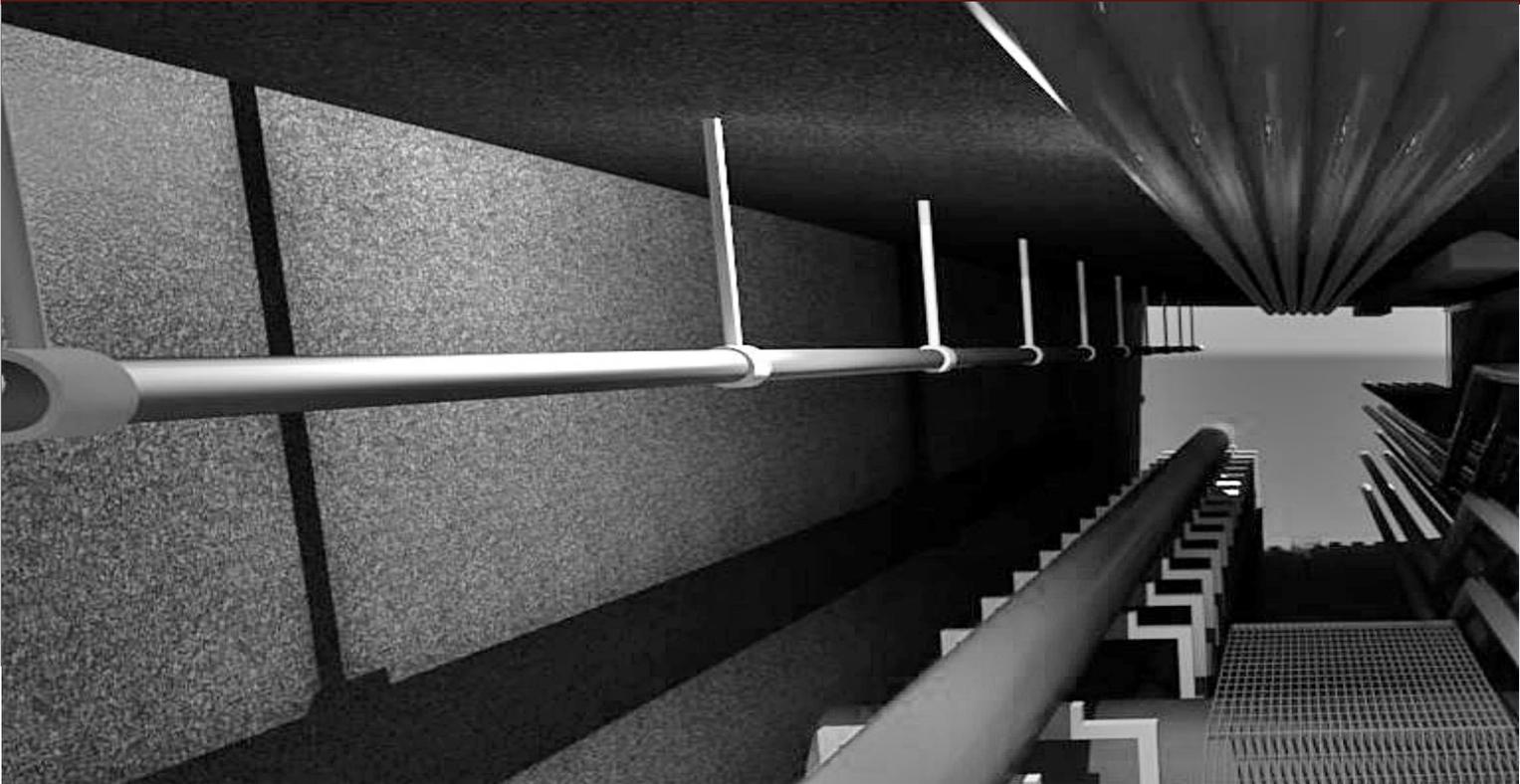


**Identification des zones potentielles de construction de galeries multiréseaux (GMR)  
sur le territoire de la ville de Montréal et avantages associés**

**Rapport final**



**RÉSEAUX  
TECHNIQUES URBAINS**

---

# MISSION DU CERIU

---

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

# AVANT-PROPOS

## LE CERIU

Fondé en 1994, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) est un organisme sans but lucratif **né du besoin de réhabiliter les infrastructures municipales de façon performante et à des coûts acceptables.**

Grâce à l'expertise variée de ses **140 membres organisationnels** regroupant municipalités, entreprises, ministères, laboratoires et institutions d'enseignement et à son approche unique axée sur le partenariat et la concertation, le CERIU est le seul organisme à offrir une perspective intégrée en regard des enjeux reliés aux infrastructures urbaines. Véritable centre d'innovation, le CERIU œuvre à changer les mentalités et les habitudes afin de promouvoir de nouvelles manières de faire plus efficaces et plus économiques ainsi qu'à développer des outils adaptés aux besoins des municipalités et des entreprises de services publics.

## LE CONSEIL PERMANENT RÉSEAUX TECHNIQUES URBAINS (RTU) DU CERIU

Né de la mobilisation des acteurs du milieu, le conseil permanent Réseaux techniques urbains (RTU) du CERIU encourage les meilleures pratiques de planification de travaux, de coordination des interventions et de construction de réseaux techniques urbains par des activités de sensibilisation, de discussion, de formation, de recherche, de veille, de développement et de transfert dans un cadre de développement durable de l'ensemble des infrastructures municipales.

## REMERCIEMENTS

Le Centre d'expertise et de recherches en infrastructures urbaines (CERIU) tient à remercier chaleureusement tous les membres du comité de travail « Identification des zones potentielles de construction de galeries multiréseaux (GMR) sur le territoire de la ville de Montréal et avantages associés – Rapport final » pour leur dévouement et leur précieuse contribution.

Le présent rapport a vu le jour grâce à l'implication et la mise en commun des compétences des participants au comité de projet. Le CERIU remercie l'ensemble de ces personnes ainsi que les organismes qu'elles représentent. Leur apport exceptionnel à la réalisation de ce rapport apporte aux différents intervenants un outil présentant les résultats finaux sur l'identification des zones potentielles de construction de galerie sur le territoire de la ville de Montréal.

Le CERIU remercie particulièrement la ville de Montréal et MITACS qui ont financé cette étude ainsi que l'université Concordia qui a réalisé la recherche et la rédaction.

## L'ÉQUIPE

- Supervision par le conseil permanent Réseaux techniques urbains
- Coordination par Salamatou Modieli, ing., M. Ing, PMP, coordonnatrice de projets, CERIU  
et Michel Saindon, ing., chargé de projet CERIU
- Recherche et rédaction par Ali Alaghbandrad, étudiant au doctorat  
Tersoo Genger, étudiant au doctorat  
Yisha Luo, étudiante à la maîtrise  
supervisés par Amin Hammad, Ph. D, professeur à l'université Concordia

## Membres du comité de suivi

Serge A. Boileau, ing., M. Gest.	CSEM
Jean-Pierre Bossé, ing., DESS.	Ville de Montréal
Martin Gaudette, ing., M. Sc. A.	Ville de Montréal
Dominic Plamondon, ing., M. Ing.	Ville de Montréal
Sacha Volcy	Ville de Montréal

# TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2 EXAMEN DES PUBLICATIONS .....</b>	<b>2</b>
2.1 INTRODUCTION .....	2
2.2 GALERIE MULTIRÉSEAUX (GMR) .....	2
2.3 AVANTAGE DES GMR .....	4
2.4 INCONVÉNIENTS DES GMR .....	6
RÉFÉRENCES .....	6
<b>CHAPITRE 3 CADRE DE LA MODÉLISATION DES DONNÉES SUR LES GMR AUX FINS DE GESTION DU CYCLE DE VIE.....</b>	<b>9</b>
3.1 INTRODUCTION .....	9
3.2 CADRE PROPOSÉ POUR LA MODÉLISATION DES DONNÉES SUR LES GMR (MDGMR) .....	9
3.3 ÉTUDE DE CAS .....	14
RÉFÉRENCES .....	15
<b>CHAPITRE 4 CADRE D'ÉVALUATION ET DE PARTAGE DES COÛTS DU CYCLE DE VIE DES GMR.....</b>	<b>17</b>
4.1 INTRODUCTION .....	17
4.2 MÉTHODE PROPOSÉE .....	17
4.2.1 Phase 1 : Évaluation des économies durant le cycle de vie .....	18
4.2.2 Phase 2 : Partage des coûts du cycle de vie .....	19
RÉFÉRENCES .....	20
<b>CHAPITRE 5 GALERIES MULTIRÉSEAUX INTELLIGENTES.....</b>	<b>21</b>
5.1 INTRODUCTION .....	21
5.2 GMR INTELLIGENTES .....	21
RÉFÉRENCES .....	24
<b>CHAPITRE 6 PRISE DE DÉCISION MULTICRITÈRE POUR LA SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DES GMR .....</b>	<b>26</b>
6.1 INTRODUCTION .....	26
6.2 MÉTHODE PROPOSÉE .....	26
6.3 CRITÈRES DE SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DES GMR (PENG ET COLL.2018) .....	27
6.4 ÉTUDE DE CAS DE SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DE L'EMPLACEMENT DE LA GMR.....	28
6.5 APERÇU DU LOGICIEL .....	31
6.6 VISUALISATION DES RÉSULTATS .....	31
6.7 RÉTROACTION DES INTERVENANTS DANS LE PROJET .....	32

6.8 RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.....	34
RÉFÉRENCES .....	35
<b>CHAPITRE 7 RÉSUMÉ ET TRAVAUX À VENIR .....</b>	<b>36</b>
7.1 RÉSUMÉ .....	36
7.2 TRAVAUX À VENIR .....	36
<b>ANNEXE : LISTE DES PUBLICATIONS .....</b>	<b>38</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Emplacement des GMR bâties à différentes époques .....	3
Figure 3.1 Méthodologie de recherche .....	10
Figure 3.2 Principaux éléments d'une GMR .....	14
Figure 3.3 Vue souterraine d'un exemple de MDGMR dans Infracore.....	15
Figure 4.1 Méthode d'évaluation des économies et de partage des coûts du cycle de vie des GMR	18
Figure 5.1 Système de GMR intelligent .....	22
Figure 5.2 Intégration des données de surveillance (adapté de Lee et coll., 2018) .....	23
Figure 6.1 Modèle de PDM .....	27
Figure 6.2 Zone d'étude .....	29
Figure 6.3 Segments de rue sélectionnés dans l'étude de cas .....	30
Figure 6.4 Fenêtre contextuelle présentant le nom de la rue et son pointage .....	31
Figure 6.5 Interface principale.....	32

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 2.1 Avantages des GMR pour les fournisseurs de services publics et les municipalités .....	4
Tableau 2.2 Avantages des GMR pour les utilisateurs (avantages sociaux et environnementaux).....	5
Tableau 3.1 Besoins en renseignements sur la structure de la galerie .....	11
Tableau 3.2 Besoins en renseignements concernant les conduites .....	12
tableau 3.3 Besoins en renseignements concernant les câbles.....	13
Tableau 6.1 Pointages totaux des dix emplacements sélectionnés après normalisation.....	30

## **AVANT-PROPOS**

Nous aimerions remercier le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) pour son soutien et MITACS pour avoir financé ce projet de recherche. De plus, nous souhaitons adresser nos remerciements à monsieur Michel Saindon et à madame Salamatou Modieli Amadou du CERIU, à monsieur Serge Boileau de la Commission des services électriques de Montréal (CSEM) et à messieurs Martin Gaudette, Jean-Pierre Bossé et Sacha Volcy de la Ville de Montréal pour leur aide afin que ce projet aboutisse et les données du SIG sur Montréal qu'ils nous ont fournies. Enfin, nous souhaitons remercier les représentants des différents opérateurs de réseau qui ont participé aux entrevues et nous ont fait profiter de leur opinion d'expert au sujet des poids des critères utilisés dans le modèle de prise de décision multicritère pour la sélection de l'emplacement des GMR.

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La protection des réseaux de service public contre les dommages, à la fois sous la surface et au-dessus, ainsi que les opérations de maintenance et de réparation effectuées sur ces réseaux tout au long de leur durée de vie constituent un problème depuis des années. Les zones urbaines sont le lieu de nombreuses fermetures de rues et perturbations de la circulation en raison des excavations nécessaires à ces interventions souterraines. Ces travaux ont des coûts importants pour les entreprises de services publics, les citoyens – en tant qu'utilisateurs des rues – et les commerces locaux. Nombre d'entre eux peuvent se dérouler en même temps sur différents réseaux (p. ex. câbles de télécommunications et électriques, réseaux de distribution d'eau et égouts). Outre les coûts pour les utilisateurs, ils sont également coûteux pour la ville et pour les propriétaires des réseaux techniques urbains, qui doivent procéder à des excavations et réparer ou rénover les réseaux souterrains tout au long du cycle de vie de ces derniers. Le coût élevé de ces travaux d'infrastructure souterraine a incité les chercheurs à se pencher sur des solutions possibles. Il est possible de regrouper les travaux en planifiant des interventions simultanées sur plusieurs réseaux souterrains dans le cadre d'un même projet. Toutefois, les galeries multiréseaux (GMR) assurent à la fois la protection et l'accessibilité des réseaux publics souterrains. Ce rapport résume une étude sur la détermination des zones d'implantation possibles et les avantages connexes des GMR sur le territoire de la Ville de Montréal.

Du point de vue des organisations et en raison du partage des coûts, pour convaincre les opérateurs de réseau de participer à un projet de GMR, il faudrait que ces galeries soient plus économiques et que leurs avantages soient équitablement répartis. L'analyse des coûts du cycle de vie (CCV) des GMR et des réseaux enfouis est complexe en raison de la variété des facteurs qui influent sur ces coûts. Par conséquent, nous proposons au chapitre 2 de concevoir (a) un modèle complet et systématique d'analyse du CCV des GMR et des réseaux enfouis qui tient compte des facteurs influents et (b) une méthode de partage des coûts des GMR visant à démontrer aux décideurs des opérateurs de réseau que ces galeries constituent une méthode économique pour leur organisation et que les organisations en profitent toutes équitablement.

