une stratégie d'imputation hiérarchique, en cherchant à utiliser le maximum d'information disponible dans ORDI avant de recourir aux valeurs par défaut.

- Durée manquante : imputée selon le type d'infrastructure endommagée et la magnitude de l'incident. Pour les durées manquantes, des valeurs par défaut, validées à travers nos entrevues, sont appliquées selon le type d'infrastructure et la magnitude (par exemple, 6 h pour un incident électrique mineur, 24 h pour un incident moyen).
- Coordonnées GPS manquantes : l'adresse disponible est géocodée. En cas d'échec, les coûts dépendant de la localisation ne sont pas calculés pour l'incident concerné.
- Densité manquante : la densité provinciale moyenne est utilisée lorsqu'aucun secteur de recensement ne peut être associé aux coordonnées.
- Taille de ville manquante : en l'absence d'information sur la ville, la classification rurale (la plus conservatrice) est appliquée par défaut.

- Interruption de service non renseignée : Le statut d'interruption de service (oui/non) est une variable structurante pour plusieurs modules de coûts : les coûts électriques, Internet, eau et évacuation ne se déclenchent que si une interruption est confirmée. Lorsque ce champ est manquant dans ORDI, l'outil applique la règle de substitution suivante : un incident est considéré comme ayant causé une interruption de service si le nombre de clients affectés (NUM_CUSTOMERS_AFFECTED) ou la durée de la panne (OUTAGE_HOURS_DURATION) est renseigné et supérieur à zéro.

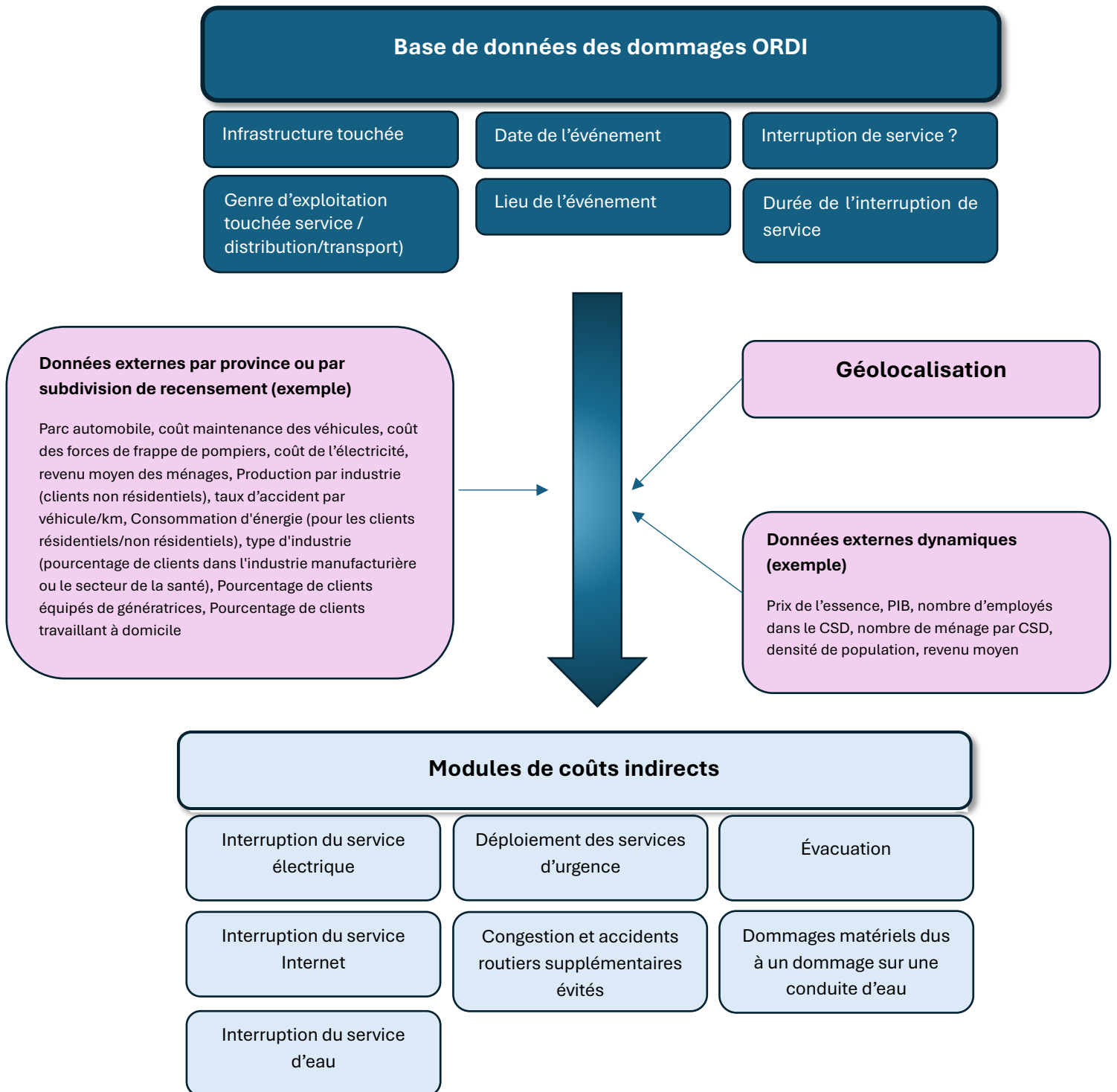


Figure 1 : Modélisation de l'outil CIRANO d'évaluation des coûts socioéconomiques des bris d'infrastructures souterraines

5 Revue détaillée des grandes catégories de coûts

5.1 Coûts d'interruption du service électrique

5.1.1 *Champs d'application*

Les coûts liés à l'électricité sont calculés lorsque l'infrastructure électrique elle-même est endommagée et qu'il y a une interruption du service électrique. Ils s'appliquent également lors d'un bris de conduite de gaz naturel ayant entraîné une coupure d'électricité préventive pour des raisons de sécurité.

Pour les incidents de gaz naturel causant une coupure électrique indirecte, des facteurs d'ajustement provinciaux sont appliqués pour tenir compte de la proportion d'incidents entraînant effectivement une interruption électrique. Ces facteurs varient selon la province, la magnitude et la densité de population locale.

5.1.2 *Cadre méthodologique : Interruption Cost Estimate 2.1.0*

La méthodologie repose sur le cadre « Interruption Cost Estimator » du Lawrence Berkeley National Laboratory, dans sa version 2.1.0 publiée en août 2025 (Berkeley Lab, 2025). Les données issues des simulations avec ce cadre ont été utilisées dans des modèles de régression pour formuler les fonctions de coûts de l'interruption électrique. La version précédente de l'outil utilisait des données collectées entre 1989 et 2012 et la mise à jour 2025 intègre les données les plus récentes.

L'outil segmente les impacts selon deux grandes catégories de clients, car leurs pertes économiques diffèrent fondamentalement :

- Clients résidentiels : Le coût est principalement basé sur la « disposition à payer » pour un service hypothétique de remplacement pour l'électricité. Le modèle monétise des éléments tangibles de désagréments et de perturbations du quotidien associés à l'absence de service tels que les frais de relocalisation, l'achat de fournitures d'urgence, les repas à l'extérieur et l'incapacité de travailler à domicile.
- Clients non résidentiels : Le coût est calculé comme la valeur de la production perdue plus les coûts liés à l'interruption (main-d'œuvre pour compenser la production perdue ou redémarrer le processus de production, dommages aux matières premières, utilisation de génératrices), tout en soustrayant les économies réalisées lors de l'interruption (salaires non payés, combustible non utilisé).

