Contribution à l'optimisation de la gestion intégrée des infrastructures urbaines

par

Djagbo Hermann TCHOUGOUROU

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 25 FÉVRIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Djagbo Hermann Tchougourou, 2022

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Saad Bennis, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Nicolas Constantin, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Assaf, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sophie Duchesne, examinateur externe
Institut national de la recherche scientifique

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 6 JANVIER 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Mon intérêt pour les infrastructures municipales et particulièrement les réseaux d'eau potable et d'égouts remonte à 2003 lors de mon entrée à l'université. Mon désir d'apporter une contribution à une meilleure gestion des réseaux d'eau potable et d'égouts, en proie à de nombreux dysfonctionnements dans mon pays d'origine (le Bénin), était déjà clairement établi. Cela a orienté mon parcours universitaire en ingénierie civil. Toutefois, c'est au Service de l'Eau (de Montréal) que j'ai intégré en 2014, que le projet d'effectuer des études doctorales est né et a pris de l'ampleur. En effet, je me suis rendu compte que même si l'état de l'art répondait à de nombreuses préoccupations dans le domaine de la gestion des actifs d'infrastructures municipales, de nombreuses questions et problématiques étaient toujours non résolues. J'ai ainsi pu me rendre compte du besoin de recherche et d'amélioration continue de l'état de l'art et de la pratique. J'ai également compris qu'une partie de cette recherche se fait tant bien que mal dans l'industrie et dans les services d'infrastructures ou de travaux publics à travers les projets pilotes et l'expérience issue de la pratique. Toutefois, ces derniers n'ont pas souvent le temps, ni la disponibilité nécessaire pour mener des recherches complètes, compte tenu de leurs missions opérationnelles orientées vers la gestion des urgences, le maintien du service à la clientèle et la réalisation des travaux et projets divers. L'autre partie de la recherche se fait surtout dans le milieu universitaire, avec plus d'efficacité, plus d'encadrement et avec des méthodes plus rigoureuses et des résultats publiés; et c'est donc ce qui a motivé ma décision d'effectuer un doctorat afin d'apporter ma contribution à l'amélioration continue de la gestion des infrastructures municipales, et surtout de proposer des solutions à certaines préoccupations encore non-résolues.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de recherches Monsieur Saad Bennis, ing., Ph. D. pour sa disponibilité, sa patience, son appui, ses conseils et encouragements tout au long de mes études doctorales. Il m'a été si difficile de combiner travail, étude et famille que je n'aurais pas pu finir mes travaux dans les délais prescrits, n'eut été son accompagnement continu et stratégique.

Je tiens également à remercier Monsieur Nicolas Constantin, ing., Ph. D. d'avoir accepté de présider le jury d'évaluation de ma thèse, ainsi que Monsieur Gabriel J. Assaf, ing., Ph. D. et Madame Sophie Duchesne, ing., Ph. D. d'avoir accepté d'en faire partie.

J'offre également ma gratitude à tous mes collègues de l'équipe du Plan Directeur du Service de l'Eau de Montréal pour leurs encouragements, ainsi qu'à mes collègues de l'équipe de recherches de l'ÉTS, dont Madame Ghita Amraoui et Monsieur Anas Sebti pour leur précieuse collaboration à cette recherche.

Je ne saurais finir sans adresser un gros et sincère merci à ma famille qui n'a cessé de me comprendre, de m'accommoder et de me soutenir du mieux possible dans ce projet afin d'atteindre la cible.

Contribution à l'optimisation de la gestion intégrée des infrastructures urbaines

Djagbo Hermann TCHOUGOUROU

RÉSUMÉ

Cette thèse consiste à mettre en place de nouvelles grilles et méthodologies d'évaluation des conduites d'eau potable et d'égouts en vue d'identifier de façon optimale, rentable et durable leurs besoins et priorités d'interventions, ainsi que les opportunités de coordination efficace des interventions entre toutes les infrastructures municipales linéaires d'une même tranchée, en l'occurrence les conduites d'eau potable, les conduites d'égouts et les chaussées.

Pour optimiser les décisions de renouvellement des conduites d'eau potable, nous avons développé une nouvelle approche qui intègre une procédure dynamique d'établissement des durées de vie des conduites, l'impact spatio-temporel des bris précédents sur les dégradations futures et les résultats de l'analyse comparative des performances de divers indicateurs d'état. La nouvelle approche méthodologique proposée, s'appuie sur les données récoltées sur un linéaire approximatif de 6 000 kilomètres de conduites d'eau potable, en particulier la bonne corrélation spatiale et temporelle détectée entre les bris successifs sur une conduite ainsi que les écarts observés entre les durées de vies réelles établies avec la méthode dynamique proposée et les durées de vie théoriques énoncées dans la littérature. La nouvelle approche a été validée à travers une étude de cas. Les résultats ont été concluants et démontrent que les interventions issues de l'approche proposée sont plus optimales que celles provenant des autres approches utilisées à titre comparatif dans l'étude de cas.