En raison de leurs coûts initiaux de construction élevés, les GMR devront être en service pendant de longues périodes (p. ex. 100 ans). Par conséquent, afin d'améliorer leur maintenance et leur sécurité, il est nécessaire de surveiller les galeries et les réseaux qu'elles abritent. Si les avantages des GMR sont bien connus, leur mise en œuvre a de fortes chances d'aider à rendre les villes plus intelligentes, plus durables et résilientes. En effet, les GMR peuvent être équipées de capteurs permettant une maintenance améliorée et plus sûre, et donc jouer le rôle de systèmes d'infrastructure intelligents dans le futur. Au chapitre 3, nous passons en revue les besoins des GMR intelligentes et les éléments associés, comme les capteurs, le contrôle des galeries et la gestion et l'analyse des données, et nous proposons un cadre pour ces exigences. Nous proposons également une méthode pour étendre la norme IFC (Industry Foundation Classes) afin de l'adapter aux GMR intelligentes. Le chapitre 4 établit un cadre d'évaluation et de partage des coûts du cycle de vie des GMR. Le chapitre 5 introduit le concept de GMR intelligente. Le chapitre 6 examine la méthode de prise de décision multicritère pour la sélection de l'emplacement des GMR et le logiciel conçu à cette fin. Enfin, le chapitre 7 présente les conclusions et les travaux à venir.

## CHAPITRE 2 EXAMEN DES PUBLICATIONS

### 2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur l'examen des publications concernant l'historique, les avantages et les inconvénients des galeries multiréseaux (GMR). Les détails du chapitre se trouvent dans l'article suivant :

Luo, Y., A. Alaghbandrad, T. K. Genger et A. Hammad (2020). « History and recent development of multi-purpose utility tunnels », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 103, Pergamon. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103511>.

### 2.2 GALERIE MULTIRÉSEAUX (GMR)

Selon Canto-Perello et Curiel-Esparza (2013), une GMR est une « infrastructure souterraine contenant un ou plusieurs réseaux publics, et permettant l'installation, la maintenance et le retrait de ces réseaux sans ouverture de tranchée ou excavation » [traduction libre]. Le rôle des GMR dans la réduction de l'encombrement de la circulation routière est mis en lumière dans plusieurs études (Cano-Hurtado et Canto-Perello, 1999; Curiel-Esparza et coll., 2004). Le recours aux GMR pour intégrer les réseaux de services publics municipaux, comme les conduites de gaz, d'eau et d'égout et les câbles électriques et de télécommunications, offre de nombreux avantages pour les opérateurs de réseau comme pour les citoyens.

L'histoire contemporaine des GMR remonte au XIX<sup>e</sup> siècle (Laistner et Laistner, 2012); à cette époque et au XX<sup>e</sup> siècle, elles étaient couramment de section rectangulaire ou semi-circulaire. Rogers et Hunt (2006) catégorisent les GMR selon leur profondeur d'aménagement : affleurantes : recouvrement de 0,0 m; à faible profondeur : recouvrement de 0,5 à 2 m; et profondes : recouvrement de 2 à 80 m. La figure 2.1 illustre l'emplacement des GMR bâties à différentes époques.

En ce qui concerne la conception et la construction, le béton coulé sur place et les segments préfabriqués de béton renforcé de fibre de verre sont les deux méthodes couramment utilisées, chacune présentant des avantages et des inconvénients (Clé de Sol, 2005; AKpipe, 2017; Ramírez Chasco et coll., 2011). Si la technique du béton coulé sur place est simple et offre plus de flexibilité quant à l'exécution, elle est en revanche plus longue. La méthode des segments préfabriqués de béton renforcé de fibre de verre offre plus de rapidité et de qualité, mais le transport des segments et la faiblesse potentielle des joints posent problème (Clé de Sol, 2005). Certaines sources mentionnent également des GMR en acier circulaire (Brigham Young University, 2015; Laistner et Laistner, 2012).

Les GMR ont fait l'objet de plusieurs études dans le monde. Au Royaume-Uni, Hunt et coll. (2014) ont analysé leurs coûts et les ont comparés à ceux des réseaux enfouis. En France, Clé de sol (2005) a produit un manuel sur les différents volets des GMR, comme les coûts et le financement, la gestion, la sécurité ou les aspects techniques. En Allemagne, Laistner et Laistner (2012) ont comparé les coûts de construction et d'exploitation et la durée de vie prévue des réseaux entre les réseaux enfouis et les GMR. Aux États-Unis, le National Research Council (2013) a étudié les avantages des GMR et les obstacles à leur développement dans ce pays. En Espagne, Canto-Perello et coll. (2016) ont élaboré un modèle d'analyse de la planification des GMR en milieu urbain selon le principe des forces,

faiblesses, possibilités et menaces (FFPM) et au moyen de la méthode d'analyse hiérarchique multicritère (AHM). Canto-Perello et Curiel-Esparza (2003) ont quant à eux analysé les risques des GMR dans les zones urbaines. En Corée, Kang et Choi (2015) ont employé une analyse coûts-avantages pour étudier la faisabilité économique des GMR.



(a) XIX<sup>e</sup> siècle (3 GMR)



(b) 1921 à 1960 (11 GMR)



(c) 1961 à 1980 (30 GMR)



(d) 1981 à 2000 (36 GMR)



(e) 2001 à 2019 (100 GMR)

**Figure 2.1 Emplacement des GMR bâties à différentes époques**

## 2.3 AVANTAGE DES GMR

Les municipalités, mais aussi les fournisseurs de services publics privés, peuvent tirer des avantages considérables des GMR. Ces avantages sont présentés au tableau 2.1.

**Tableau 2.1 Avantages des GMR pour les fournisseurs de services publics et les municipalités**

Avantage	Avantages secondaires
Réduction importante des coûts de construction	● Réduction importante des travaux d'excavation <sup>1,2,3</sup>
	● Réduction importante des coûts de pose des réseaux <sup>4</sup>
	● Réduction importante des réparations de routes et de trottoirs <sup>5</sup>
	● Réduction importante des coûts de contrôle de la circulation <sup>6</sup>
	● Réduction importante des dommages aux routes de déviation dus à l'augmentation de la circulation <sup>7</sup>
Amélioration de l'inspection et de la maintenance des réseaux <sup>4,5,15</sup>	
Économies sur les coûts de développement et de mise à niveau <sup>9,10,15</sup>	
Minimisation des dommages et de la corrosion des réseaux	● Réduction importante des dommages aux autres structures lors des travaux de construction <sup>4</sup>
	● Réduction importante de la corrosion des réseaux <sup>11</sup>
Réduction importante des blessures et décès dus aux accidents de travail <sup>8,12</sup>	
Réduction importante des pertes de revenus pour la municipalité	● Réduction importante des pertes de revenus tirés des parcomètres <sup>8,13</sup>
	● Réduction importante des pertes de revenus tirés des tickets de stationnement <sup>8,13</sup>
	● Réduction importante des pertes de recettes fiscales provenant des entreprises <sup>6,13</sup>
Meilleure planification de l'infrastructure souterraine <sup>14</sup>	

### RÉFÉRENCES :

1 Cano-Hurtado et Canto-Perello (1999)  
 2 Laistner (1997)  
 3 Rogers et Hunt (2006)  
 4 Canto-Perello et Curiel-Esparza (2013)  
 5 Hunt et coll. (2014)  
 6 Gilchrist et Allouche (2005)  
 7 Najafi et Kim (2004)  
 8 Ormsby (2009)

9 ITA (2010)  
 10 Kang et Choi (2015)  
 11 Canto-Perello et Curiel-Esparza (2003)  
 12 CERIU (2010)  
 13 De Marcellis et coll. (2013)  
 14 Sterling et coll. (2012)  
 15 Clé de Sol (2005)

Les avantages sociaux et environnementaux offerts par les GMR profitent aux utilisateurs des réseaux et des routes, et de manière générale à tous ceux qui vivent ou font des affaires dans les zones où les GMR sont installées. Ces avantages sont présentés au tableau 2.2.

**Tableau 2.2 Avantages des GMR pour les utilisateurs (avantages sociaux et environnementaux)**

Avantage	Avantages secondaires
Réduction importante de la congestion routière	● Réduction importante des coûts des retards pour les véhicules <sup>3,5,13</sup>
	● Réduction importante des coûts des retards pour les piétons <sup>5</sup>
	● Réduction importante des suppléments des coûts d'exploitation des véhicules <sup>5,6,7</sup>
	● Réduction importante des obstacles au passage des véhicules d'urgence <sup>5,6,7</sup>
Amélioration de la santé	● Réduction importante de la poussière causée par les travaux de construction <sup>6,8,9</sup>
	● Réduction importante du bruit causé par les travaux de construction <sup>3,4,10</sup>
	● Réduction importante des vibrations causées par les travaux de construction <sup>3,7,10</sup>
Réduction importante de la pollution de l'environnement	● Réduction importante de la pollution atmosphérique <sup>3,9</sup>
	● Réduction importante de la pollution des sols <sup>3,9</sup>
	● Réduction importante de la contamination des eaux souterraines <sup>3,8,9</sup>
Amélioration de la sécurité	● Réduction importante des blessures et décès accidentels <sup>5,6</sup>
	● Réduction importante des obstacles au passage des véhicules d'urgence <sup>5,6</sup>
Amélioration de la qualité des services publics et de la satisfaction des utilisateurs <sup>1,2,11</sup>	
Réduction importante des pertes pour les entreprises locales <sup>5,12</sup>	
Réduction importante des dommages et fermetures temporaires des installations récréatives <sup>5</sup>	

RÉFÉRENCES :

1 Cano-Hurtado et Canto-Perello (1999)  
 2 Laistner (1997)  
 3 Rogers et Hunt (2006)  
 4 Najafi et Kim (2004)  
 5 Ormsby (2009)  
 6 CERIU (2010)

7 Najafi et Kim (2004)  
 8 Ormsby (2009)  
 9 Ferguson (1995)  
 10 Jung et Sinha (2007)  
 11 Canto-Perello et coll. 2(2009)

## 2.4 INCONVÉNIENTS DES GMR

Les principaux inconvénients des GMR sont les suivants :

- Montant de l'investissement initial : La construction d'une GMR nécessite un investissement initial bien plus élevé que la méthode classique par tranchée à ciel ouvert et n'est pas abordable pour un opérateur de réseau seul, même avec la possibilité de louer l'espace à d'autres fournisseurs de services publics après la construction (Rogers et Hunt, 2006, Hunt et Rogers, 2014). L'investissement est considérable parce que l'opération requiert davantage de travaux et de ressources pour l'excavation de la galerie (McKim, 1997).
- La méthode de construction est moins connue : La méthode de construction d'une GMR n'est pas bien connue, même si on dispose de plus en plus de connaissances sur le sujet. Ce problème peut s'expliquer par le fait que la méthode de tranchée à ciel ouvert est utilisée depuis longtemps et qu'elle est acceptée par les entreprises et par leurs clients (Rogers et Hunt, 2006).
- Durée de l'interruption des services : La durée de l'interruption des services publics pour la mise hors service des réseaux et la construction des nouvelles GMR peut être un élément déterminant. En raison de la forte densité des réseaux souterrains, il peut être nécessaire d'aménager la GMR en profondeur, au-dessous de ces réseaux, pendant les travaux de construction, afin de maintenir le service (Cano-Hurtado et Canto-Perello, 1999; Hunt et Rogers, 2005).
- Problèmes de compatibilité et de sécurité : La disposition de certains réseaux l'un à côté de l'autre présente un risque élevé en raison de leur incompatibilité (Cano-Hurtado et Canto-Perello, 1999; Hunt et Rogers, 2005). Par exemple, regrouper des conduites de gaz et de câbles électriques pose un risque d'incendie; de même, concentrer des conduites d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux pluviales de gros diamètre présente un risque de pollution de l'eau (Canto-Perello et Curiel-Esparza, 2001; Legrand et coll., 2004; Canto-Perello et coll., 2009). La défaillance d'un réseau peut provoquer des dommages aux autres (Hunt et Rogers, 2014).
- Risques pour la sécurité : La protection des GMR contre d'éventuelles attaques est une préoccupation supplémentaire. Diverses solutions sont envisagées pour accroître la sécurité des GMR : contrôles d'accès, capteurs et systèmes de vidéosurveillance (Canto-Perello et Curiel-Esparza, 2013).
- Problèmes de coordination : Les opérations d'installation et de maintenance requièrent une forte coordination entre les opérateurs de réseau et les municipalités (Canto-Perello et coll., 2009). Puisque les GMR intègrent différents réseaux, comme les câbles électriques et de télécommunications ou les conduites d'eau, d'eaux usées et de gaz, les personnes (techniciens et ingénieurs) et organisations responsables de ces réseaux doivent se coordonner de manière plus étroite qu'avec les systèmes enfouis (Laistner et Laistner, 2012).

## RÉFÉRENCES

AKpipe (2017). *Glass fiber reinforced plastics (GRP) Pipe*, Aria Kavan Trading and Production group, Mashhad, Iran. Sur internet : [www.akpipe.com/news/default.asp?nk=12&maincatid=4](http://www.akpipe.com/news/default.asp?nk=12&maincatid=4) (consulté le 28 août 2017).

Brigham Young University (2015). *MTC Utility Tunnel Design Final Report*, Brigham Young University, Byron & Associates, Andrew Luna, Andy Kirby. Sur Internet :

<http://cecapstone.groups.et.byu.net/sites/default/files/2015Capstone/Reports/Team5.pdf>  
(consulté le 21 juin 2018).