5.1.3 Variables et méthodologie de calcul

Le coût total pour une province (Celec, prov) diffère selon le nombre de clients total affectés, le ratio résidentiel/non résidentiel de la subdivision de recensement concernée, la durée de l'interruption de service et finalement l'ampleur du bris (mineur, moyen ou majeur).

Ce ratio résidentiel/entreprises est issu des données de recensement de Statistique Canada (Statistics Canada, 2025a) et de données du registre des entreprises (Statistics Canada, 2025f) et il permet d'adapter le calcul à la réalité économique locale.

$$C_{elec,prov} = \left[N_{tot,i} * \frac{N_{res,CSD}}{N_{res,CSD} + N_{entreprises,CSD}} * C_{res,h} \right] + \left[N_{tot,i} * \left(1 - \frac{N_{res,CSD}}{N_{res,CSD} + N_{entreprises,CSD}} \right) * C_{entreprises, prov, h} \right]$$

Où

- CSD = subdivision de recensement
- i = type de bris (mineur, moyen ou majeur)
- $N_{rés, CSD}$ = nombre de clients résidentiels dans la subdivision de recensement du bris
- $N_{entreprises, CSD}$ = nombre de clients non résidentiels dans la subdivision de recensement du bris
- $N_{tot, i}$: nombre total de clients touchés en fonction du type de bris i
- $C_{res, h}$: fonction de coût pour les clients résidentiels
- $C_{entreprises, prov, h}$: fonction de coût pour les clients non résidentiels, par province

On suppose que le mix local de clients reflète la composition de la subdivision de recensement correspondante.

Le calculateur du Berkeley Lab a été utilisé pour réaliser les modèles de régression pour déterminer les fonctions de coûts. Le calculateur a été alimenté par de multiples variables différenciées par province :

- Temporelles : La durée de l'interruption de service électrique (de 10 minutes à 24 heures), la saison et le jour de la semaine (les coûts diffèrent le week-end).
- Géographiques et économiques : le revenu moyen des ménages et la distribution des revenus (Statistics Canada, 2023), la production par industrie (Statistics Canada, 2020a, 2020b), la consommation moyenne d'énergie pour

les clients résidentiels (Statistics Canada, 2021) et non résidentiels par province².

- Structurelles : la répartition des industries prédominantes dans le territoire de l'interruption de service (manufacturier, secteur de la santé et autres) (Statistics Canada, 2024c), le pourcentage de clients possédant une génératrice (Statistics Canada, 2025e) et la proportion de travailleurs qui font du télétravail (Statistics Canada, 2022).

Lorsque le nombre total de clients touchés par le dommage ainsi que la durée de l'interruption ne sont pas renseignés dans la base de données ORDI, ces paramètres sont estimés en fonction des caractéristiques de l'infrastructure concernée — soit le service/branchement, la distribution ou le transport — ainsi que du type de territoire, urbain (densité > 400 hab./km²) ou rural.

Pour chaque catégorie d'ampleur de bris, des moyennes pondérées calculées à partir des trois dernières années de la base de données ORDI ontarienne, qui comporte très peu de données manquantes, ont été utilisées. Ces estimations ont ensuite été validées à l'aide de nos entrevues auprès d'experts ainsi que par comparaison avec un rapport d'Électricité Canada (2025).

En conclusion, pour évaluer ces coûts, voici les intrants internes à ORDI et externes à avoir :

- Intrants internes (ORDI) : Province, localisation, type d'infrastructure touchée (Electric ou Natural Gas), type d'installation (service, distribution, transport), la durée de l'interruption de service, le nombre de clients affectés, date (pour le statut week-end/été) et la durée de l'interruption de l'excavateur.
- Intrants externes : nombre de ménage et nombre d'entreprise par subdivision de recensement (CSD), densité de population au point du dommage, revenu moyen des ménages, distribution de revenus des ménages, Production par industrie (clients non résidentiels), la consommation moyenne d'énergie pour les clients résidentiels et non résidentiels par province, la répartition des industries prédominantes dans la zone (manufacturier, secteur de la santé et autres), le pourcentage de clients possédant une génératrice et la proportion de travailleurs qui font du télétravail.

² Pour estimer la consommation moyenne des clients non résidentiels, nous avons utilisé les valeurs par défaut proposées dans l'outil du Berkeley Lab pour plusieurs États américains présentant des caractéristiques économiques comparables à celles des provinces canadiennes, notamment en termes de structure sectorielle (répartition des entreprises par grands secteurs d'activité). Pour chaque province, deux à trois États de référence ont été sélectionnés et la consommation moyenne retenue correspond à la moyenne des valeurs observées pour ces États.

5.2 Coûts d'interruption du service Internet

5.2.1 *Champs d'application*

Ce module s'applique aux incidents affectant les infrastructures de télécommunications, uniquement pour les incidents de magnitude moyenne ou majeure (les incidents mineurs sont exclus). Si l'interruption du service Internet résulte d'une panne électrique, les coûts sont déjà capturés dans les coûts électriques afin d'éviter le double comptage.

5.2.2 *Variables et méthodologie de calcul*

La formule utilisée pour estimer les coûts reliés à l'interruption du service Internet est la suivante :

$$C_{internet} = N_{clients} \times T \times C_h$$

où

- $N_{clients}$ est le nombre de clients affectés,
- T est la durée de l'interruption et
- C_h est le coût unitaire par personne par heure.

Le coût unitaire horaire C_h (0,155\$ par personne et par heure) est dérivé d'une estimation des pertes de PIB liées aux interruptions temporaires d'Internet (Deloitte, 2016) actualisée à l'aide de l'indice des prix à la consommation total canadien (Statistics Canada, 2025d).

Lorsque le nombre total de clients touchés par le dommage ainsi que la durée de l'interruption ne sont pas renseignés dans la base de données ORDI, ces paramètres ont été calibrés à partir de données réelles fournies par un grand opérateur national de télécommunications, collectées sur les trois dernières années. Une distinction est faite selon le type de dommage : une rupture de fibre optique (catégorisée comme transport dans ORDI) ou une rupture de câble coaxial (catégorisée comme distribution). À titre indicatif, voici le nombre de clients affectés prédéfini utilisé dans l'outil : 268 clients pour un incident moyen, 2 376 clients pour un incident majeur.

5.3 Coûts d'interruption du service d'eau

5.3.1 *Champs d'application*

Ces coûts s'appliquent lorsque l'infrastructure endommagée est une conduite d'eau ou un égout. Les bris mineurs (service/drop) sont exclus du calcul — seuls les bris de niveau moyen (distribution – réseau secondaire) et majeur (transport – réseau primaire) donnent lieu à une estimation.

5.3.2 *Variables et méthodologie de calcul*

Le coût total est la somme de deux composantes : $C_{\text{eau_total}} = C_{\text{eau_résidents}} + C_{\text{eau_entreprises}}$ car la méthodologie de calcul est différente que l'on parle des coûts indirects de l'interruption de l'eau pour les ménages ou pour les entreprises.