Quant aux conduites d'égouts, nous avons combiné la méthodologie du MAMH avec celle du WRc afin d'établir une nouvelle grille d'évaluation d'état, basée sur une approche plus efficace et proactive. L'approche proposée intègre les indicateurs structuraux, hydrauliques ou fonctionnels ainsi que les facteurs aggravants reliés aux conditions internes et externes de la conduite. La faisabilité et l'intérêt de la nouvelle méthode d'évaluation proposée a pu être validée à travers une étude de cas réalisée sur des secteurs d'égouts de la Ville de Montréal. Les résultats montrent l'énorme potentiel de cette méthode à mieux modéliser la réalité des conduites d'égouts quant à leur état et à leur vulnérabilité, en tenant compte des facteurs internes et externes influençant leur comportement et dégradation temporelle.

L'élaboration de règles et critères à la fois simples et efficaces, encadrant la coordination des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie a été réalisée avec une méthode d'analyse comparative des avantages coûts-bénéfices liés à divers scénarios d'interventions intégrées et non-intégrées. Les résultats émanant de cette analyse comparative de rentabilité, ont permis de proposer dans cette thèse, un cadre rigoureux, objectif et réaliste destiné à supporter les gestionnaires d'infrastructures et surtout à les éclairer sur les meilleures opportunités de coordination des travaux, le tout dépendant de l'état de chacune des infrastructures de la tranchée, au moment de l'évaluation.

Mots-clés : optimisation, gestion intégrée, réseau d'eau potable, égout, chaussée.

Contribution à l'optimisation de la gestion intégrée des infrastructures urbaines

Djagbo Hermann TCHOUGOUROU

ABSTRACT

This thesis aims to elaborate new grids and methodologies for accessing water and sewer pipes condition in order to identify in an optimal, cost-effective and sustainable way, required interventions, priorities of each intervention, and the opportunities for effective coordination of interventions between infrastructures coexisting in the same trench, especially water pipes, sewer pipes and pavements.

To optimize water pipes renewal, we have developed a new approach that integrates a dynamic process for establishing pipes lifetimes, spatial and temporal impact of previous breakages on future degradation, and results from comparative analysis of the performance of various status indicators. The new approach is based on data collected from nearly 6,000 kilometers of water pipes, such as the good spatial and temporal correlation detected between successive breaks on a pipe, and differences observed between actual lifetimes established with the dynamic proposed method and theoretical lifetimes stated in the literature. The proposed approach has been validated through a case study. The results are very conclusive and demonstrate that interventions resulting from the proposed approach are more optimal than the interventions from the comparative approaches used in the case study.

For sewer pipes, it was proposed to combine MAMH methodology with that of the WRc in order to establish a new status of condition assessment grid, based on a more robust, effective and proactive approach that integrates structural indicators, hydraulic or functional indicators and aggravating factors. The feasibility and interest of the new methodology have been validated in a case study conducted on some sewers of Montreal City. The results show the enormous potential of this method to better illustrate the reality of sewer pipes in terms of status of condition, vulnerability and taking into account internal and external factors influencing their behaviour and temporal degradation.

The development of simple and effective criteria for interventions coordination on water pipes, sewer and road was carried out using a method of comparative analysis of costs and benefits associated with various integrated and non-integrated intervention scenarios. The results of this comparative analysis of effectiveness, have made it possible to propose in this thesis, a rigorous, objective and realistic framework intended to support the infrastructure managers and to inform them on the best opportunities for projects coordination, all depending on the condition of each infrastructure of the trench, at the time of the study.