- Cano-Hurtado, J.J., et J. Canto-Perello (1999). « Sustainable development of urban underground space for utilities. Tunnell ». *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 14, n° 3 (juillet-septembre), page 335-340.
- Canto-Perello, J., et J. Curiel-Esparza (2001). « Human factors engineering in utility tunnel design », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 16, n° 3 (juillet), p. 211-215.
- Canto-Perello, J., et J. Curiel-Esparza (2003). « Risks and potential hazards in utility tunnels for urban areas », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, vol. 156, n° 1, p. 51-56.
- Canto-Perello, J., et J. Curiel-Esparza (2013). « Assessing governance issues of urban utility tunnels », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 33 (janvier 2013), p. 82-87.
- Canto-Perello, J., J. Curiel-Esparza et V. Calvo (2009). « Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, n° 2 (mars), p. 185-189.
- Canto-Perello, J., J. Curiel-Esparza et V. Calvo (2016). « Strategic decision support system for utility tunnel's planning applying A'WOT method », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 55 (mai), p. 146-152.
- CERIU (2010). *Guide pour l'évaluation des coûts socio-économiques des travaux de renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout*, Montréal, gouvernement du Québec, MAMROT.
- Clé de Sol (2005). *Guide pratique des galeries multiréseaux*, Voiron Cedex, Éditions Techni.Cités.
- Curiel-Esparza, J., J. Canto-Perello et M. A. Calvo (2004). « Establishing sustainable strategies in urban underground engineering », *Science and Engineering Ethics*, vol. 10, n° 3 (juillet), p. 523-530.
- De Marcellis-Warin, N., I. Peigner, V. Mouchikhine et M. Mahfouf (2013). *Évaluation des coûts socio-économiques reliés aux bris d'infrastructures souterraines au Québec*, Montréal, CIRANO.
- Ferguson, I. (1995). *Dust and Noise in the Construction Process*, Crown Publishing Group.
- Gilchrist, A., et E. N. Allouche (2005). « Quantification of social costs associated with construction projects: state-of-the-art review », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 20, n° 1 (janvier), p. 89-104.
- Hunt, D.V.L., D. Nash, et C.D.F. Rogers (2014). « Sustainable utility placement via Multi-Utility Tunnels », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 39 (janvier), p. 15-26.
- Hunt, D.V.L., et C.D.F. Rogers (2005). « Barriers to sustainable infrastructure in urban regeneration », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, vol. 2, n° 158, p. 67-81.
- ITA (2010). *Electrical and Communication Cables*, International Tunnelling and Underground Space Association. Sur Internet : <http://www.ita-aites.org/index.php?id=196> (consulté le 12 mars 2016).

- Jung, Y.J., et K. Sinha (2007). « Evaluation of trenchless technology methods for municipal infrastructure system », *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 13, n° 2 (juin), p. 144-156, ASCE.
- Kang, Y. K., et C. Choi (2015). « Economic Feasibility of Common Utility Tunnel based on Cost-Benefit Analysis », *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 30, n° 5, p. 29-36.
- Laistner, A (1997). *Utility Tunnels: long-term investment or short-term expense? The new economic feasibility of an old idea*. Conférence internationale No-Dig 1997, Taipei.
- Laistner, A., et H. Laistner (2012). *Utility Tunnels – Proven Sustainability Above and Below Ground*. Actes de REAL CORP 2012, Schwechat, Autriche.
- Legrand, L., O. Blanpain et F. Buyle-Bodin (2004). « Promoting the urban utilities tunnel technique using a decision-making approach », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, n° 1 (janvier), p. 79-83.
- McKim, R.A. (1997). « Bidding strategies for conventional and trenchless technologies considering social costs », *Revue canadienne de génie civil*, vol. 5, n° 24 (octobre), p. 819-827.
- Najafi, M., et K.O. Kim (2004). « Life-cycle-cost comparison of trenchless and conventional open-cut pipeline construction projects ». Actes de la Pipeline Division Specialty Congress 2004, ASCE.
- National Research Council (2013). *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*, The National Academies Press.
- Ormsby, C. (2009). *A framework for estimating the total cost of buried municipal infrastructure renewal projects*. Mémoire de maîtrise, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Université McGill, Montréal, Canada.
- Ramírez Chasco, F. D. A., A. S. Meneses et E. P. Cobo (2011). « Lezkairu Utilities Tunnel », *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 16, n° 2 (mai), p. 73-81.
- Rogers, C.D.F., et D.V.L. Hunt (2006). *Sustainable Utility Infrastructure via Multi-Utility Tunnels*. Actes de la 1<sup>st</sup> International Construction Specialty Conference, Calgary, Canada.
- Sterling, R.L, H. Admiraal, N. Bobilev, H. Parker, J.-P. Godard, I. Vähäaho, C.D.F. Rogers, X. Shi et T. Hanamura (2012). « Sustainability issues for underground space in urban areas », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban design and planning*, vol. 165, n° 4 (décembre), p. 241-254.

## **CHAPITRE 3 CADRE DE LA MODÉLISATION DES DONNÉES SUR LES GMR AUX FINS DE GESTION DU CYCLE DE VIE**

### **3.1 INTRODUCTION**

La modélisation des données du bâtiment (MDB) peut faciliter la conception, la construction et l'exploitation des GMR et améliorer la coordination des opérateurs de réseau. La MDB est « une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation. À ce titre, elle constitue une source de connaissances partagées sur une installation et une base fiable pour les décisions durant l'ensemble de son cycle de vie » [traduction libre] (NIBS, 2007). Elle est toutefois principalement utilisée pour les bâtiments, bien qu'elle ait été étendue à certains ouvrages civils (p. ex. ponts et tunnels). Son emploi pour les GMR n'en est qu'à ses balbutiements et doit être normalisé. De même, elle ne peut pas satisfaire tous les besoins en renseignements relatifs aux GMR parce que (1) les GMR sont des structures souterraines linéaires qui interagissent avec le milieu environnant (p. ex. rues, bâtiments et ouvrages souterrains) et (2) les outils de MDB ne sont pas capables de traiter l'énorme quantité de données en temps réel nécessaires à l'exploitation des GMR (p. ex. capteurs de surveillance de la sécurité, détecteurs de contrôle d'accès et caméras de sécurité). Luo et coll. (2019) affirment qu'il est possible de contrôler les risques des GMR grâce à des capteurs permettant l'exploitation et la maintenance de GMR intelligentes. Par conséquent, la MDB devrait être associée à d'autres outils, comme le système d'information géographique (SIG), des données externes (données pouvant être lues par le logiciel) et les interfaces utilisateur (Lee et coll., 2018). Selon certains cas pratiques, il est possible d'étendre la MDB et de l'intégrer à d'autres procédés pour la conception, la construction et la gestion des systèmes des GMR. Cette extension tirerait profit des ressources disponibles pour les éléments des GMR et les besoins en renseignements les concernant (p. ex. Huck et coll., 1976; Kang et coll., 2014). Cependant, les recherches effectuées jusqu'ici se sont uniquement concentrées sur un ou quelques-uns des aspects des GMR. Ce chapitre cherche à couvrir l'ensemble de ces aspects, y compris les renseignements sur la gestion globale, la conception, la construction et l'exploitation des GMR et sur leur environnement.

Les détails du chapitre se trouvent dans l'article suivant :

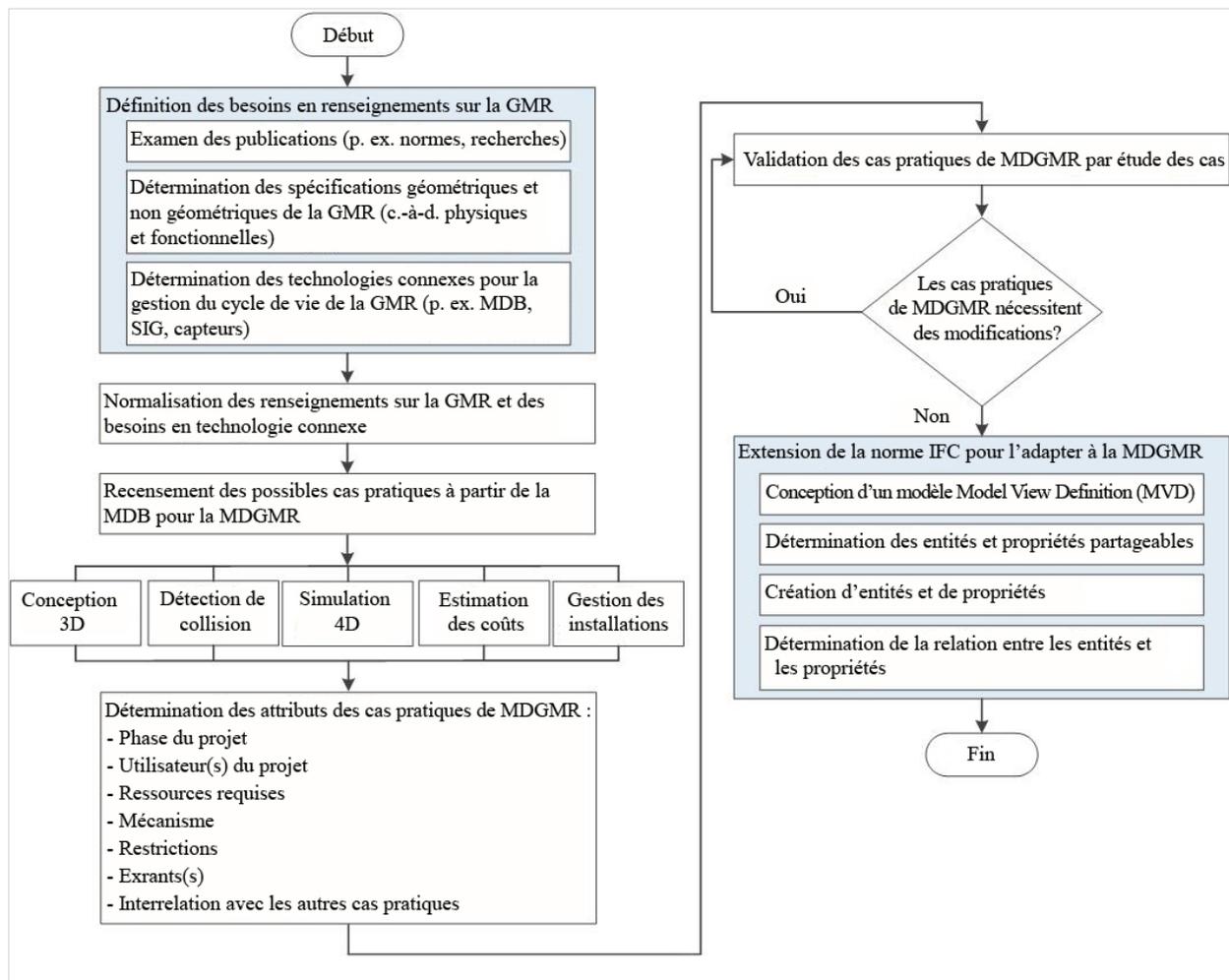
Alaghbandrad, A., et A. Hammad (2018). *Developing Information Model for Multi-Purpose Utility Tunnel Lifecycle Management*. Construction Research Congress 2018, La Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis, American Society of Civil Engineers.

### **3.2 CADRE PROPOSÉ POUR LA MODÉLISATION DES DONNÉES SUR LES GMR (MDGMR)**

Le cadre proposé pour la MDGMR, qui repose sur la MDB 3D-SIG comporte trois étapes : (a) définition des besoins en renseignements relatifs aux GMR, (b) détermination des cas pratiques de MDGMR et (c) extension de la norme IFC pour l'adapter à la MDGMR. La méthodologie de recherche est illustrée à la figure 3.1.

Ce cadre s'appuie sur l'examen des publications, l'opinion d'experts et les ressources concernant les besoins en renseignements sur les GMR; ces besoins étant, par exemple, précisés dans Huck et coll. (1976). Il existe également des normes sur les besoins en données pour la modélisation de galeries

(HB 138 Model Basis, 2012; Ghaznavi, 2013), ainsi que des normes sur les renseignements concernant les réseaux, comme la Pipeline Open Data Standard (PODS), en tant que modèle de données sur les conduites (PODS, 2017); la Common Information Model (CIM)/Distribution Management (IEC61968), pour les réseaux de distribution électrique (IEC, 2003; Wang et coll., 2003); et le Fiber Network Data Model (FNDM), pour les réseaux de télécommunications (FNDM, 2015). Les besoins en renseignements sur la structure de la galerie sont présentés au tableau 3.1; les besoins en renseignements sur les conduites, au tableau 3.2; et les besoins en renseignements sur les câbles, au tableau 3.3.



**Figure 3.1 Méthodologie de recherche**

**Tableau 3.1 Besoins en renseignements sur la structure de la galerie**

Éléments		Besoins en renseignements	
		Particuliers	Généraux
Structure principale		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Carte des réseaux de la galerie</li> <li>● Seuil de charge</li> <li>● Compartiments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Données géométriques (c.-à-d. emplacement, dimensions)</li> <li>● Détails de conception</li> <li>● Méthode de construction</li> <li>● Matériaux</li> <li>● Paramètres d'établissement des coûts</li> <li>● Paramètres de planification</li> <li>● Renseignements sur l'entreprise de maintenance et l'opérateur</li> <li>● Documents, procédures et données (en temps réel ou historiques) d'inspection, de maintenance, de réparation et d'exploitation, et besoins en rapports.</li> </ul>
Fondations			
Puits de fondation			
Structures auxiliaires	Galerie latérale (raccordement des bâtiments)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Espace requis</li> <li>● Besoin en tampon de sécurité des réseaux</li> <li>● Réseaux connectés</li> </ul>	
	Nœuds (intersections de la galerie)		
	Structure d'accès	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Types : point d'arrivée des matériaux, accès des personnes, cheminée de ventilation (c.-à-d. ouverture pour l'air ou le gaz)</li> </ul>	
	Imperméabilisation et drainage	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Besoins en capacité</li> <li>● Endroits nécessitant une imperméabilisation</li> <li>● Caractéristiques du revêtement</li> </ul>	
Remarque : Tous les éléments structuraux de la galerie sont munis de panneaux de signalisation.			