Coûts pour les résidents

Le coût résidentiel repose sur le consentement à payer des ménages pour éviter une interruption d'eau, selon deux seuils de durée d'interruption :

- Interruption de moins de 8 heures : nous utilisons une valeur dérivée d'une étude de Seattle Public Utilities (2006), qui estimait à 1,40 \$ US la disposition à payer par personne par heure pour éviter une interruption courte (durée moyenne de référence de 4 heures). Ce montant a été converti en dollars canadiens à l'aide du taux de change USD/CAD moyen sur la période 2012–2024, puis ajusté à l'inflation 2015–2024. On obtient ainsi une valeur de 2,61 \$/h.
- Interruption de 8 heures ou plus : Nous utilisons une valeur dérivée d'Aubuchon et Morley (2013), qui proposent un coût de 160 \$ US par personne par jour pour les interruptions d'une journée complète ou plus. Les mêmes conversions et mêmes ajustements à l'inflation ont été appliqués pour obtenir un coût moyen de 10,94 \$/h.

Ces deux études de référence sont citées dans un rapport de la Water Research Foundation (Raucher et coll., 2017).

Le nombre d'habitants touchés est estimé à partir des données du recensement de Statistique Canada (2023), au niveau de la subdivision de recensement (CSD), pondéré par la fraction de superficie couverte par le rayon d'impact du bris.

Coûts pour les entreprises

Pour les entreprises, le calcul repose sur la productivité des employés présents sur site, pondérée par des coefficients de perturbation sectorielle spécifiques à des interruptions d'eau. Cette méthodologie s'inspire d'une étude de Wood & coll. (2017) développée initialement dans le contexte des évacuations liées aux tsunamis pour estimer les perturbations économiques subies par les entreprises situées dans une zone d'impact. Si le contexte d'origine peut sembler éloigné, la transposition est méthodologiquement justifiée : dans les deux cas, il s'agit d'estimer les pertes de productivité engendrées par une perturbation soudaine, non planifiée et géographiquement délimitée, qui contraint les employés à interrompre leur activité sur site pendant une durée déterminée. La structure du modèle — fondée sur la présence des employés, la valeur ajoutée horaire par secteur et un coefficient de perturbation sectorielle — est indépendante de la nature de l'aléa déclencheur et s'applique de manière cohérente à toute interruption de service affectant un périmètre local, qu'il s'agisse d'une vague de submersion ou d'un bris de conduite d'aqueduc.

Le nombre d'employés touchés selon chaque code SCIAN est estimé à partir d'un tableau de données « Nombre d'entreprises canadiennes avec employés » de Statistique Canada (Statistics Canada, 2024d) au niveau de la subdivision de recensement (CSD), pondéré par la fraction de superficie couverte par le rayon d'impact du bris.

Pour chaque secteur d'activité économique (codifié selon le SCIAN à deux chiffres), le coût est calculé selon la formule :

$$C_{eau_entreprises,i} = \sum_i \left[N_i * PP * \left(\frac{PIB_i}{Emploi_i * Heures_an} \right) * CP_i * h \right]$$

Où

- N_i = nombre total d'employés dans la CSD du bris par secteur i
- PP = proportion de présence des employés sur le site par rapport à l'ensemble des employés = 2/3, hypothèse uniforme pour toutes les provinces et tous les secteurs.
- PIB_i = PIB moyen par employé par heure par secteur i , calculé à partir du PIB par industries au Canada par code SCIAN (tableau Statistique Canada 36-10-0434-06) divisé par le nombre d'employés total par code SCIAN et le nombre moyen d'heures travaillées par an (tableau 36-10-0489-01).

- CP_i = coefficient de perturbation sectorielle, qui reflète la proportion d'activité économique effectivement interrompue lors d'un bris d'eau. Ces coefficients, inspirés d'un rapport de la Water Research Foundation (Raucher et coll., 2017), varient de 10 % (secteurs peu dépendants de l'eau, comme la finance, l'enseignement ou les services professionnels) à 80 % (secteurs fortement perturbés, comme le commerce de détail et la restauration). Les secteurs manufacturiers, de construction, de transport et de santé se voient attribuer une valeur intermédiaire de 30 %.
- h = durée de l'interruption, issue du champ OUTAGE_HOURS_DURATION de la base ORDI si disponible, sinon une valeur moyenne validée par nos entrevues est imputée à chaque type de bris.

5.3.3 Périmètre géographique et pondération

Les coûts ne sont pas calculés pour les bris mineurs. Pour les bris moyens et majeurs, le périmètre d'impact est délimité par un rayon circulaire autour du point de bris, et la fraction de la CSD couverte par ce rayon est calculée comme suit :

$$Fraction_{CSD} = \frac{\pi \times r^2}{Superficie_{CSD}}$$

avec $r = 20$ mètres pour un bris moyen et $r = 100$ mètres pour un bris majeur.

Le coût total calculé pour l'ensemble de la CSD est ensuite multiplié par cette fraction, afin de n'imputer que la portion de la zone effectivement touchée. On présume que la composition économique et démographique de la zone d'impact est la même que celle de l'ensemble de la CSD à laquelle elle appartient.

5.4 Coûts de la congestion routière

5.4.1 Champs d'application et hypothèses clés

Ce module s'applique uniquement aux incidents survenant sur des voies publiques. Il repose sur trois hypothèses fondamentales.

- Premièrement, tout incident sur une voie publique génère un niveau de perturbation du trafic — soit de la congestion, soit un détour.
- Deuxièmement, les conducteurs s'adaptent de manière rationnelle et optimisent leurs itinéraires (souvent à l'aide d'outils comme Waze), ce qui conduit à un équilibre où le temps de détour est approximativement égal au temps de congestion. Dans ce contexte, une partie du trafic demeure dans la

congestion tandis qu'une autre est reroutée vers des itinéraires alternatifs. La proportion relative de congestion et de détours dépend fortement du type de voie. Dans l'outil, ces proportions sont calibrées à partir de la littérature sur les perturbations de trafic et des entrevues réalisées avec des parties prenantes, conduisant par exemple à une hypothèse d'environ 70 % de véhicules reroutés sur les rues urbaines et 20 % sur les autoroutes, où les possibilités de détour sont plus limitées.

- Troisièmement, le modèle capture à la fois la congestion directe (véhicules retardés) et les détours indirects (véhicules reroutés).

La période de perturbation est basée sur le temps d'immobilisation de l'excavatrice, et non sur la durée totale de réparation ou de panne.

5.4.2 Variables et méthodologie de calcul

Quatre composantes de coûts sont calculées :

$$C_{congestion_total} = C_{temps} + C_{carburant} + C_{maintenance} + C_{pollution}$$

Chaque composante de coût est ajustée en fonction de plusieurs facteurs :

- le type de route (résidentielle, collectrice, artère ou autoroute) ;
- le type de véhicule, selon huit catégories combinant le type d'énergie (essence ou électrique) et la catégorie de véhicule (berline, VUS, fourgonnette ou camionnette) ;
- le contexte territorial (milieu urbain ou rural).

Enfin, l'ensemble des paramètres est pondéré en fonction de la composition réelle du parc automobile provincial, obtenu à partir des données de Statistique Canada (Statistics Canada, 2024b).

Estimation du nombre de véhicules affectés par la congestion ou le détour et de leur distance moyenne parcourue

Pour estimer le nombre de véhicules affectés par un incident — qu'ils soient bloqués dans la congestion ou reroutés vers un détour — l'outil s'appuie sur le débit journalier annuel moyen (DJAM), connu en anglais sous l'acronyme AADT (Annual Average Daily Traffic). Cette mesure représente le nombre moyen de véhicules circulant sur un tronçon routier donné au cours d'une journée type.

Les valeurs de DJAM utilisées dans le modèle varient selon deux dimensions : le type de voie (rue locale, collectrice, artérielle, autoroute) et le contexte géographique (milieu urbain ou rural). Ces deux facteurs déterminent conjointement le volume de trafic exposé à la perturbation, et donc le nombre de véhicules en congestion (N_c) et en détour (N_d) entrant dans le calcul des coûts.