Keywords: optimization, integrated management, water pipe, sewer, pavement.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....3
1.1 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux d'eau potable 3
1.2 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux d'égouts 5
1.3 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux de voirie.....7
1.4 Mise en contexte et problématique liée à la gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie 8

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....9
2.1 État de l'art dans la gestion des réseaux d'eau potable.....10
2.1.1 Gestion opérationnelle à court-terme..... 10
2.1.2 Gestion tactique à moyen-terme 11
2.1.3 Gestion stratégique à long-terme 15
2.2 Gestion des réseaux d'égouts.....17
2.2.1 Gestion opérationnelle à court-terme..... 17
2.2.2 Gestion tactique à moyen-terme 18
2.2.3 Gestion stratégique à long-terme 22
2.3 Gestion des réseaux de voirie 26
2.3.1 Gestion opérationnelle à court-terme..... 26
2.3.2 Gestion tactique à moyen-terme 27
2.3.3 Gestion stratégique à long-terme 28
2.4 Gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie.....29

CHAPITRE 3 OBJECTIFS, HYPOTHÈSES ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE 35
3.1 Optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable 35
3.1.1 Objectifs de recherche..... 35
3.1.2 Hypothèses et originalité..... 36
3.2 Optimisation de la gestion des réseaux d'égouts 37
3.2.1 Objectifs de recherche..... 37
3.2.2 Hypothèses et originalité..... 37
3.3 Optimisation de la gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie.....38
3.3.1 Objectifs de recherche..... 38
3.3.2 Hypothèses et originalité..... 39

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE 41
4.1 Optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable 41
4.2 Optimisation de la gestion des réseaux d'égouts 42
4.3 Optimisation de la gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie 44

CHAPITRE 5 OPTIMISATION DU RENOUVELLEMENT DES CONDUITES D'EAU POTABLE 45
5.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à l'optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable 45
5.2 Présentation des résultats 46
5.2.1 Analyse des statistiques comparatives et des liens de convergence entre divers indicateurs d'état des conduites d'eau potable 46
5.2.2 Analyse de l'impact du nombre de bris historiques sur l'état de dégradation actuelle et future des conduites d'eau 49
5.2.3 Analyse de l'impact spatio-temporel du dernier bris et des bris précédents sur les bris subséquents 53
5.2.4 Établissement de la relation entre la durée de vie écoulée et les bris de conduites 56
5.2.5 Approche proposée pour l'établissement de l'état des conduites et l'optimisation des priorités d'intervention sur le réseau d'eau potable 59
5.3 Validation du modèle proposé : application au réseau d'eau potable de la Ville de Montréal 61
5.3.1 Description des données utilisées 61
5.3.2 Analyse comparative des résultats issus de l'application de différentes méthodologies 62
5.3.2.1 Optimisation des interventions par la méthode du MAMH 62
5.3.2.2 Optimisation des interventions par la nouvelle approche proposée 64
5.3.2.3 Optimisation des interventions par la méthode combinatoire multicritère d'optimisation linéaire en nombres entiers 67
5.4 Conclusions partielles 71

CHAPITRE 6 OPTIMISATION DU RENOUVELLEMENT DES CONDUITES D'ÉGOUTS 73
6.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à l'optimisation de la gestion des réseaux d'égouts 73
6.2 Présentation des résultats 74
6.2.1 Évaluation de l'impact des performances hydrauliques et fonctionnelles combinées au niveau de la nappe phréatique sur l'état structural des conduites d'égouts 76
6.2.1.1 Sol composé de sable et limon 77
6.2.1.2 Sol composé d'argile de faible plasticité ou de gravier fin à moyen 78
6.2.1.3 Sol composé d'argile de moyenne à haute plasticité 80
6.2.2 Impact des modifications de la grille d'évaluation sur les classes d'intervention et priorités de réhabilitation des conduites d'égouts 81
6.2.2.1 Sol à risque géotechnique élevé 82
6.2.2.2 Sol à risque géotechnique moyen 83
6.2.2.3 Sol à risque géotechnique faible 84
6.2.3 Optimisation des recommandations et priorités d'intervention sur les réseaux d'égouts 84
6.2.3.1 Priorité de réhabilitation des conduites d'égouts 86

6.2.3.2 Arbre décisionnel et classes d'intervention des conduites d'égouts 87
6.3 Validation de l'approche proposée : application au réseau d'égouts de la ville de Montréal 88
6.3.1 Description des données physiques et d'état des secteurs étudiés 88
6.3.2 Présentation et analyse des résultats issus de l'application de l'approche proposée, soit la méthode combinée WRc/MAMH 91
6.4 Conclusions partielles 94