**Tableau 3.2 Besoins en renseignements concernant les conduites**

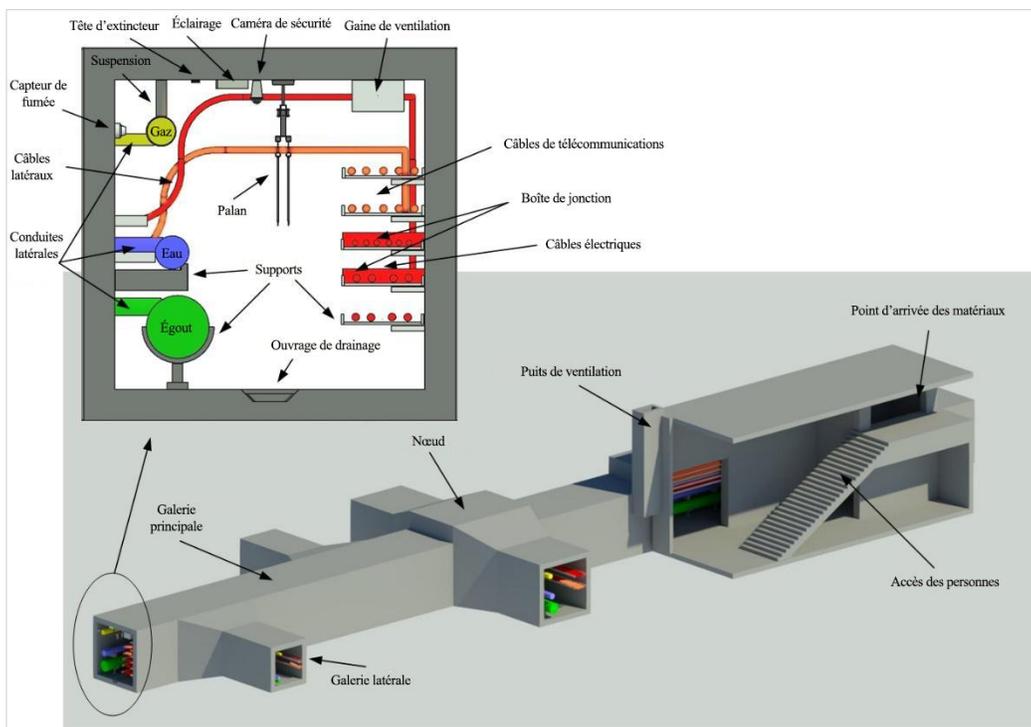
Éléments		Besoins en renseignements	
		Particuliers	Généraux
Eau potable	Conduites	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Caractéristiques hydrauliques (p. ex. rugosité, vitesse)</li> <li>● Modèle de répartition des bornes d'incendie</li> </ul> Surveillance : <ul style="list-style-type: none"> <li>● Débit d'eau mesuré par des compteurs automatiques</li> <li>● Pression d'eau consignée par des cellules manométriques</li> <li>● Qualité de l'eau en temps réel (turbidité, pH, température, chlore, conductivité)</li> <li>● Historique des fuites d'eau</li> <li>● Contamination de l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Caractéristiques des éléments des conduites (p. ex. emplacement, taille, matériaux et revêtements, capacité)</li> <li>● Caractéristiques des systèmes de protection cathodique</li> <li>● Besoins en enquête de détection des fuites</li> </ul>
	Robinets		
	Pompes		
	Compteurs		
	Raccords et joints		
	Bornes d'incendie		
Égout	Conduites	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Caractéristiques hydrauliques (p. ex. pente, rugosité, vitesse)</li> <li>● Surveillance : données des capteurs et historique du niveau ou du débit d'eau, qualité de l'eau (turbidité, température, pH), fuites d'eau, fuites de gaz d'égout.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Analyse des risques</li> <li>● Données sur la consommation d'énergie</li> <li>● Contenu des panneaux de signalisation</li> <li>● Documents, procédures et données (en temps réel ou historiques) d'inspection, de maintenance, de réparation et d'exploitation, et besoins en rapports.</li> </ul>
	Robinets		
	Pompes		
	Compteurs		
	Raccords et joints		
	Siphons		
Gaz	Conduites	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Types de capteurs</li> <li>● Consignes concernant les systèmes de détection de gaz</li> <li>● Système de surveillance du gaz détectant les fuites de gaz et mesurant la pression, la densité, la température et le débit de gaz.</li> </ul>	
	Robinets		
	Compresseurs		
	Compteurs		
	Raccords		
	Cellules manométriques et régulateurs		
	Séparateurs		
Remarque : Toutes les conduites sont munies de supports et de panneaux de signalisation.			

**Tableau 3.3 Besoins en renseignements concernant les câbles**

Éléments		Besoins en renseignements	
		Particuliers	Généraux
Électricité	Câbles	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tension</li> <li>● Modèle de ligne</li> <li>● Modèle de charge de distribution</li> <li>● Modèle de régulateur de tension</li> <li>● Modèle de câble de distribution</li> <li>● Données de surveillance (température du câble, tension, courant, fréquence, état de l'interrupteur et consommation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Caractéristiques des éléments physiques des câbles (p. ex. emplacement, taille, matériaux et revêtements, capacité)</li> <li>● Données sur la consommation d'énergie</li> <li>● Analyse des risques</li> <li>● Contenu des panneaux de signalisation</li> <li>● Documents, procédures et données (en temps réel ou historiques) d'inspection, de maintenance, de réparation et d'exploitation, et besoins en rapports.</li> </ul>
	Régulateur de tension		
	Transformateur		
	Câble de distribution		
	Gaines et conduits		
	Interrupteur		
Télécom.	Câbles	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Types de câbles (p. ex. fibre optique, cuivre)</li> <li>● Réseaux desservis (p. ex. télévision, téléphone, Internet)</li> <li>● Codes de couleur du câblage</li> <li>● Protocole d'étiquetage des câbles et des ports</li> <li>● Surveillance de la température des câbles, de l'entrée d'eau, de l'état de l'interrupteur et des pannes.</li> </ul>	
	Connexion des ports		
	Boucles de maintenance		
	Gaines et conduits		
	Boîtes de branchement		
Remarque : Tous les câbles sont munis de supports et de panneaux de signalisation.			

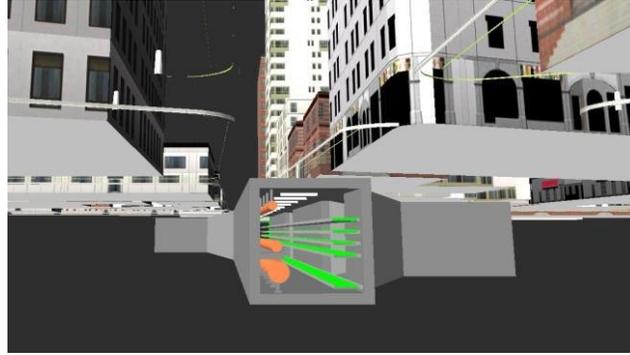
### 3.3 ÉTUDE DE CAS

L'étude de cas s'inspire d'une étude concernant un projet de GMR préfabriquée constituée de modules de 3 m × 3 m et d'une longueur de 250 m sous la rue Ottawa à Montréal, qui accueille des réseaux d'eau, d'égout, de gaz, de télécommunications et d'électricité. La figure 3.2 illustre les principaux éléments d'une GMR.



**Figure 3.2 Principaux éléments d'une GMR**

La carte 3D de la zone est entrée dans le logiciel de SIG (Infraworks, 2019) à partir de CityGML. CityGML est un modèle de données à norme ouverte qui inclut la géométrie, les attributs et la sémantique de différentes sortes d'objets urbains en trois dimensions (p. ex. routes et bâtiments). On ajoute ensuite le modèle de GMR Revit à la carte en attribuant son emplacement sous la rue. La figure 3.3 illustre un exemple de MDGMR dans le logiciel Autodesk Infraworks.



**Figure 3.3** Vue souterraine d'un exemple de MDGMR dans Infraworks

## RÉFÉRENCES

- FNDM (2015). *Fiber Network Data Model*, A. f. Telecommunications. Sur Internet : <http://solutions.arcgis.com/telecommunications/help/fiber-data-model/get-started/DataDictionary/DataDictionary.htm> (consulté le 10 août 2017).
- Ghaznavi, M. (2013). *Developing an Information Modeling Framework for Tunnel Construction Projects*. Mémoire de maîtrise, Université de l'Alberta, Canada.
- HB 138 Model Basis (2012). *Requirements for basic data and models*, Norvège, Administration routière publique, Manuel national d'administration des routes.
- Huck, P. J., M. N. Iyengar, K. S. Makeig et J. Chipps (1976). *Combined Utility/Transportation Tunnel Systems-Economic –Technical and Institutional Feasibility*, n° DOT-TSC-OST-75-50, Département des transports des États-Unis, Bureau du Secrétaire.
- IEC (2003). *Common Information Model (CIM)/Distribution Management*, International Electrotechnical Commission. Sur Internet : <https://www.iec.ch/energies/smart-energy> (consulté le 28 août 2017).
- Infraworks (2019). *Autodesk InfraWorks*. Sur Internet : <https://www.autodesk.com/products/infraworks/overview>.
- Kang, K., J. Lin et J. Zhang (2018). *Monitoring Framework for Utility Tunnels based on BIM and IoT Technology*. 17<sup>th</sup> International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Tampere.
- Lee, P. C., Y. L. Wang et D. Long (2018). « An integrated system framework of building information modelling and geographical information system for utility tunnel maintenance management », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 79 (septembre), p. 263-273.
- Luo, Y., A. Alaghbandrad, T. K. Genger et A. Hammad (2019). « Smart Multi-purpose Utility Tunnels », dans A. Awasthi (éd.), *Sustainable City Logistics Planning: Methods and Applications* (vol. 3), Montréal, Québec, Canada, Nova Publishers. Sur Internet : <https://novapublishers.com/shop/sustainable-city-logistics-planning-methods-and-applications-volume-3/>.

NIBS (2007). *National building information modeling standard- version 1.0 – part 1, Overview, principles and methodologies*, États-Unis, National Institute of Building Sciences (NIBS).

PODS (2017). *Pipeline Open Data Standard (PODS)*. Sur Internet : <https://www.pods.org/pods-model/what-is-the-pods-pipeline-data-model/> (consulté le 10 octobre 2017).

Wang, X., N. N. Schulz et S. Neumann (2003). « CIM extensions to electrical distribution and CIM XML for the IEEE radial test feeders », *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 18, n° 3 (août), p. 1021-1028.

# CHAPITRE 4 CADRE D'ÉVALUATION ET DE PARTAGE DES COÛTS DU CYCLE DE VIE DES GMR

## 4.1 INTRODUCTION

Bien que les GMR possèdent de nombreux avantages, elles ne sont pas très répandues, principalement en raison du coût élevé de leur aménagement et du haut niveau de sécurité et de la plus grande coordination entre les opérateurs de réseau qu'elles nécessitent. Malgré le fort investissement initial qu'elles réclament, elles permettent des économies directes de coûts d'exploitation et sociaux susceptibles de rendre leur coût de cycle de vie (CCV) inférieur à celui des réseaux enfouis classiques. Pour étudier si une GMR est une solution de remplacement aux réseaux enfouis traditionnels économiquement viable pour un projet donné, il faut tenir compte de différents facteurs touchant, en particulier, les caractéristiques des réseaux, l'emplacement du projet et la méthode de construction. Le CCV de chaque méthode dépend de ces facteurs, il est donc nécessaire d'utiliser une approche systématique pour l'estimer et déterminer le point d'équilibre auquel les coûts des deux méthodes sont égaux. La GMR représente une méthode économique quand les coûts de conception et de construction estimés sont inférieurs à ce point d'équilibre.

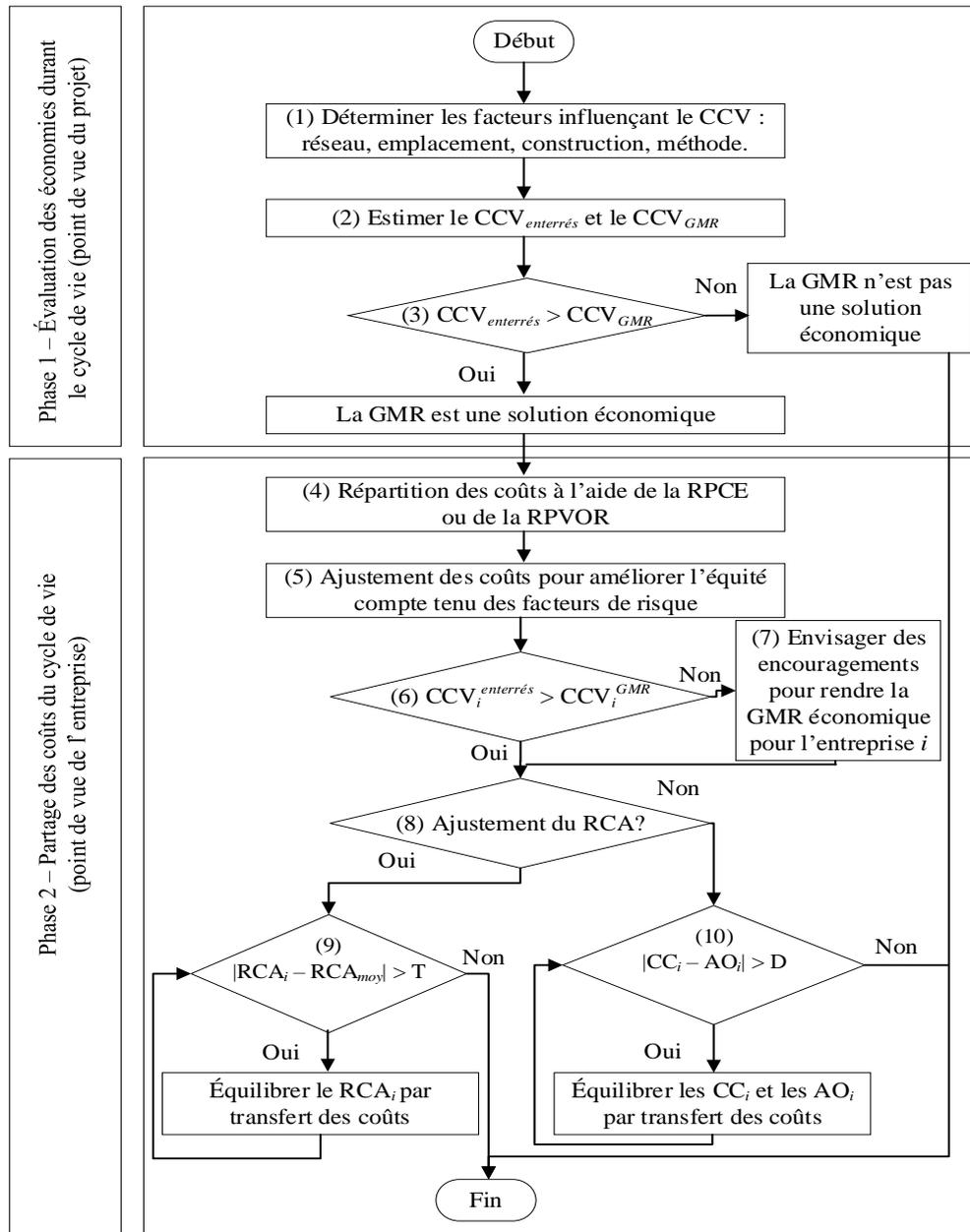
Une fois la décision de lancer un projet de GMR prise, le défi suivant consiste à financer et à partager les coûts du projet (Canto-Perello et Curiel-Esparza, 2013). La GMR doit être plus économique pour tous les opérateurs de réseau et leurs avantages doivent être équitablement répartis pour convaincre ces derniers de participer au projet. Ce chapitre cherche à présenter un modèle complet et systématique d'analyse du CCV des GMR et des réseaux enfouis à partir des caractéristiques des réseaux, des conditions de l'emplacement et de la méthode de construction. Les extrants du modèle déterminent les coûts de conception et de construction de la GMR au point d'équilibre. Le résultat de l'analyse peut faciliter la prise de décision au niveau du projet et peut révéler dans quelles conditions la GMR constitue une option économique. Du point de vue des organisations, ce chapitre propose un modèle de partage des coûts des GMR afin de démontrer aux décideurs des opérateurs de réseau que ces galeries constituent une option économiquement avantageuse et que les organisations profitent toutes équitablement de leurs avantages.