En pratique, ces valeurs sont issues d'une combinaison de sources nationales et municipales, notamment : le Guide de conception géométrique des routes canadiennes de l'Association des transports du Canada (2017), des rapports de la Ville de Toronto (Toronto City, 2025 a ; Toronto Transportation Services, 2013), les données ouvertes de débits de circulation du Gouvernement du Québec (2025), un rapport du département américain des Transports (U.S. Department of Transportation (Federal Highway Administration), 2023), un rapport de la Water Research Foundation (Raucher et coll., 2017), ainsi que les différents entretiens réalisés avec les parties prenantes dans le cadre du projet. Les durées de détour et congestion sont des moyennes par véhicule pour un chantier typique avec réduction de capacité, calibrées sur les pratiques des rapports précédents et les retours empiriques.

Coûts reliés à la perte de temps

Les coûts liés à la perte de temps s'appliquent à **tous les véhicules affectés par l'incident**, qu'il s'agisse des véhicules bloqués dans la congestion ou des véhicules ayant opté pour un détour. Ils sont basés sur la valeur du temps de déplacement, le taux d'occupation des véhicules, la part des déplacements professionnels et le salaire horaire provincial.

La formule est la suivante :

$$C_{temps} = O \times (F_t \times S) \times (N_c \times T_c + N_d \times T_d)$$

où :

- N_c = nombre de véhicules pris dans la congestion
- N_d = nombre de véhicules ayant pris le détour
- O = taux d'occupation moyen des véhicules (personnes/véhicule)
- S = salaire moyen pour la région (par heure, par personne)
- T_c = durée moyenne de la congestion (en heures)
- T_d = durée moyenne du détour (en heures)
- F_t = facteur de pondération des déplacements affaires/personnels

Le taux d'occupation moyen des véhicules est fixé à 1,2 personne par véhicule (Ministère des Transports, 2023). La valeur monétaire du temps perdu est estimée à partir du salaire horaire moyen régional (S), différencié par province. Cependant, tous les déplacements n'ont pas la même valeur économique. Une distinction est opérée selon le motif du déplacement :

- 10 % des déplacements sont des déplacements d'affaires, dont le temps est valorisé à 100 % du salaire horaire, car le temps perdu correspond à du temps de travail productif directement soustrait à l'économie.
- 90 % des déplacements sont des déplacements personnels (domicile-travail, loisirs, courses, etc.), dont le temps est valorisé à 60 % du salaire horaire, reflétant le fait que le coût d'opportunité du temps personnel est inférieur à celui du temps de travail

Ces proportions sont fondées sur deux sources complémentaires : le Guide des avantages-coûts des projets publics du ministère des Transports du Québec (2023), et un rapport de Statistique Canada (2024a) sur les motifs de déplacement. La pondération du salaire selon le motif des déplacements est quant à elle issue d'une publication du U.S. Department of Transportation (2011).

Ces deux composantes sont combinées en un facteur de pondération unique F_t , calculé comme suit : $F_t = 0,1 \times 1,0 + 0,9 \times 0,6 = 0,64$. Autrement dit, la valeur moyenne du temps perdu est 64 % du salaire horaire régional.

Pour chaque heure perdue, que ce soit en attente dans la congestion ou en raison d'un détour plus long, la perte économique est égale au nombre de personnes dans les véhicules affectés (N_c ou N_d multipliés par O), multiplié par la valeur moyenne de leur temps ($F_t \times S$). Les deux termes de la somme capturent séparément le coût subi par les véhicules bloqués ($N_c \times T_c$) et celui subi par les véhicules reroutés ($N_d \times T_d$), avant d'être agrégés en un coût total de perte de temps.

Il est à noter que, conformément à l'hypothèse de comportement rationnel des conducteurs — qui optimisent leur itinéraire à l'aide d'outils de navigation comme Waze — le temps de congestion (T_c) et le temps de détour (T_d) sont supposés être approximativement égaux à l'équilibre, ce qui signifie que les deux groupes subissent une perte de temps comparable.

Coûts reliés à la surconsommation de carburant

Le coût du carburant $C_{carburant}$ est calculé pour chaque combinaison type de véhicule/carburant (essence ou électrique) pris dans le détour, avec des prix récupérés dynamiquement auprès de Statistique Canada (2025 a) pour l'essence et à l'aide de l'outil du CAA (2025) pour le coût de l'électricité.

Coûts reliés à la maintenance et à l'entretien

Les coûts d'usure et de dépréciation des véhicules sont calculés en fonction du type de véhicule et de la distance supplémentaire parcourue D_d (pour les véhicules qui utilisent le détour seulement). Ces coûts sont estimés à l'aide de l'outil du CAA (2025) en considérant un kilométrage annuel moyen compris entre 15 000 et 20 000 km et une utilisation ville/autoroute avec un ratio 55/45.

$$C_{maintenance} = N_d * D_d * C_{maint,CAA}$$

Où

- N_d = nombre de véhicules ayant pris le détour
- D_d = distance moyenne du détour (km)
- $C_{maint,CAA}$ = coût d'utilisation (maintenance/entretien) d'une automobile (\$/km)

Coûts reliés à la pollution

Les coûts de pollution prennent en compte six polluants distincts qui sont quantifiés, puis convertis en coûts monétaires (\$/tonne), avec des taux d'émission différenciés selon la vitesse de circulation (~5 km/h en congestion, ~30 km/h pour les détours).

$$C_{pollution} = (N_c \times D_c) \times \sum (E_{i,5} \times C_i) + (N_d \times D_d) \times \sum (E_{i,30} \times C_i)$$

Où

- $E_{i,30}$ = taux d'émission du polluant i à 30 km/h
- $E_{i,5}$ = taux d'émission du polluant i à 5 km/h
- N_d = nombre de véhicules ayant pris le détour
- N_c = nombre de véhicules pris dans la congestion ou dans le détour
- D_c = distance parcourue en congestion (0,5 km)
- D_d = distance moyenne du détour (km)
- C_i = coût par tonne du polluant i

Les valeurs retenues pour les taux d'émission des polluants ainsi que leur coût (exprimé en dollars par tonne métrique) sont issues du Guide des avantages-coûts des projets publics du ministère des Transports du Québec (Ministère des Transports, 2023).

5.5 Coûts des accidents routiers supplémentaires évités

5.5.1 *Champs d'application*

Tout comme les coûts de congestion, cette catégorie de coûts s'applique à tous les types de bris, quelle que soit l'infrastructure endommagée. La seule condition d'activation est que le bris ait lieu sur une voie publique.

En effet, un bris sur la voie publique entraîne une déviation du trafic vers des routes alternatives. Ce détour implique des kilomètres supplémentaires ce qui augmente statistiquement le nombre d'accidents probables. L'outil estime le coût social de ces accidents additionnels — décès et blessés — générés par l'allongement des trajets attribuable à l'incident.