CHAPITRE 7 GESTION INTÉGRÉE DES RÉSEAUX D'EAU ET DE VOIRIE.....97
7.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à la gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie 97
7.2 Présentation du plan directeur de la gestion intégrée des infrastructures 98
7.2.1 Évaluation des interactions dues à la proximité entre les différents actifs 98
7.2.2 Prise en compte des meilleures pratiques d'intégration des actifs et identification des interventions requises 99
7.2.3 Évaluation des coûts des différentes interventions 103
7.2.4 Analyse comparative des interventions par la méthode coût-bénéfice ... 104
7.2.5 Cadre procédural pour l'intégration optimale des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie 111
7.3 Application du modèle proposé aux tronçons de la Ville de Montréal.....112
7.3.1 Description des données utilisées 112
7.3.2 Présentation des résultats 113
7.3.2.1 Approche traditionnelle du MAMH..... 113
7.3.2.2 Nouvelle approche proposée 116
7.4 Conclusions partielles 121

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 125

RECOMMANDATIONS 129

ANNEXE I GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CONDUITES D'EAU POTABLE 131

ANNEXE II GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CONDUITES D'ÉGOUTS.....137

ANNEXE III GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CHAUSSÉES 139

ANNEXE IV QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX MUNICIPALITÉS SONDÉES ..141

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....142

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Résumé des niveaux de gestion, horizons de planification et activités d'une gestion sur le cycle de vie des infrastructures.....9

Tableau 2.2 Indicateurs d'état des réseaux d'eau potable selon la méthodologie du MAMH..12

Tableau 2.3 Utilisation du nombre de réparations, du taux de réparations et de la durée de vie écoulée selon la méthodologie du MAMH 13

Tableau 2.4 Échelle pour l'évaluation des indicateurs selon la méthodologie du MAMH.....14

Tableau 2.5 Indicateurs d'état du réseau d'égout selon la méthodologie du MAMH 19

Tableau 2.6 Indice de criticité individuel pour chaque réseau du tronçon unifié selon le modèle d'Elsawah.....32

Tableau 2.7 Indice de criticité intégré du tronçon unifié selon le modèle d'Elsawah.....32

Tableau 5.1 État du réseau à l'étude selon le nombre de bris historiques EP-1 et le taux de bris EP-2 48

Tableau 5.2 Répartition en fonction de EP-2 des conduites initialement critiques selon EP-1 48

Tableau 5.3 Répartition en fonction de EP-1 et EP-2 des mauvaises conduites selon EP-3 ...49

Tableau 5.4 Répartition des bris annuels 2009-2018 de la ville de Montréal selon le nombre de bris initial de la conduite 50

Tableau 5.5 Calcul du coefficient de risque relatif pour chaque cohorte de conduites 51

Tableau 5.6 Répartition spatio-temporelle des bris subséquents sur les conduites de fonte grise.....54

Tableau 5.7 Répartition spatio-temporelle des bris subséquents sur les conduites de fonte ductile.....54

Tableau 5.8 Durées de vie locales établies pour les conduites en fonte de la Ville de Montréal 58

Tableau 5.9 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal selon la méthodologie du MAMH 63

Tableau 5.10 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal selon la nouvelle méthodologie proposée 65

Tableau 5.11 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal selon la méthode d'optimisation linéaire en nombres entiers.....70

Tableau 6.1 Méthodologie du WRc pour l'établissement des cotes d'état selon les présomptions de risque pour divers facteurs influençant la dégradation des conduites d'égout.....75

Tableau 6.2 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale initiale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque élevé.....77

Tableau 6.3 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et des performances structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque élevé.....78

Tableau 6.4 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale initiale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque moyen 79

Tableau 6.5 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et des performances structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque moyen 79

Tableau 6.6 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque faible.....80

Tableau 6.7 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque faible.....81

Tableau 6.8 Grille de priorité proposée pour les interventions de réhabilitation.....86

Tableau 6.9 Données d'état du réseau d'égout de la zone 1 selon la méthode du MAMH.....89

Tableau 6.10 Données d'état du réseau d'égout de la zone 2 selon la méthode du MAMH...91

Tableau 6.11 Résultats obtenus pour le réseau d'égout de la zone 1 selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH 92

Tableau 6.12 Résultats obtenus pour le réseau d'égout de la zone 2 selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH 93

Tableau 7.1 Catégories d'états possibles pour chacun des trois actifs de la tranchée.....99

Tableau 7.2 Combinaisons d'états entre les trois actifs d'une tranchée avec les interventions applicables selon les meilleures pratiques 100

Tableau 7.3 Combinaisons d'états entre les trois actifs d'une tranchée avec les interventions applicables selon les meilleures pratiques (suite).....101

Tableau 7.4 Caractéristiques des différentes interventions possibles sur chacun des actifs en termes de coût et durée de vie 104