Les détails du chapitre se trouvent dans l'article suivant :

Alaghbandrad, A., et A. Hammad (2020). « Framework for multi-purpose utility tunnel lifecycle cost assessment and cost-sharing », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 104 (octobre), article 103528. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103528>.

## 4.2 MÉTHODE PROPOSÉE

La méthode proposée tient compte des économies procurées par les GMR au niveau du projet (c.-à-d. si on compare le CCV d'une GMR à celui des réseaux enfouis) ainsi que le partage des coûts entre les intervenants. La méthode d'évaluation des économies et de partage des coûts des GMR est représentée à la figure 4.1.



**Figure 4.1 Méthode d'évaluation des économies et de partage des coûts du cycle de vie des GMR**

#### 4.2.1 Phase 1 : Évaluation des économies durant le cycle de vie

Au cours de la première phase, l'évaluation des économies durant le cycle de vie détermine si un projet de GMR est une option économique ou pas. Cette phase comporte les étapes qui suivent.

**Étape 1.** Détermination des facteurs influençant le CCV des GMR et des réseaux enfouis. Ces facteurs se répartissent en trois catégories : (a) caractéristiques des réseaux, soit les facteurs relatifs aux caractéristiques physiques des réseaux; (b) caractéristiques de l'emplacement, soit les facteurs

décrivant les conditions géologiques, l'aménagement urbain et les conditions de l'emplacement du projet touchant les humains et (c) méthode de construction et de maintenance et attributs pertinents des réseaux enfouis et des GMR.

**Étape 2.** Estimation des coûts du cycle de vie des réseaux enfouis ( $CCV_{\text{enfouis}}$ ) et des GMR ( $CCV_{\text{GMR}}$ ). Le CCV est le total des coûts de conception, de construction et de maintenance pendant la durée de vie d'un réseau enfoui ou d'une GMR. Bien que les coûts sociaux ne soient pas assumés par les opérateurs de réseau, ils peuvent être ajoutés au CCV, puisqu'ils sont supportés par les entités publiques (p. ex. municipalités).

Pour évaluer les économies durant le cycle de vie qu'offrent les GMR par rapport aux réseaux enfouis, il faut estimer le CCV de chaque méthode. La *valeur actualisée* (VA) du CCV des réseaux enfouis ( $CCV_{\text{enfouis}}$ ) peut être calculée comme la VA totale des coûts de conception, de construction et d'exploitation (maintenance et réparation) de tous les réseaux. Il faut tenir compte du fait que l'estimation du CCV est influencée par de nombreux facteurs relatifs au réseau, à l'emplacement et à la méthode de construction (Oum, 2017).

**Étape 3.** Pour déterminer si la GMR est une solution de remplacement économique aux réseaux enfouis, le  $CCV_{\text{GMR}}$  doit être inférieur au  $CCV_{\text{enfouis}}$ . Une autre forme d'évaluation économique consiste à calculer la période de récupération d'une GMR. Ce calcul est important étant donné les coûts de construction initiaux élevés des galeries. Durant cette étape, la comparaison entre le  $CCV_{\text{enfouis}}$  et le  $CCV_{\text{GMR}}$  permet de déterminer la faisabilité économique des GMR du point de vue du projet. Il est cependant nécessaire d'approfondir les calculs pour le partage des coûts des GMR (étapes 4 et 5), de s'assurer que les GMR sont économiques pour tous les opérateurs (étapes 6 et 7) et, enfin, d'équilibrer les avantages (étapes 8 à 10). Si le  $CCV_{\text{enfouis}}$  est inférieur au  $CCV_{\text{GMR}}$ , le projet de GMR ne se justifie pas économiquement et peut être ignoré. Toutefois, dans certains cas, un tel projet peut être justifié par d'autres facteurs, par exemple des raisons politiques, juridiques et environnementales ou du fait de l'espace souterrain limité.

#### 4.2.2 Phase 2 : Partage des coûts du cycle de vie

**Étape 4.** Il existe deux méthodes courantes pour attribuer les coûts d'une GMR : la répartition proportionnelle des coûts d'enfouissement (RPCE) (CPAMI, 2011; Xiaoqi et coll., 2011) et la répartition proportionnelle au volume occupé par le réseau (RPVOR) (Xiaoqi et coll., 2011). Cette recherche propose d'utiliser la RPCE pour la conception et la construction, en fonction du principe selon lequel le ratio des coûts de ces deux phases devrait être le même pour chaque opérateur de réseau participant au projet de GMR, comme c'est le cas pour les réseaux enfouis. On présume que les coûts particuliers de chaque opérateur (p. ex. coûts des matériaux, d'installation des réseaux à l'intérieur de la GMR ou de maintenance) seront assumés directement par l'opérateur. Seuls les coûts communs, soit les coûts de construction et de maintenance de la galerie et des services partagés, seront répartis entre les opérateurs. On propose également de recourir à la RRVOR pour l'exploitation parce que le ratio de coûts d'utilisation durant cette phase devrait être déterminé par la proportion du volume occupé dans la GMR.

**Étape 5.** La proximité de certains réseaux (p. ex. gaz et électricité) accroît les risques pour la sécurité à l'intérieur de la GMR. Il est nécessaire de répartir équitablement les coûts de gestion des risques entre les opérateurs de réseau.

**Étape 6.** Après l'ajustement des risques, il faut vérifier que la GMR est une méthode économique pour chaque opérateur de réseau.

**Étape 7.** Pour rendre les GMR avantageuses pour l'opérateur  $i$ , on peut instaurer des encouragements de différentes sortes (p. ex. exemptions fiscales ou subventions), qui sont généralement accordés par la municipalité, principal bénéficiaire de la GMR.

**Étape 8.** Après s'être assuré que tous les participants au projet de GMR tirent profit du projet, on doit répartir équitablement les avantages obtenus entre les opérateurs de réseau. À cette étape, il faut choisir une des deux logiques d'équité de la répartition des avantages obtenus : (a) le ratio avantages-coûts (RAC) équilibré, s'il n'est pas nécessaire d'encourager un opérateur à participer au projet de GMR, puis adopter la logique selon laquelle les coûts les plus élevés ( $CCV_i^{GMR}$ ) doivent produire les meilleurs avantages pour chaque opérateur (étape 9) ou (b) l'équilibrage des avantages apportés et obtenus, si on veut encourager un opérateur de réseau à participer au projet alors que sa contribution est élevée tandis qu'il en retire de faibles avantages (étape 10).

**Étape 9.** Cette étape consiste à équilibrer le ratio coûts-avantages des opérateurs.

**Étape 10.** Les avantages que chaque opérateur  $i$  apporte au projet parce qu'il a choisi la GMR au détriment des réseaux enfouis sont appelés « avantages apportés par l'opérateur  $i$  » (AApp $_i$ ) et peuvent être déterminés à partir de la valeur de Shapeley dans la théorie des jeux coopératifs. Cependant, il n'y a aucune garantie que les avantages obtenus par un opérateur (AO $_i$ ) se rapprochent des avantages apportés.

## RÉFÉRENCES

- Canto-Perello, J., et J. Curiel-Esparza (2013). « Assessing governance issues of urban utility tunnels », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 33 (janvier), p. 82-87.
- CPAMI (2011). *Regulations on Cost Allotment of Common Duct Construction and Management*. Sur Internet : <http://www.cpami.gov.tw/public-information/laws-regulations/10-public-works/10777-regulations-on-cost-allotment-of-common-duct-construction-and-management.html> (consulté le 10 janvier 2018).
- Oum, N. (2017). *Modeling Socio-economic Impacts of Infrastructure Works*, Montréal, Université Concordia.
- Xiaoqin, G., W. Wangzhen et X. Shuailong (2011). « The Incentive Mechanism for Financing of the Municipal Utility Tunnel Construction », *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, vol. 7, n° 4, p. 633-637.

## CHAPITRE 5 GALERIES MULTIRÉSEAUX INTELLIGENTES

### 5.1 INTRODUCTION

Les risques posés par les GMR se répartissent en deux catégories : risques naturels et risques d'origine humaine. Les GMR sont sujettes aux risques naturels, comme les tremblements de terre ou les inondations. Les risques naturels peuvent également découler de problèmes de compatibilité et de sécurité. Disposer certains réseaux incompatibles à proximité les uns des autres peut être extrêmement risqué (Cano-Hurtado et Canto-Perello, 1999; Hunt et Rogers, 2005). Par exemple, le regroupement de conduites de gaz et de câbles électriques crée un risque d'incendie. Par conséquent, la défaillance d'un réseau peut provoquer des dommages aux autres réseaux. La protection des GMR contre d'éventuelles attaques humaines est une autre préoccupation. Diverses solutions sont suggérées pour améliorer la sécurité des galeries, comme réduire le nombre de trappes d'accès, limiter l'accès des personnes et recourir à des capteurs et à des systèmes de surveillance.

Comme elles sont des éléments d'infrastructure de transport, les GMR sont dépendantes de plusieurs systèmes, comme l'alimentation électrique et les services d'urgence. Leur défaillance a des conséquences qui dépassent la simple sécurité, elle a également des répercussions importantes sur l'économie et sur la société dans son ensemble. L'implantation de systèmes de surveillance dans une GMR entraîne des coûts élevés; cependant, les coûts de réfection et de réparation de la galerie et de son équipement ainsi que les coûts économiques et sociaux sont bien plus grands. Par conséquent, les systèmes de détection et de surveillance sont d'une importance cruciale pour éviter les défaillances de l'infrastructure et pour obtenir des structures plus résilientes (Mair et Yeateau, 2016; Li et coll., 2018).

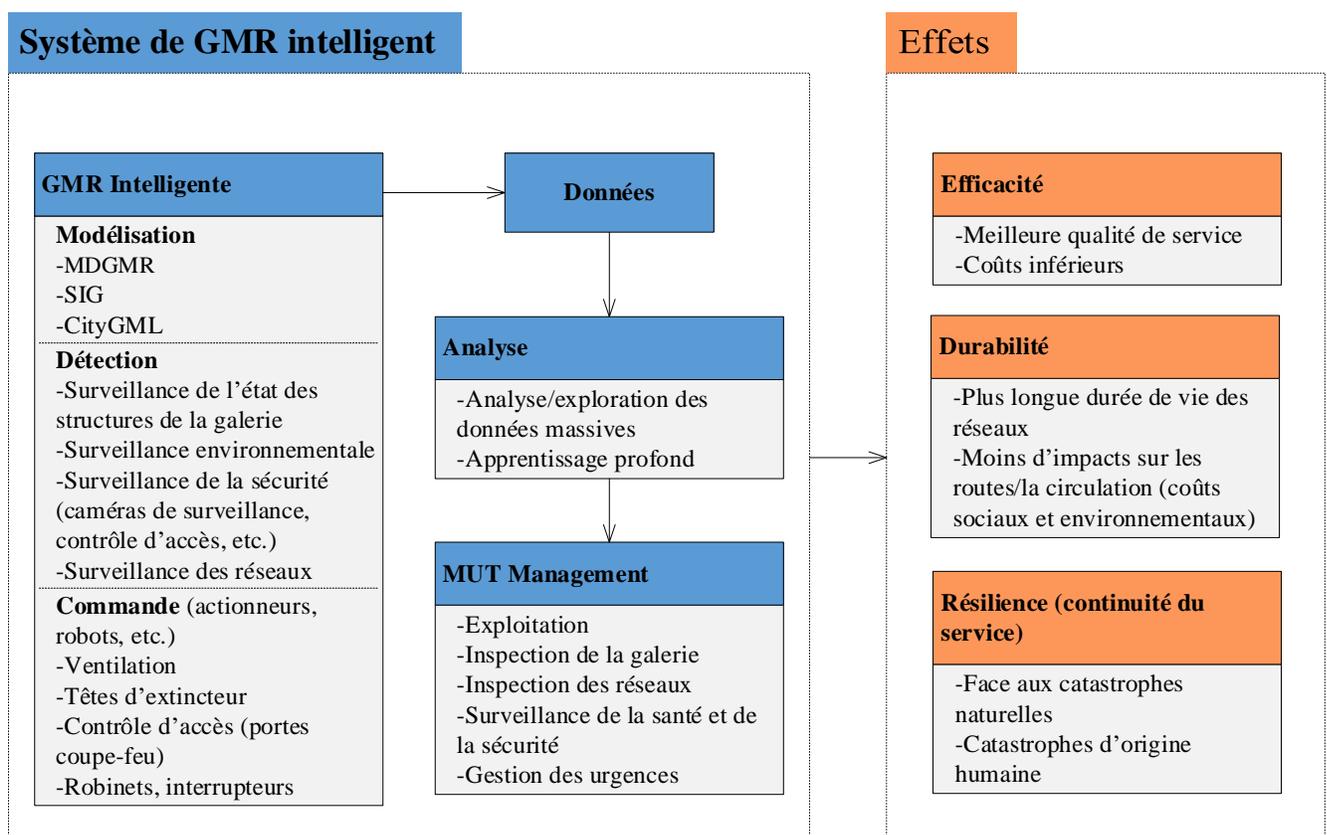
Les détails du chapitre se trouvent dans l'article suivant :

Luo, Y., A. Alaghandrad, T. K. Genger et A. Hammad (2019). Chapitre 3, « Smart Multi-purpose Utility Tunnels », *Sustainable City Logistics Planning: Methods and Applications* (vol. 3), Nova Publishers.