5.5.2 *Variables et méthodologie de calcul*

Voici la formule retenue pour estimer les coûts des accidents évités

$$C_{acc} = h \times D_{supp} \times \left(\frac{T_{blessés}}{100\,000\,000} \times C_{blessés} + \frac{T_{décès}}{100\,000\,000} \times C_{décès} \right)$$

Où

- h = durée du bris (en heures)
- D_{supp} = nombre de kilomètres supplémentaires parcourus par heure de bris (tous véhicules confondus, selon le type de route — voir tableau ci-dessous)
- $T_{décès}$ = taux de victimes décédées par 100 millions de véhicules-kilomètres parcourus (propre à chaque province)
- $T_{blessés}$ = taux de blessés par 100 millions de véhicules-kilomètres parcourus (propre à chaque province)
- $C_{décès}$ = coût moyen d'un décès
- $C_{blessés}$ = coût moyen d'un blessé

Les taux d'accidentalité par province sont issus des Statistiques sur les collisions de la route au Canada : 2023, un rapport de Transports Canada (2023). Par exemple, pour le Québec, le nombre de blessés par 100 millions de véhicules-kilomètres

parcours est de 34,51 et le nombre de décès par 100 millions de véhicules-kilomètres parcourus est de 0,47.

Pour valoriser monétairement chaque victime, l'outil CIRANO retient la méthode de la disposition à payer. Cette méthode mesure la valeur sociale d'éviter un accident en se fondant sur ce que les individus seraient collectivement prêts à payer pour réduire leur risque d'accident, plutôt que sur la seule perte de revenus futurs (méthode du capital humain). Elle est reconnue comme la méthode de référence pour l'évaluation socio-économique des politiques de sécurité routière au Canada. Les valeurs unitaires retenues sont de 4 182 625 \$ (en dollars canadiens 2019) pour un décès, 1 045 656 \$ pour un blessé grave et 103 701 \$ pour un blessé léger (Ministère des Transports, 2023).

Le ratio blessures graves/blessures légères observé au Canada (9 261/118 838) (Transports Canada, 2023) permet de calculer un coût moyen pondéré des blessés, utilisé comme valeur unique $C_{\text{blessés}}$ dans la formule.

Le nombre de kilomètres supplémentaires générés par heure de bris (D_{sup}) est estimé à partir du débit journalier annuel moyen (DJAM) de chaque type de voie, de la proportion de véhicules prenant un détour et de la distance additionnelle de ce détour. Les valeurs retenues sont calculées sur une moyenne de 12 heures de trafic non négligeable.

5.6 Coûts des évacuations

5.6.1 *Champs d'application*

Les évacuations ne sont considérées que pour les dommages sur une infrastructure de gaz naturel et qu'il y a interruption du service de gaz.

5.6.2 *Variables et méthodologie de calcul*

Les coûts associés à l'évacuation comprennent deux composantes.

- Coûts pour les entreprises situées dans la zone d'impact : Les pertes de productivité des entreprises sont estimées en appliquant la même méthodologie que celle utilisée pour l'évaluation des coûts liés à l'interruption du service d'eau.
- Coûts pour les ménages : Les coûts pour les ménages sont estimés sous la forme d'un montant forfaitaire et arbitraire de 100 \$ par ménage évacué,

applicable uniquement lorsque la durée de l'évacuation dépasse deux heures.

Ces coûts bruts sont ensuite pondérés par une probabilité d'évacuation, qui varie selon la province, la densité de population et l'ampleur de l'incident. Ces probabilités ont été compilées à la suite de nos entrevues à la grandeur du Canada. À titre d'exemple, au Québec, cette probabilité est estimée à 100 % en zone densément peuplée et à 60 % en zone rurale pour les incidents mineurs ou moyens. Pour les incidents majeurs, la probabilité d'évacuation est fixée à 100 %, indépendamment de la densité de population à l'endroit du dommage.

Pour estimer le nombre de personnes affectées, nous utilisons un rayon d'impact basé sur les lignes directrices en matière de gestion des mesures d'urgence pour le gaz naturel de Transports Canada (2024), dont la valeur varie selon le type d'infrastructure touchée (service, distribution ou transport). Pour un bris mineur, un rayon de 20 m autour du point de dommage est considéré. Pour un bris d'ampleur moyenne, le rayon correspond à un pâté de maisons (100 m). Enfin, pour un bris majeur, un rayon d'impact de 800 m est retenu.

5.7 Coûts reliés au déploiement des services d'urgence

5.7.1 Champs d'application

Cette catégorie de coût s'applique exclusivement aux bris de conduites de gaz naturel. Dès qu'il y a un bris de gaz déclaré, l'intervention des services d'incendie est systématique, quelle que soit la magnitude du bris, en raison du risque d'explosion et d'incendie inhérent à ce type d'incident (et ce même s'il n'y a pas d'interruption du service de gaz).

5.7.2 Variables et méthodologie de calcul

Le coût de ces interventions dépend directement du type de service d'incendie mobilisé sur les lieux. L'outil développé par le CIRANO distingue trois catégories, identifiées à partir du Recensement canadien des services d'incendie 2024 (Canadian Association of Fire Chiefs, 2024).

Chaque type de service se caractérise par trois dimensions qui déterminent conjointement le coût total de l'intervention :

- La force de réponse désigne l'ensemble des ressources déployées sur les lieux du bris : nombre d'autopompes, nombre d'échelles aériennes, nombre

de pompe-échelle, nombre de pompiers et d'officiers par véhicule et finalement le nombre de chefs pompiers. Cette force de réponse varie selon le type de service et la magnitude du bris (mineur, moyen, majeur). Les hypothèses de l'outil ont été validées à travers nos entrevues.

- La structure de coûts horaires est calculée à partir des dépenses en équipement et en personnel, différenciées par province en se basant sur nos entrevues et sur des rapports de certaines villes canadiennes (Edmonton, 2025; Ottawa, 2024; Rural Municipality of Corman Park, 2025; Toronto City, 2025b).
- La durée de l'intervention dépend directement de la taille du service et de la sévérité du bris, selon la classification tridimensionnelle de l'outil (bris mineur, moyen ou majeur (transport)).

La géolocalisation de chaque bris, combinée aux données du Recensement canadien des services d'incendie 2024, permet d'associer automatiquement chaque incident au type de service d'urgence correspondant à sa localisation réelle.

5.8 Coûts des dommages matériels liés aux bris de conduites d'aqueduc

5.8.1 *Champs d'application*

Cette catégorie de coûts est comptabilisée lorsque l'infrastructure endommagée est une conduite d'eau ou un égout. Elle vise à capturer les dommages collatéraux matériels causés aux tiers par l'inondation non contrôlée qui résulte d'un bris de conduite : dégâts aux sous-sols et fondations de maisons, dommages aux commerces riverains, véhicules endommagés, détérioration de la chaussée et des infrastructures adjacentes, etc.

Les bris mineurs (service/drop) sont exclus, seuls les bris de niveau moyen (distribution) et majeur (transport) étant susceptibles de générer des dommages collatéraux significatifs.

5.8.2 *Variables et méthodologie de calcul*

La formule de coûts est la suivante

$$C_{dommages_eau} = 3500 \times h_{non\ contrôlée} \times F_{densité} \times F_{diamètre}$$

où :

- 3 500 \$ = coût horaire de base des dommages matériels, représentant l'enveloppe totale de dommages par heure de rupture non contrôlée. Cette

valeur est issue du modèle Wachs Water Service Model, cité dans le rapport de la Water Research Foundation (Raucher et coll., 2017)

- $h_{\text{non contrôlée}}$ = durée du bris non contrôlé (en heures), correspondant à la période pendant laquelle l'eau s'écoule librement avant que le bris soit maîtrisé. Si des valeurs sont renseignées dans le champ OUTAGE_HOURS de la base ORDI, ce sont ces valeurs qui sont utilisées en priorité. En leur absence, des durées par défaut suivantes sont appliquées.
- $F_{\text{densité}}$ = facteur de correction selon le contexte urbain ou rural du bris, reflétant la densité de biens exposés dans la zone d'impact. un facteur de 0,7 pour un dommage dans un milieu rural (densité <400 hab./km²) et un facteur de 1,6 dans un milieu plus densément peuplé.
- $F_{\text{diamètre}}$ = facteur de correction selon la taille de la conduite endommagée, reflétant le débit d'eau libéré et donc l'ampleur potentielle des dommages. On utilise ici les trois amplitudes de bris, mineur ($F_{\text{diamètre}} = 0$), moyen (1) et majeur (2).

5.9 Catégories de coûts indirects considérés selon le type d'infrastructure touchée

L'outil propose une évaluation pour les huit catégories de coûts indirects détaillés plus haut. Toutes ne s'appliquent pas à tous les types d'infrastructure et leur déclenchement peut dépendre de la présence d'une interruption de service (IS) ou non. Le tableau ci-dessous résume les correspondances.

Catégories de coûts indirects considérés selon le type d'infrastructure touchée					
	Électrique	Gaz naturel	Télécommunications	Eau/Aqueduc	Autre/Inconnu
Coûts d'interruption du service électrique	✓ si IS	✓ si IS du gaz			
Coûts d'interruption du service Internet			✓ Si IS		
Coût d'interruption du service d'eau				✓ Si IS	
Coûts de congestion	✓	✓	✓	✓	✓
Coûts des accidents supplémentaires évités	✓	✓	✓	✓	✓
Coûts d'évacuation		✓ Si IS du gaz			
Coûts de déploiement des services d'urgence		✓			
Coûts des dommages matériels liés aux bris de conduites d'aqueduc				✓	

Tableau 1 : Catégories de coûts indirects considérés selon le type d'infrastructure touchée

Ainsi, les coûts de congestion et ceux des accidents évités sont comptabilisés même si le bris n'occasionne pas d'interruption de service. En revanche, en tout temps, ces coûts dépendent de la localisation du bris et du type de route sur laquelle le dommage a eu lieu.

Deux règles de non-double comptage s'appliquent : les coûts d'interruption d'Internet ne sont pas ajoutés lorsqu'ils résultent directement d'une panne électrique (les pertes de productivité associées sont déjà capturées dans les coûts électriques) ; les coûts d'interruption du service de gaz sont implicitement captés dans les coûts d'évacuation et ne sont donc pas calculés séparément.

6 Résultats et analyse des coûts indirects estimés pour le Québec (2023–2025)

6.1 Volume et répartition des incidents

Sur les trois années observées, le nombre total de bris au Québec suit une tendance à la baisse : 729 bris en 2023, 709 en 2024 et 660 en 2025 (en excluant dans chaque cas les activités non autorisées sur les pipelines, qui ne constituent pas de véritables bris au sens de l'outil). Cette diminution progressive, de l'ordre de 9 % sur deux ans, suggère une amélioration globale des pratiques de prévention, même si le volume reste significatif.

Nombre d'événements selon le genre de l'infrastructure concernée			
Type d'infrastructure endommagée	2023	2024	2025
Électricité	64	34	27
Gaz naturel	276	265	288
Télécommunications	332	345	296
Inconnu/autres	57	65	49
NOMBRE DE BRIS TOTAL (excluant les activités non autorisées sur les pipelines)	729	709	660

Tableau 2 : Nombre d'événements selon le genre de l'infrastructure concernée

En termes de répartition par type d'infrastructure, les télécommunications et le gaz naturel dominent largement le portrait, représentant ensemble autour de 85 % des bris selon l'année. Les bris de télécommunications constituent systématiquement la

catégorie la plus fréquente. Les bris électriques, bien que moins nombreux, tendent à diminuer significativement sur la période (-50 % entre 2023 et 2024 et -21 % entre 2024 et 2025).

6.2 Coûts indirects totaux estimés

Les coûts indirects totaux estimés pour le Québec s'élèvent à 47,3 M\$ en 2023, 36,0 M\$ en 2024 et 38,7 M\$ en 2025. Ces chiffres appellent plusieurs observations importantes.

Coûts indirects estimés pour les bris d'infrastructures souterraines au Québec			
	2023	2024	2025
Nombre de bris	729 bris <i>(excluant les 71 activités non autorisées)</i>	709 bris <i>(excluant les 55 activités non autorisées)</i>	660 bris <i>(excluant les 40 activités non autorisées)</i>
Proportion de bris n'ayant pas pu être géolocalisés	5,1 %	2,1 %	4,8 %
Catégorie de coûts			
Coûts d'interruption du service électrique	41 954 999 \$	31 762 756 \$	34 208 609 \$
Coûts d'interruption du service Internet	2400 \$	56 297 \$	14 293 \$
Coûts d'interruption du service d'eau	0 \$	0 \$	0 \$
Coûts de congestion et coûts des accidents supplémentaires évités	230 750 \$	203 820 \$	192 999 \$
Coûts d'évacuation	600 175 \$	243 377 \$	249 442 \$
Coûts de déploiement des services d'urgence	4 536 115 \$	3 694 464 \$	4 036 138 \$
Coûts des dommages matériels liés aux bris de conduites d'aqueduc	0 \$	0 \$	0 \$
COÛTS INDIRECTS TOTAUX	47 324 439 \$	35 960 714 \$	38 701 481 \$

Tableau 3 : Coûts indirects estimés pour les bris d'infrastructures souterraines au Québec

On constate une prédominance des coûts dus à l'interruption du service électrique, qui représentent à eux seuls entre 88 % et 89 % des coûts indirects totaux chaque année (41,9 M\$ en 2023, 31,8 M\$ en 2024 et 34,2 M\$ en 2025). Ce résultat s'explique

par deux mécanismes combinés. D'une part, les bris directs sur les infrastructures électriques, bien que peu fréquents (4 % à 9 % des incidents), génèrent des coûts unitaires très élevés en raison du grand nombre de clients touchés simultanément et de la valeur économique élevée de l'électricité, notamment pour les clients commerciaux et industriels. D'autre part, et c'est un facteur structurellement important, les bris de conduites de gaz naturel avec interruption du service de gaz déclenchent également le calcul des coûts électriques, en raison des coupures préventives d'électricité imposées par les protocoles de sécurité. Or, le gaz naturel représente 35 à 41 % des incidents sur la période — c'est la deuxième catégorie la plus fréquente. Ainsi, les coûts d'interruption électrique reflètent non seulement les dommages directs aux réseaux électriques, mais aussi l'ensemble des situations où une interruption de gaz entraîne une coupure électrique connexe.

Ce mécanisme permet également d'éclairer un phénomène a priori contre-intuitif : la hausse des coûts indirects totaux entre 2024 et 2025 (de 36,0 M\$ à 38,7 M\$, soit +7,6 %), malgré une baisse du nombre total de bris (de 709 à 660, soit -7 %). Cette apparente contradiction s'explique par la composition des incidents : en 2025, la part des bris de gaz naturel augmente significativement (de 35 % à 41 % des incidents), ce qui accroît mécaniquement le nombre de situations déclenchant à la fois les coûts de déploiement des services d'urgence et les coûts d'interruption électrique préventive. Ce phénomène montre que le volume total brut de bris est un indicateur imparfait de l'impact économique réel — c'est la nature et la composition des incidents qui déterminent en grande partie le niveau des coûts socio-économiques.

Finalement, on constate que les coûts des dommages matériels liés aux bris de conduites d'aqueduc et les coûts liés à l'interruption du service de l'eau sont nuls pour le Québec puisqu'aucune municipalité (les propriétaires de ce type d'infrastructures) ne compile ces dommages dans la base de données ORDI.