### 5.2 GMR INTELLIGENTES

Répondre aux besoins créés par ces problèmes nécessite de concevoir des GMR intelligentes qui intègrent (1) des systèmes de sécurité et de surveillance, notamment un système de repérage précis; (2) un système d'alarme incluant l'intervention d'urgence et (3) un système d'exploitation et de gestion reposant sur le système d'information géographique (SIG), la modélisation des données du bâtiment (MDB), l'Internet des objets (IoT) et autres technologies (Shahrour, 2017; Zheng et coll., 2016; Zheng et coll., 2017). Les GMR intelligentes sont des structures adaptatives dotées de capteurs, d'actionneurs et de contrôleurs et qui utilisent des systèmes d'analyse et de gestion des données. Elles font appel à la modélisation, à la détection, au contrôle, à l'analyse et à la gestion, comme l'illustre la figure 5.1. Le modèle inclut la modélisation des données sur les GMR (MDGMR), le SIG et CityGML (modèle de données normalisé ouvert et format d'échange). La MDGMR fournit des modèles de galerie, de réseaux, de services auxiliaires, d'éclairage, de chauffage, ventilation et climatisation et d'alimentation électrique. Les données du SIG et de CityGML sont utilisées pour la géovisualisation 3D. Le modèle de GMR complet aidera les utilisateurs et les exploitants à concevoir,

construire, exploiter, géolocaliser, entretenir et gérer la structure. La détection est assurée par des capteurs assurant la surveillance de l'état structural, de l'environnement, de la sécurité et des réseaux de la galerie. Le contrôle concerne la ventilation, les têtes d'extincteurs, l'accès (p. ex. portes coupe-feu), les robinets et les interrupteurs, et s'effectue au moyen d'actionneurs et de robots. Ces dispositifs sont commandés automatiquement dans les cas d'urgence, comme lors d'un incendie. Toutes les données recueillies par les capteurs sont analysées avec les renseignements de modélisation et de contrôle pour permettre l'analyse des données massives du système à l'aide de l'apprentissage machine (p. ex. apprentissage profond), de l'analyse statistique, etc. Elles sont également envoyées à une plate-forme de gestion aux fins d'exploitation, d'inspection, de surveillance de la santé et de la sécurité et de gestion des urgences de la GMR. Les GMR intelligentes assurent à leur propriétaire et aux opérateurs de réseau une gestion contrôlée et sécuritaire, tout en soutenant le développement d'une ville plus efficace, durable et résiliente.



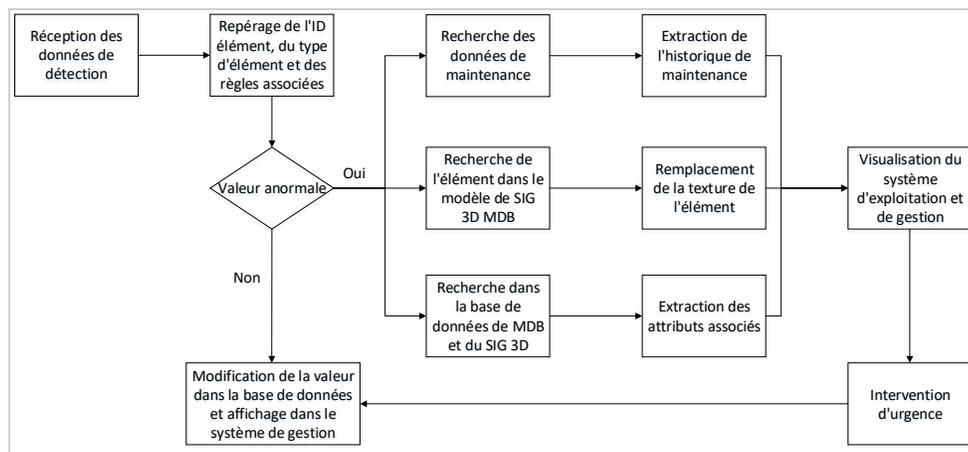
**Figure 5.1 Système de GMR intelligent**

Comme l'illustre la figure 5.2, les données de surveillance sont recueillies par les capteurs et envoyées au système de contrôle. Celui-ci recherche automatiquement dans la base de données les règles concernant les éléments, selon l'identifiant de ces éléments, et détermine si les données de détection respectent ces règles. Si c'est le cas, les éléments sont reconnus comme normaux dans le système d'exploitation et de gestion des données et leurs renseignements sont stockés dans la base de données en tant que données historiques. Si les conditions ne sont pas satisfaites, le système recherche dans la base de données de MDB les renseignements connexes et repère les éléments associés, comme les paramètres, l'emplacement et le milieu environnant des réseaux, puis avertit le

gestionnaire de la GMR. Celui-ci dispose alors d'une visualisation des éléments et des renseignements associés pour prendre une décision. Dans certains scénarios, la GMR répond automatiquement aux situations d'urgence. Par exemple, les systèmes de pompage ou de ventilation se déclenchent automatiquement en cas de fuite de conduite ou lorsque la concentration d'oxygène baisse (Li et coll., 2018; Lee et coll., 2018).

La température, l'humidité et l'éclairage moyens et les données en fonction du temps peuvent être facilement affichés dans le système grâce au modèle MDB. Par exemple, Kang et coll. (2018) se sont servis d'un capteur de température et d'humidité et d'un capteur d'éclairage ambiant analogique dans une salle de réunion. De plus, il est possible d'ajouter d'autres catégories de capteurs, comme des capteurs de gaz et de niveau d'eau, dans l'environnement de la GMR (Kang et coll., 2018). Un autre projet de GMR intelligente a intégré la MDB, le SIG 3D et des capteurs dans le système de gestion et d'exploitation. Le SIG peut fournir des renseignements géologiques, qui sont essentiels à la gestion et à l'exploitation des GMR et des espaces environnants (Lee et coll., 2018).

Un système de gestion de GMR à partir de la MDB complet devrait assurer les fonctions suivantes : (1) interrogation des renseignements sur les services et sur l'équipement associé; (2) contrôle intelligent des conduites et câbles des réseaux; (3) système d'alarme de sécurité; (4) système de surveillance; (5) système de maintenance; (6) simulation d'intervention d'urgence; (7) gestion des dispositifs et (8) gestion de l'administration (Li et coll., 2018).



**Figure 5.2 Intégration des données de surveillance (adapté de Lee et coll., 2018)**

### 5.3 RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Ce chapitre résume les exigences relatives aux GMR intelligentes et les éléments associés, comme les capteurs de sécurité, le contrôle de la galerie et la gestion et l'analyse des données. Les GMR sont sujettes aux risques, qu'il s'agisse de risques naturels ou de risques d'origine humaine. Dans ces circonstances, il est proposé ici un cadre de systèmes de GMR intelligents qui comporte des capteurs et des dispositifs de contrôle. L'utilisation de capteurs dans les GMR intelligentes réduit la nécessité

d'intervention humaine pour la surveillance, l'inspection et le contrôle. Dans les galeries, le contrôle s'effectue grâce à des actionneurs et des robots, qui améliorent la qualité du service et réduisent les coûts globaux. Les données recueillies à partir des dispositifs intelligents permettent une prise de décision efficace et la collaboration entre les propriétaires des réseaux et les gestionnaires municipaux. Les GMR intelligentes sont un composant essentiel des villes intelligentes, car elles en améliorent la durabilité et la résilience.

## RÉFÉRENCES

- Cano-Hurtado, J. J., et J. Canto-Perello (1999). « Sustainable development of urban underground space for utilities », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 14, n° 3 (juillet-septembre), p. 335-340.
- Hunt, D., et C. Rogers (2005). « Barriers to sustainable infrastructure in urban regeneration », *Engineering Sustainability, Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 2, no 158, p. 67-81.
- Kang, K., J. Lin et J. Zhang (2018). *Monitoring Framework for Utility Tunnels based on BIM and IoT Technology*. 17<sup>th</sup> International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Tampere.
- Lee, P., Y. Wang, T. Lo et D. Long (2018). « An integrated system framework of building information modelling and geographical information system for utility tunnel maintenance management », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 78 (septembre), p. 263-273.
- Li, Q., G. Xu et H. Wei (2018). « Research on the Operations Management System of Utility Tunnel Based on BIM », *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, vol. 14, n° 2, p. 287-292.
- Liu, R., et R. R. A. Issa (2012). *3D visualization of Sub-surface Pipelines in Connection with the Building Utilities: Integrating GIS and BIM for Facility Management*. Actes du 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, Clearwater Beach, FL, 17-20 juin 2012, p. 341-348.
- Mair, L., et S. Yatteau (2016). *Promoting Adoption of Smart Infrastructure Solutions in the Transport Sector-Recommendations to the Department for Transport Chief Scientific Advisor*, Cambridge Centre for Smart Infrastructure & Construction. Sur Internet : [http://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/559770/dft-science-advisory-council-condition-monitoring-and-intelligent-infrastructure-report.pdf](http://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/559770/dft-science-advisory-council-condition-monitoring-and-intelligent-infrastructure-report.pdf) (consulté en 2018).
- Shahrou, I. (2017). *How the Smart Technology could help meet the utility tunnels challenges*. International Symposium for Intelligent Transportation and Smart City Conference, Shanghai.
- Wang, T., L. Tan, S. Xie et B. Ma (2018). « Development and applications of common utility tunnels in China ». *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 76 (juin), p. 92-106. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.006>.

Zheng, L., C. Luo et J. Wang (2017). « Review on Intelligent Operation and Maintenance Management of Utility Tunnel », *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, numéro S1, p. 1-10.

# CHAPITRE 6 PRISE DE DÉCISION MULTICRITÈRE POUR LA SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DES GMR

## 6.1 INTRODUCTION

La sélection de l'emplacement est une étape importante de la planification des GMR; elle est compliquée parce qu'elle repose sur plusieurs critères, comme le volume de circulation et la densité des réseaux. Ce chapitre fournit une méthode générale de sélection de l'emplacement des GMR à différentes échelles urbaines (p. ex. rue, district, arrondissement) fondée sur l'analyse spatiale à partir du système d'information géographique (SIG).

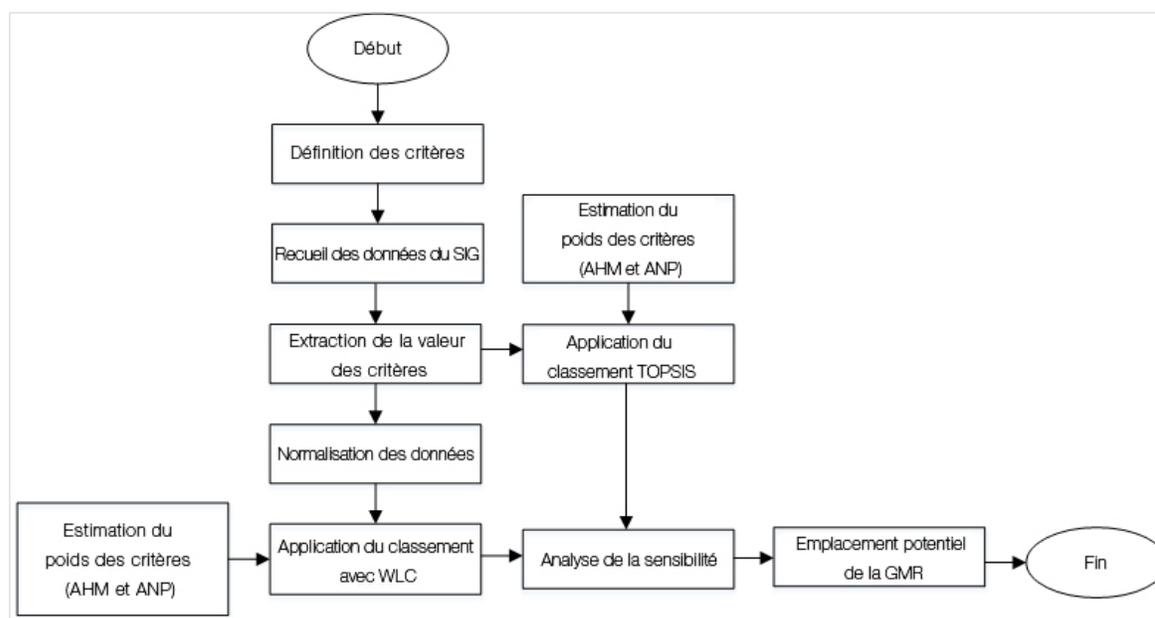
Les détails du chapitre se trouvent dans l'article suivant :

Luo, Y., T. K. Genger et A. Hammad (2020). « Multi-Criteria Decision Making for Multi-purpose Utility Tunnel Location Selection », dans *Pipelines 2020: Planning and Design - Proceedings of Sessions of the Pipelines 2020 Conference*.