7 Portée, limites et valeur stratégique de l'outil

7.1 Des estimations précises, mais conservatrices

Les résultats produits par la version 2026 de l'outil constituent des estimations plus précises et méthodologiquement cohérentes que celles de la version précédente développée en 2015. Ils reposent sur un cadre d'évaluation scientifiquement validé et reproductible, combinant les données d'incidents de la base ORDI avec des informations économiques et démographiques au niveau des ménages et des

entreprises, issues des recensements de Statistique Canada à l'échelle des subdivisions de recensement.

Il importe cependant de souligner que ces estimations sont très conservatrices et représentent une borne inférieure des coûts réels. Plusieurs facteurs structurels limitent la capacité de l'outil à capturer l'intégralité des impacts socio-économiques des dommages aux infrastructures souterraines.

7.2 La qualité des données ORDI : le principal défi

La qualité et la complétude des données de la base ORDI constituent le principal facteur limitant de la précision des estimations. Sans des données plus complètes et standardisées, même les modèles les plus raffinés ne peuvent pas saisir pleinement les coûts réels des dommages. Plusieurs lacunes structurelles ont été identifiées :

- **Déclaration volontaire et sous-déclaration structurelle.** Les bris sont consignés dans la base ORDI sur une base volontaire par les propriétaires d'infrastructures. Une proportion inconnue des dommages réels n'est donc jamais déclarée, ce qui conduit à une sous-estimation systématique du nombre d'incidents et, par conséquent, des coûts totaux. Cette limite est inhérente au mode de fonctionnement de la base et ne peut être corrigée par l'outil lui-même : elle appelle une amélioration des pratiques de déclaration à la source.
- **Couverture géographique incomplète.** Certaines provinces canadiennes ne disposent pas de base de données ORDI, ou leur taux de participation est insuffisant pour produire des estimations représentatives. Les résultats de l'outil ne peuvent donc pas être généralisés à l'ensemble du territoire canadien sans tenir compte de ces lacunes de couverture.
- **Données manquantes ou mal renseignées.** De nombreux enregistrements dans ORDI contiennent des informations manquantes, incomplètes ou incohérentes — notamment la durée de l'interruption de service, le nombre de clients affectés, le type d'infrastructure touchée ou le statut d'interruption de service. Bien que l'outil dispose d'une stratégie d'imputation pour pallier certaines de ces lacunes, les valeurs substituées restent des approximations qui introduisent une incertitude dans les résultats. Plusieurs variables clés sont fréquemment renseignées comme *Unknown* ou codées « 99 ». Or cette dernière valeur de 99 est utilisée dans certaines provinces pour des variables comme la durée de l'interruption de service pour indiquer « inconnu ou non collecté » et non pas une durée réelle de 99 heures. Un autre exemple

particulièrement éloquent est celui des bris de gaz naturel en Ontario : sur environ 1 900 incidents de gaz recensés dans la base, près de 1 850 ont la variable « interruption de service » renseignée comme *Unknown*. Nous avons développé une solution méthodologique robuste et défendable pour inclure une proportion de ces événements, mais cet exemple illustre à quel point une seule variable systématiquement mal renseignée peut invalider les résultats pour une province entière.

- **Perte de précision liée au stockage des réponses par plages.** Un problème structurel a été identifié dans la manière dont le système ORDI enregistre certaines variables lorsque l'utilisateur doit choisir parmi des plages de valeurs plutôt qu'une valeur exacte. Pour des variables comme le nombre de clients affectés, la durée de l'interruption ou le coût de réparation, l'utilisateur doit choisir entre différentes fourchettes proposées — par exemple « 1 à 6 heures ». Or, seule la borne inférieure de cette plage est stockée dans la base de données — soit « 1 heure » dans cet exemple. Concrètement, tous les incidents d'une durée comprise entre 1 et 6 heures apparaissent dans ORDI comme des incidents d'une heure. Puisque la durée de l'interruption est l'une des variables les plus déterminantes dans le calcul des coûts électriques notamment, ce biais systématique vers la borne inférieure entraîne une sous-estimation structurelle des coûts. Nous avons programmé l'outil pour prendre plutôt le centre de chaque plage afin de palier à ce problème.
- **Géolocalisation impossible.** Certains incidents ne peuvent pas être géolocalisés, en raison d'adresses manquantes, erronées ou trop imprécises pour permettre un géocodage fiable. À titre indicatif, sur les trois années analysées pour le Québec, cette proportion oscille entre 2,1 % et 5,1 % des bris. Ces incidents sont alors exclus des calculs dépendant de la localisation — notamment les coûts de congestion, d'accidents routiers, d'évacuation et de services d'urgence — ce qui conduit à une sous-estimation des coûts pour ces incidents.

Ces quatre catégories de limites convergent vers un constat fondamental : même un modèle méthodologiquement solide ne peut compenser des données d'entrée structurellement défaillantes ou incomplètes. Donc, plus les données saisies dans ORDI sont complètes, précises et standardisées, plus les estimations de coûts produites par l'outil sont crédibles et exploitables.

Chaque amélioration de la qualité de saisie, qu'il s'agisse de mieux renseigner le statut d'interruption, de standardiser les adresses, se traduit directement par des

estimations plus précises, plus représentatives et plus mobilisatrices pour l'action en matière de prévention.

7.3 Valeur stratégique pour les parties prenantes et les décideurs

Au-delà des chiffres eux-mêmes, l'outil présente une valeur stratégique importante pour l'ensemble des acteurs impliqués dans la prévention des dommages aux infrastructures souterraines. Trois usages principaux se dégagent.

- **Guider les investissements en prévention fondés sur des données probantes.** En rendant visibles et mesurables les coûts socio-économiques des dommages, l'outil permet de comparer objectivement le coût d'un bris avec le coût des mesures préventives qui auraient pu l'éviter. Il offre ainsi une base analytique solide pour prioriser les investissements en prévention là où le retour socio-économique est le plus élevé, en ciblant les types d'incidents les plus coûteux.
- **Fournir une base crédible pour la communication publique.** Les estimations produites par l'outil peuvent alimenter la communication des opérateurs, des régulateurs et des associations sectorielles sur les coûts réels — et souvent méconnus — des dommages aux infrastructures souterraines pour la collectivité. Rendre ces coûts tangibles contribue à sensibiliser le public, les élus et les médias à l'importance de la prévention et du respect des procédures d'appel à un centre de localisation (One Call Center ou Info-Excavation au Québec) avant de réaliser des travaux d'excavation.
- **Soutenir la formation et la sensibilisation des entrepreneurs et des opérateurs.** En illustrant concrètement les conséquences économiques d'un bris selon son type, sa localisation et sa magnitude, l'outil constitue un support pédagogique puissant pour les programmes de formation des excavateurs et des propriétaires d'infrastructures souterraines. Il permet de contextualiser les enjeux de sécurité et de prévention dans un cadre économique concret et chiffré, renforçant ainsi la légitimité des pratiques de travail sécuritaires.

En rendant visibles et quantifiables les perturbations subies par les citoyens, les entreprises et la société en général, l'outil développé par le CIRANO fournit aux décideurs publics et aux acteurs du secteur un appui concret pour orienter les stratégies de prévention et de gestion des risques liés aux infrastructures souterraines.

À mesure que les données s'améliorent à travers l'outil de rapport sur les dommages aux infrastructures souterraines (ORDI), ces estimations deviendront encore plus précises, renforçant ainsi la capacité des acteurs à prévenir les dommages et à protéger la valeur collective des infrastructures.