## 6.2 MÉTHODE PROPOSÉE

La prise de décision multicritères (PDM) a été utilisée pour sélectionner les emplacements possibles des GMR. Les poids des critères sont calculés au moyen de l'analyse hiérarchique multicritère (AHM) (Saaty, 2008), à partir des réponses à un questionnaire envoyé à des experts de plusieurs organisations (p. ex. Ville de Montréal et Vidéotron). Une fois les pointages calculés pour chaque segment de rue en fonction des données du SIG, ils sont normalisés selon une échelle de 0 à 1. Les poids des critères calculés grâce à l'AHM sont ensuite multipliés par les pointages normalisés pour obtenir un pointage d'évaluation total pour chaque segment de rue. Ces pointages sont ensuite classés de façon à sélectionner les segments dans lesquels la GMR pourrait être construite.

La sélection de l'emplacement des GMR s'effectue au moyen du modèle de PDM. Comme l'illustre la figure 6.1, on commence par déterminer les critères de sélection de l'emplacement de la GMR. Une fois recueillies, les données du SIG sont prétraitées en fonction du segment de rue au moyen d'opérations telles que la fusion de tableaux, la superposition de couches de données et la combinaison des petits segments.



**Figure 6.1 Modèle de PDM**

### **6.3 CRITÈRES DE SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DES GMR (PENG ET COLL.2018)**

- 1) Débit journalier moyen annuel (DJMA) : Les GMR réduiraient la nécessité d'excavations pour la maintenance des actifs souterrains et donc, les retards de déplacements. Par conséquent, elles devraient être construites sous les routes à fort DJMA.
- 2) Classe de route : Comme pour le DJMA, les GMR devraient être construites sous les routes de classe supérieure, telles que les routes nationales, les routes provinciales et les autoroutes.
- 3) Densité des réseaux : Les GMR réduiraient la fréquence des excavations pour la réparation et le remplacement de réseaux souterrains. Par conséquent, elles devraient être construites sous des routes à forte densité de réseaux. La densité des réseaux dépend du nombre total de conduites et de câbles et du niveau des réseaux (c.-à-d. les réseaux principaux dépendent du diamètre des conduites, de la tension des câbles électriques, de la pression des conduites de gaz, etc.).
- 4) Nombre d'excavations prévues pour la réparation des réseaux : Les GMR devraient réduire les besoins d'excavations pour la réparation des réseaux. Par conséquent, la priorité doit être accordée aux rues dans lesquelles un grand nombre d'excavations aux fins de réparation des réseaux sont effectuées. Ce critère peut bénéficier de deux types de données du SIG : (1) le nombre historique d'excavations et (2) les plans d'intervention sur les réseaux et sur les rues.
- 5) Projets d'aménagement souterrains : Les GMR peuvent être construites en même temps que se déroulent des travaux d'aménagement souterrain. Par conséquent, elles devraient être bâties sous des routes sous lesquelles se construisent des passages souterrains, des lignes de métro, des centres commerciaux, etc.
- 6) Densité de population : Pour être économiques, les GMR devraient desservir des secteurs à forte densité de population.

- 7) Utilisation du sol (commerciale, résidentielle, industrielle, etc.) : Les secteurs dont le sol est utilisé de manière variée ont différents besoins en matière de GMR et représentent également un volume d'usagers possibles qui n'est pas compris dans la densité de population.
- 8) Proximité d'établissements publics (hôpitaux, universités et collèges, etc.) : Les établissements publics accueillent de nombreux usagers. Les GMR bâties à proximité d'établissements publics seront donc plus susceptibles d'être économiques.
- 9) Proximité de bâtiments de grande hauteur : Pour les mêmes raisons qu'au critère 8, les GMR devraient être bâties à proximité de bâtiments de grande hauteur parce que le ratio entre le nombre d'utilisateurs finaux et le nombre de raccordements latéraux est supérieur à celui des bâtiments de faible hauteur. En plus, il y a une corrélation entre les bâtiments de grande hauteur et la forte densité de réseaux.
- 10) Type de sol : Le type de sol influe sur la méthode et les matériaux de construction des GMR et donc, peut en accroître les coûts. Par conséquent, les GMR devraient, idéalement, être bâties dans les zones dont le sol est adéquat.
- 11) Pente des réseaux : Les GMR devraient être économiques. Or, l'installation de conduites à écoulement par gravité (p. ex. conduites d'égout) dans ces galeries peut accroître énormément les coûts. Par conséquent, la pente influe sur le choix du type de réseau intégré dans la galerie et donc, sur la sélection de l'emplacement.
- 12) Présence de plaines inondables : La construction de GMR dans des plaines inondables peut fortement accroître les difficultés et les coûts des travaux. Ce critère est une condition élémentaire de la sélection de l'emplacement des GMR. Par conséquent, il n'a pas été inclus dans le questionnaire.

Après étude des 12 critères, nous avons reclassifié les 4 derniers. Il est nécessaire d'étudier la présence de plaines inondables avant de procéder à la PDM pour réduire les coûts et les risques. Le type de sol influe sur les coûts de construction et devrait être considéré après la PDM. La pente influe sur le choix des réseaux (conduites d'égout à écoulement par gravité) à inclure dans la GMR et devrait donc aussi être examinée après la PDM. Les établissements publics sont constitués de bâtiments étendus ou possédant de nombreux étages et peuvent être combinés avec les bâtiments de grande hauteur.

## **6.4 ÉTUDE DE CAS DE SÉLECTION DE L'EMPLACEMENT DE L'EMPLACEMENT DE LA GMR**

La zone d'étude définie dans ce rapport est illustrée à figure 6.2 et s'étend sur neuf arrondissements de Montréal : Ville-Marie, Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, Le Plateau-Mont-Royal, Rosemont-La Petite-Patrie, Outremont, Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce, Le Sud-Ouest, LaSalle et Verdun. Les couches du service de géomatique de la Ville de Montréal contiennent les réseaux d'Hydro-Québec, de gaz, d'eau et d'égout. Les couches de données du SIG provenant de sources ouvertes comprennent les lignes routières, l'utilisation du sol et les établissements publics (établissements de santé, collèges et universités).



**Figure 6.2 Zone d'étude**

Pour tester la méthode, dix emplacements ont été choisis dans l'arrondissement Ville-Marie et les trois arrondissements qui l'entourent. La sélection des emplacements s'appuie principalement sur la topologie de la densité des réseaux, puisqu'il s'agit d'un des critères les plus importants et que les données recueillies pour ce critère sont les plus précises. Les segments de rue mesurent tous environ 200 m afin que les projets de GMR soient d'échelle comparable. Les pointages après normalisation et les pointages totaux après pondération sont présentés au tableau 6.1. Sur les dix emplacements sélectionnés, c'est Sainte-Catherine qui affiche le pointage total le plus élevé. Certains de ces dix emplacements sont présentés à la figure 6.3.

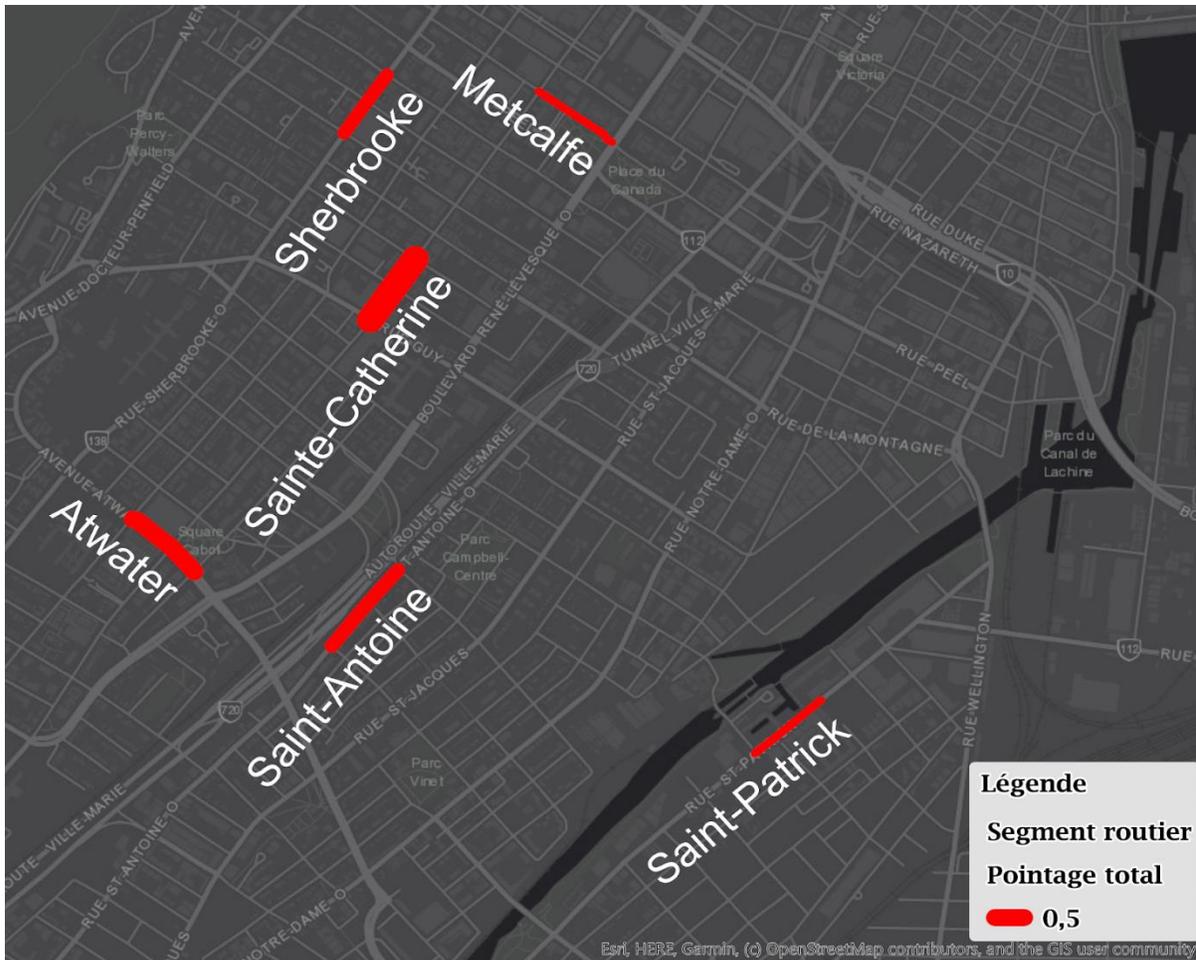


Figure 6.3 Segments de rue sélectionnés dans l'étude de cas

Tableau 6.1 Pointages totaux des dix emplacements sélectionnés après normalisation

Autres emplacements	Sainte-Catherine (bishop à Guy)	Sherbrooke (Stanley à de la Montagne)	René-Lévesque (Panet à de Champlain)	Atwater (Tupper à de Maisonneuve)	Metcalfe (René- Lévesque à Saint- Catherine)	Saint-Antoine (Georges-Vanier à Vinet)	Saint-Patrick (privée à des Seigneurs)	Notre-Dame (Hector-Barsalou à de Boucherville)	Bourbonnière (Rouen à Hochelaga)	Parc (Villeneuve à Saint-Joseph)
ID segment de rue	23043	23074	23786	22977	23103	20593	21195	34864	14850	18049
Longueur (m)	205,48	196,49	254,76	217,90	239,32	272,85	226,67	208,89	267,82	176,37
DJMA	0	0,55	0,59	0,82	0	0,17	0,55	0,68	0	1,00
Classe de route	0,80	0,80	1,00	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	0,80	1,00
Densité des réseaux	1,00	0,95	0,47	0,82	0,28	0,39	0,08	0,54	0,00	0,35
Nombre d'excavations	1,00	0	0,59	0	0	0,53	0	0	0	0
Projets d'aménagement souterrain	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Densité de population (habitants/km <sup>2</sup> )	0,18	0,35	0,33	1,00	0,09	0,49	0,24	0	0,31	0,65
Utilisation du sol	0,83	0,80	0,70	0,80	0,80	0,60	0,80	0,85	0,60	0,80
Proximité d'établissements publics/bâtiments de grande hauteur (m)	0,08	1,00	0	0,31	0	0	0	0	0	0

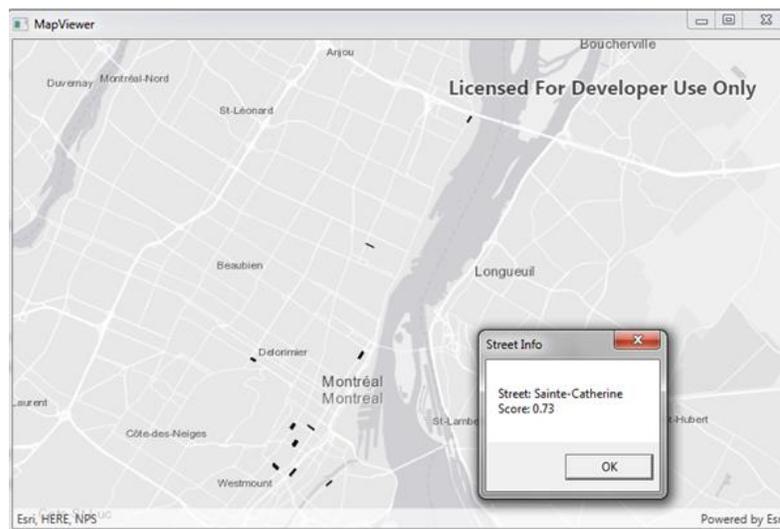
## 6.5 APERÇU DU LOGICIEL

L'implantation du logiciel se fonde sur les résultats du modèle de PDM. Ce logiciel facilite la prise de décision en éliminant la nécessité de calculer les poids de priorité de chaque critère et le besoin de générer les pointages d'attributs grâce à l'application de plusieurs techniques de traitement des données géographiques à chaque segment de rue. L'utilisateur n'a pas à connaître la programmation, le traitement des données géographiques ou la manipulation des bases de données. Le logiciel est conçu pour le classement automatisé de segments de rue en fonction de huit critères de sélection de l'emplacement de la GMR. Son interface principale est illustrée à la figure 6.5.

## 6.6 VISUALISATION DES RÉSULTATS

Le résultat final est l'affichage des segments classés sur une carte. Chaque segment est illustré par un trait représentant son classement. Plus le trait est épais, plus le rang du segment est élevé, et inversement. La figure 6.4 propose un exemple de carte montrant l'emplacement et le pointage des segments de rue.

Pour un examen détaillé du logiciel de sélection de l'emplacement des GMR, se reporter au guide de l'utilisateur du logiciel.



**Figure 6.4 Fenêtre contextuelle présentant le nom de la rue et son pointage**



GMR, il serait trop onéreux de créer une entité spécialement dédiée à la gestion de la galerie. Ce rôle devrait plutôt être confié, au départ, à une entité exerçant déjà dans un champ de compétences similaire et qui n'est pas en conflit d'intérêts avec un des opérateurs.

Depuis 110 ans, la CSEM gère un réseau de conduits souterrains de plus de 23 millions de mètres, et assume une grande partie de l'administration et de l'exploitation touchant la gestion des GMR. Elle dispose de toutes les ressources permettant de soutenir ses activités, avec les adaptations requises. La présence de la CSEM place ainsi la Ville de Montréal dans une position privilégiée pour le développement d'une telle approche technologique.

**Vidéotron** utilise principalement les conduits de la CSEM. Elle paie un tarif établi par la CSEM, qui peut varier d'une année à l'autre, pour louer un espace dans les conduits de la CSEM et, à titre d'utilisateur, suit les règles concernant l'utilisation des conduits souterrains et l'administration des affaires de la CSEM. Elle utilise également les points d'accès d'Hydro-Québec et emploie des caméras thermiques pour vérifier l'état des câbles de cette dernière et garantir la sécurité des interventions des travailleurs. Les câbles sont passés dans les conduites; par conséquent, il n'y a pas besoin d'excavation pour les réparations et la maintenance dans la plupart des cas (sauf pour les nouvelles installations ou pour le raccordement de bâtiment). Vidéotron a tendance à réparer ses câbles ou à en poser des nouveaux lorsque la Ville a déjà procédé à une excavation. On s'attend à ce que les besoins continuent à croître jusqu'à 40 % par an. En outre, l'arrivée du 5G nécessitera plus de connexions aux antennes nouvellement déployées. Les nouveaux réseaux sont constitués de câbles à fibre optique.

**Hydro-Québec** possède un réseau souterrain principalement au centre-ville. La Ville de Montréal exige l'enfouissement des conducteurs aériens depuis son programme 1983-1989. Les câbles souterrains passent dans les conduits de la CSEM. Pour cela, Hydro-Québec lui paie annuellement des frais de location de 4 \$/mètre par conduit (contrat de 20 ans).

Ses principales préoccupations concernant les GMR sont les suivantes :

- Le partage des coûts de construction et d'installation initiaux des réseaux de la GMR, les coûts de la transition du réseau actuel vers la GMR, les coûts d'équipement et le réseau de surveillance pour en assurer la sécurité;
- La sécurité des installations et du personnel au moyen d'un système de télésurveillance;
- L'échauffement des câbles et son incidence sur leur capacité à transmettre l'électricité;
- La faisabilité de construire une GMR selon les critères de sélection de l'emplacement;
- Le fait que le principal intérêt des GMR est le raccordement des utilisateurs finaux (galeries transversales). Or, dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire d'avoir accès aux câbles posés dans la galerie sur toute leur longueur (les points d'accès suffisent).

**Bell** possède ses propres conduits et ne paie à la ville que des frais d'excavation ponctuels nécessaires à la construction de son infrastructure. Environ 90 % de ses conduits ont plus de 20 ans. Les nouveaux câbles sont en fibre optique (environ 50 %) et les anciens sont en cuivre (environ 50 %). Bell a tendance à réparer ses câbles lorsque la Ville a déjà procédé à une excavation. Environ 50 % de ses câbles sont installés en surface (aériens). En ce qui concerne les GMR, le principal intérêt est le raccordement des utilisateurs finaux (galeries transversales). Comme pour les autres entreprises de

télécommunications, la 5G nécessitera davantage de connexions aux antennes et davantage d'équipements de services souterrains.

**Énergir** : En ce qui concerne son réseau de gaz, Énergir ne sera pas présente dans une éventuelle GMR, son évaluation des risques ayant montré qu'il serait risqué d'installer conjointement ce réseau et d'autres réseaux. Dans le cas de la dernière étude de faisabilité concernant le concept, soit le projet de la rue Sainte-Catherine, à la demande d'Énergir, le réseau de gaz a été positionné à l'extérieur de la galerie, le long de cette dernière.

**Perspective générale des différents intervenants** : Tous les câblodistributeurs sont satisfaits des conditions actuelles, qui sont uniques au Québec en raison de la présence de la CSEM (organisme sans but lucratif). Ces entreprises ne tiennent pas compte des coûts pour les utilisateurs découlant des excavations répétées pour la maintenance et la réparation. Elles affirment qu'elles n'ont pas besoin de beaucoup d'excavations pour ces interventions. Par conséquent, elles ne sont pas disposées à payer un supplément pour le développement des GMR. Il semble qu'une motivation majeure pour elles de participer aux projets de GMR serait la modification de la structure de coûts ou de la réglementation. Cependant, elles sont prêtes à envisager la GMR pour les nouvelles implantations, dans la mesure où leurs coûts n'augmentent pas. En raison de la croissance rapide de la demande en télécommunications, on se pose beaucoup de questions sur la façon dont le domaine se développera à long terme.

## 6.8 RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Ce chapitre présente une méthode générale de sélection de l'emplacement d'une GMR d'après l'analyse spatiale du SIG. La PDM a été utilisée pour sélectionner les emplacements possibles des GMR. Nous avons tout d'abord envisagé 12 critères, que nous avons ensuite réduits à 8, lesquels ont été utilisés pour la PDM au moyen de l'AHM. Les autres critères doivent être examinés avant ou après la PDM ou doivent être combinés avec les huit premiers. Le poids des critères est calculé par AHM. D'après les réponses au questionnaire d'AHM, sur les huit critères utilisés, les plus importants pour la sélection de l'emplacement des GMR sont la densité des réseaux, le nombre d'excavations prévues pour la réparation de réseaux et les projets d'aménagement souterrain.

Lorsqu'on applique l'analyse hiérarchique multicritère (AHM), on part de l'hypothèse qu'il n'y a pas de relation (dépendance) entre les critères. Par conséquent, cette méthode ne tient pas compte des dépendances dans sa comparaison par paires. Toutefois, certains des critères utilisés dans la PDM précédemment réalisée sont liés par de telles dépendances. Afin de les représenter, on peut considérer le processus de réseau analytique (ANP) comme une méthode de rechange à l'AHM pour l'avenir.

Nous avons acquis plusieurs ensembles de données auprès de la Ville de Montréal, notamment de différents services municipaux. Les couches de données de SIG municipales incluent des renseignements concernant le secteur public (bris de conduite d'eau, circulation) et les excavations.

## RÉFÉRENCES

- Peng, F., C. Yang et C. Ma, (2018). *Introduction to Planning and Construction for Utility Tunnels*, Tongji University Press.
- Saaty, T. L. (2008). « Decision making with the analytic hierarchy process », *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, n° 1, p. 83. Sur Internet : <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.

## CHAPITRE 7 RÉSUMÉ ET TRAVAUX À VENIR

### 7.1 RÉSUMÉ

Étant donné les coûts initiaux élevés de la construction des GMR, la détermination des segments de rue critiques pouvant être candidats à l'aménagement d'une telle galerie peut s'effectuer au moyen de processus décisionnels. L'intégration d'un modèle d'optimisation dans ces processus permet de comparer, pour chaque segment candidat, les coûts d'une intervention classique, d'une intervention synchronisée et de l'aménagement d'une GMR. En limitant l'implantation des GMR au budget disponible et en veillant à une planification adéquate entre les propriétaires des réseaux de services publics, il est possible de bâtir des GMR graduellement chaque année, en choisissant l'emplacement en fonction des résultats du modèle de prise de décision fondée sur l'optimisation. La normalisation du recueil et du stockage des données améliorera les futures analyses.

### 7.2 TRAVAUX À VENIR

#### 7.2.1 Cadre multi-objectif d'optimisation du cycle de vie des réseaux d'infrastructure urbaine considérant les coûts sociaux et les besoins des villes intelligentes

Cette proposition de recherche vise à démontrer les relations entre les interventions, les propriétaires des réseaux, les utilisateurs des réseaux et les coûts sociaux. Elle inclut le recueil et l'analyse d'un gros volume de données spatiales détenues par différentes parties. Elle utilise notamment la durée et l'emplacement de l'intervention, le débit journalier moyen annuel, le nombre de piétons et la longueur de la chaussée. Ces variables serviront d'intrants dans les modèles computationnels utilisés pour l'évaluation des répercussions du plan d'intervention sur les réseaux.

Le cadre proposé démontre la possibilité d'optimiser les coûts des interventions sur les réseaux en améliorant la coordination entre les fournisseurs de services publics, en réduisant les coûts sociaux et en accroissant la durabilité et la résilience de l'infrastructure des réseaux de services publics.

Par rapport à la gestion d'actifs conventionnelle, qui n'est pas durable et entraîne des répercussions socioéconomiques élevées, la gestion intégrée des actifs devrait se traduire par une réduction importante de ces effets socioéconomiques. Cependant, la recherche effectuée jusqu'ici ne porte que sur les segments de rue dans lesquels de la maintenance préventive est requise, ne tient pas compte des réparations d'urgence et se limite aux services municipaux (c.-à-d. les réseaux privés ne sont pas pris en considération). Elle ne tient pas non plus compte de la durée de vie restante de l'actif.

La recherche proposée prendra en compte deux indicateurs de coûts sociaux : les retards de circulation et les retards piétonniers. Ces coûts sociaux seront déterminés à partir des interventions sur les actifs d'infrastructure municipaux et privés, obtenues à partir des publications. Nous déterminerons les coûts sociaux selon trois scénarios de gestion d'actifs d'infrastructure, soit la gestion d'actifs conventionnelle, la gestion intégrée des actifs et les GMR (comme occasion spéciale). Également, la recherche prendra en considération les besoins des futures villes intelligentes (augmentation rapide de la demande de télécommunications), durables et résilientes.

Les contributions attendues sont (1) la réduction des coûts directs et des coûts sociaux par la mise en œuvre de systèmes de gestion intégrée des actifs et (2) l'optimisation des interventions sur les réseaux grâce à l'amélioration de la coordination entre les fournisseurs de services publics, la baisse des coûts sociaux et l'accroissement de la durabilité et de la résilience de l'infrastructure des réseaux de services publics.

### **7.2.2 Simulation d'événements discrets 4D des méthodes de construction des GMR dans un environnement de réalité virtuelle axée sur les techniques sans tranchée**

Les galeries multiréseaux sont une bonne solution de remplacement à l'enfouissement des réseaux. Bien qu'elles soient plus coûteuses que la méthode classique, la réduction des coûts sociaux qu'elles apportent peut les rendre plus pratiques et rentables, surtout dans les zones denses. Différents facteurs, tels que les caractéristiques des réseaux, l'emplacement de la GMR et la méthode de construction, doivent être étudiés pour que les GMR deviennent une solution économique et fiable. Dans ce domaine, la méthode de construction est un des éléments devant faire l'objet du plus grand soin pour aboutir à un projet de GMR réussi, et la méthode la plus efficace pour étudier les diverses options en la matière est la simulation. Dans cette proposition de recherche, la simulation des méthodes de construction des GMR sera effectuée au moyen de la modélisation des données du bâtiment (MDB) et de la simulation d'événements discrets 4D en environnement de réalité virtuelle, afin d'évaluer les différents volets d'un projet.

## ANNEXE : LISTE DES PUBLICATIONS

### Chapitre de livre

Luo, Y., A. Alaghbandrad, T. K. Genger et A. Hammad (2019). Chapitre 3, « Smart Multi-purpose Utility Tunnels », *Sustainable City Logistics Planning: Methods and Applications* (vol. 3), Nova Publishers.

### Articles de revue

Alaghbandrad, A., et A. Hammad (2020). « Framework for multi-purpose utility tunnel lifecycle cost assessment and cost-sharing », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 104, article 103528. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103528>.

Luo, Y., A. Alaghbandrad, T. K. Genger et A. Hammad (2020). « History and recent development of multi-purpose utility tunnels », *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 103 (septembre), article 103511, Pergamon. Sur Internet : <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103511>.

Alaghbandrad, A., et A. Hammad (en cours de revue). « A framework of Multi-purpose Utility Tunnel Information Modeling for Lifecycle Management », *Advanced Engineering Informatics*.

### Articles et présentations de conférence

Alaghbandrad, A., et A. Hammad (2018). *Developing Information Model for Multi-Purpose Utility Tunnel Lifecycle Management*. American Society of Civil Engineers, Construction Research Congress 2018, La Nouvelle-Orléans, LA, États-Unis.

Alaghbandrad, A., et A. Hammad (2018). « PPP Cost-Sharing of Multi-purpose Utility Tunnels », *Advanced Computing Strategies for Engineering*. 25<sup>th</sup> International Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Lausanne, Suisse.

Luo, Y., et A. Hammad (2019). *Multi-criteria Spatial Analysis of Multi-purpose Utility Tunnels*. Congrès INFRA 2019.

Luo, Y., A. Hammad et C. Zhang (2019). *Recent Development of Multi-purpose Utility Tunnels in China*. 7<sup>th</sup> International Construction Conference jointly with the Construction Research Congress.

Luo, Y., T. K. Genger et A. Hammad (2020). « Multi-Criteria Decision Making for Multi-purpose Utility Tunnel Location Selection », dans *Pipelines 2020: Planning and Design - Proceedings of Sessions of the Pipelines 2020 Conference*.

Genger, T. K., et A. Hammad (2020). *Enhancing Asset Management Support through Visual Analytics*. Congrès INFRA 2020.

La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

Tous droits réservés.  
© **CERIU, mai 2021**



Centre d'expertise  
et de recherche  
en infrastructures  
urbaines

1255, boul. Robert-Bourassa, bur. 800  
Montréal (Québec) H3B 3W3  
Canada

514 848-9885

[info@ceriu.qc.ca](mailto:info@ceriu.qc.ca)  
[www.ceriu.qc.ca](http://www.ceriu.qc.ca)