8 Références

- Aubuchon, C. P., & Morley, K. M. (2013). The Economic Value of Water : Providing Confidence and Context to FEMA's Methodology. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 10(1), 245-265. <https://doi.org/10.1515/jhsem-2012-0081>
- Berkeley Lab. (2025). The Interruption Cost Estimate (ICE) Calculator [Logiciel]. <https://www.icecalculator.com>
- CAA. (2025). Calculateur des coûts d'utilisation d'une automobile [Logiciel]. <https://carcosts.caa.ca>
- Canadian Association of Fire Chiefs. (2024). The State of Fire and Emergency in Canada—Results of the Great Canadian Fire Census 2024. https://cdn.ymaws.com/cafc.ca/resource/resmgr/census_2024/report/Final_Census_2024.pdf
- De Marcellis-Warin, N., Mouchikhine, V., Mahfouf, M., & Lugo Rodriguez, M. (2015). Évaluation des coûts socio-économiques liés aux bris des infrastructures souterraines au Québec—Mise à jour (Nos. 2015RP-18; Rapports de projets). CIRANO. <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2015RP-18>
- Deloitte. (2016). The economic impact of disruptions to Internet connectivity. Deloitte. <https://www.deloitte.com/global/en/Industries/tmt/perspectives/the-economic-impact-of-disruptions-to-internet-connectivity-report-for-facebook.html>
- Edmonton. (2025). Fire Rescue Services Fees and Permits. Fire Rescue Services Fees and Permits
- Électricité Canada. (2025). L'électricité est essentielle. L'état de l'industrie canadienne de l'électricité 2025. https://issuu.com/canadianelectricityassociation/docs/l_electricit_est_essentielle?fr=sZThiYTgzMDA2MjA
- Federation of Canadian Municipalities. (2025). Big City Mayors' Caucus. <https://fcm.ca/en/about-fcm/big-city-mayors-caucus>
- Gilchrist, A., & Allouche, E. (2005). Quantification of social costs associated with construction projects : State-of-the-art review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.04.003>
- Gouvernement du Québec. (2025). Débit de circulation [Jeu de données]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/debit-de-circulation>
- Ministère des Transports. (2023). Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier (Partie 2). <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/guides-formulaires/documents-gestionprojetsroutiers/guide-avantages-couts-projets-publics.pdf>
- Ottawa. (2024). Budget 2025—Investing in what matters, fighting for affordability. <https://documents.ottawa.ca/sites/default/files/2025%20Adopted%20Budget%20Book%20English%20Condensed-AODA.pdf>
- Raucher, R., Henderson, J., & Duckworth, M. (2017). Managing Infrastructure Risk: The Consequence of Failure for Buried Assets. The Water Research Foundation.
- Rural Municipality of Corman Park. (2025). Fire Departments & Rates. <https://www.rmccormanpark.ca/149/Fire-Departments-Rates>

- Seattle Public Utilities. (2006). Role of Customers in Setting Service Levels (ROCISS) Pilot Project Phase II—Research Report.
- Statistics Canada. (2020a). Table 33-10-0304-01 Canadian Business Counts, with employees. <https://doi.org/10.25318/3310030401-eng>
- Statistics Canada. (2020b). Table 36-10-0488-01 Output, by sector and industry, provincial and territorial. <https://doi.org/10.25318/3610048801-eng>
- Statistics Canada. (2021). Tableau 25-10-0060-01 Consommation d'énergie des ménages, Canada et les provinces. <https://doi.org/10.25318/2510006001-fra>
- Statistics Canada. (2022). Census of Population : Canada, Provinces, Territories and Economic Regions (table) Catalogue no. 98-401-X2021008. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/catalogue/98-401-X2021008>
- Statistics Canada. (2023). Census Profile. 2021 Census of Population. Statistics Canada Catalogue no. 98-316-X2021001. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=E> (accessed June 11, 2025).
- Statistics Canada. (2024a). More Canadians commuting in 2024 (The Daily Component of Statistics Canada catalogue no. 11-001-X). Statistique Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/daily-quotidien/240826/dq240826a-eng.pdf?st=KpAds1gA>
- Statistics Canada. (2024b). Table 23-10-0308-01 Vehicle registrations, by type of vehicle and fuel type. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=2310030801>
- Statistics Canada. (2024c). Table 33-10-0764-01 Canadian Business Counts, with employees. <https://doi.org/10.25318/3310076401-eng>
- Statistics Canada. (2024d). Tableau 33-10-0766-01 Nombre d'entreprises canadiennes, avec employés, régions métropolitaines de recensement et subdivisions de recensement, décembre 2024. <https://doi.org/10.25318/3310076601-fra>
- Statistics Canada. (2025a). Recensement de 2021 [Produits de données, Recensement de 2021.]. Statistique Canada. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/index-fra.cfm>
- Statistics Canada. (2025b). Table 18-10-0001-01 Monthly average retail prices for gasoline and fuel oil, by geography. <https://doi.org/10.25318/1810000101-eng>
- Statistics Canada. (2025c). Table 23-10-0308-01 Vehicle registrations, by type of vehicle and fuel type. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=2310030801>
- Statistics Canada. (2025d). Tableau 18-10-0005-01 Indice des prix à la consommation, moyenne annuelle, non désaisonnalisé. <https://doi.org/10.25318/1810000501-fra>
- Statistics Canada. (2025e). Tableau 38-10-0184-01 Préparation aux situations d'urgence. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3810018401>
- Statistics Canada. (2025f). Tableau 33-10-1016-01—Nombre d'entreprises canadiennes, avec employés, régions métropolitaines de recensement et subdivisions de recensement. <https://doi.org/10.25318/3310101601-fra>
- Toronto City. (2025a). About the Road Classification System. <https://www.toronto.ca/services-payments/streets-parking-transportation/traffic-management/road-classification-system/about-the-road-classification-system/>

- Toronto City. (2025b). Fire Prevention & Rescue Fees. <https://www.toronto.ca/community-people/public-safety-alerts/understanding-emergency-services/fees-related-to-fire-prevention-fire-rescue/>
- Toronto Transportation Services. (2013). City of Toronto Road Classification System. https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2018/01/950a-Road-Classification_Summary-Document.pdf
- Transportation Association of Canada. (2017). Geometric Design Guide for Canadian Roads. <https://www.tac-atc.ca/en/knowledge-centre/technical-resources-search/publications/pkg-geodes17b-e/>
- Transports Canada. (2023). Statistiques sur les collisions de la route au Canada : 2023. <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/statistiques-donnees/statistiques-collisions-route-canada/2023/statistiques-collisions-route-canada-2023>
- Transports Canada. (2024). Guide des mesures d'urgence. Transport Canada. <https://tc.canada.ca/fr/marchandises-dangereuses/canutec/guide-mesures-urgence>
- U.S. Department of transportation (Federal Highway Administration). (2011). Work Zone Road User Costs—Concepts and Applications (FHWA-HOP-12-005). <https://ops.fhwa.dot.gov/wz/resources/publications/fhwahop12005/fhwahop12005.pdf>
- U.S. Department of transportation (Federal Highway Administration). (2023). Highway Functional Classification : Concepts, Criteria and Procedures. <https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/hwy-functional-classification-2023.pdf>
- Wood, N., Wilson, R., Jones, J., Peters, J., MacMullan, E., Krebs, T., Shoaf, K., & Miller, K. (2017). Community disruptions and business costs for distant tsunami evacuations using maximum versus scenario-based zones. *Natural Hazards*, 86(2), 619-643. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2709-y>