Tableau 7.5 Combinaisons d'états possibles entre les trois actifs de la tranchée, avec les interventions applicables et leur rentabilité respective 106

Tableau 7.6 Combinaisons d'états possibles entre les trois actifs de la tranchée, avec les interventions applicables et leur rentabilité respective (suite) ...107

Tableau 7.7 Règles de coordination issues des résultats de la simulation coût-bénéfice 111

Tableau 7.8 Description des données utilisées pour la validation de l'approche 113

Tableau 7.9 Résultats du PI 2013 de la Ville de Montréal basé sur les règles du MAMH ...114

Tableau 7.10 Résultats du PI 2018 de la Ville de Montréal basé sur les règles du MAMH .115

Tableau 7.11 Planification des travaux en 2013 basée sur la nouvelle approche proposée...116

Tableau 7.12 Planification des travaux en 2018 basée sur la nouvelle approche proposée...117

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 2.1 Arbre de décision du réseau d'eau potable selon la méthodologie du MAMH 15

Figure 2.2 Arbre de décision du réseau d'égouts selon la méthodologie du MAMH 20

Figure 2.3 Courbe de dégradation des conduites d'égouts en béton armé de la Ville de Montréal construite selon un modèle déterministe 24

Figure 2.4 Courbe de dégradation des conduites d'égouts de la Saskatchewan selon le modèle de Weibull 25

Figure 2.5 Arbre de décision des chaussées selon la méthodologie du MAMH 28

Figure 2.6 Courbe de dégradation des chaussées de la Ville de Québec 29

Figure 2.7 Processus d'intégration des réseaux d'eau et de voirie d'un même tronçon selon le modèle de Halfawy 31

Figure 4.1 Étapes de travail dans le cadre de l'optimisation de la coordination des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie 44

Figure 5.1 Risque de bris futurs en fonction du nombre de bris historiques de la conduite....52

Figure 5.2 Courbe de survie et durée de vie de la fonte grise installée avant 1950 à Montréal 57

Figure 5.3 Courbe de survie et durée de vie de la fonte grise installée après 1950 à Montréal 57

Figure 5.4 Courbe de survie et durée de vie de la fonte ductile installée à Montréal.....57

Figure 5.5 Arbre de décision proposé pour l'établissement des interventions pour les conduites d'eau potable.....61

Figure 5.6 Résultat partiel des simulations issues de l'optimisation des interventions avec la méthode d'optimisation linéaire en nombres entiers 69

Figure 6.1 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égout pour un sol à risque élevé.....82

Figure 6.2 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égouts pour un sol à risque moyen 83

Figure 6.3 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égouts pluviaux pour un sol à risque faible 84

Figure 6.4 Arbre décisionnel proposé sur la base de la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH.....87

Figure 6.5 Emplacement du réseau d'égout pluvial de la zone 1 89

Figure 6.6 Emplacement du réseau d'égout pluvial de la zone 2 90

Figure 7.1 Intensité des interactions entre les réseaux d'eau potable, d'égout et de chaussée.....98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACA	Analyse coût-avantage
ACB	Analyse coût-bénéfice
ACC	Association canadienne de la construction
ACTP	Association canadienne des travaux publics
ASCE	American Society of Civil Engineers
AQ	Aqueduc
AWWA	American Water Works Association
BA	Béton armé
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CGT	Consortium Cima-Genivar-Texulte
CIS	Cote d'intégrité structurale
CCTV	Caméra d'inspection télévisée conventionnelle
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
DV	Durée de Vie
DVU	Durée de Vie utile
EG	Égout
EP	Eau Potable
EU	Eaux Usées
EPL	Eaux Pluviales
CH	Chaussées
FCM	Fédération canadienne des municipalités
FD	Fonte ductile

FG	Fonte grise
Hyd	Hydraulique
IRI	Indice de Rugosité Internationale
IPWEA	Institute of Public Works Engineering Australasia
MAMH	Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation du Québec (Anciennement appelé MAMOT ou MAMROT ou MAMR)
MAMOT	Ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du territoire
MAMROT	Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
MAMR	Ministère des Affaires Municipales et des Régions
MBNC	Municipal Benchmarking Network Canada
MDDELCC	Ministère du développement durable et de la lutte contre les changements Climatiques
NAMS	National Asset Management System
LCCA	Life cycle costs Analysis
PGO	Pratiques de gestion optimale
PCI	Pavement Condition Index
PTI	Projets triennaux d'immobilisations
Recons	Reconstruction
Rehab	Réhabilitation
SCGC	Société canadienne de génie-civil
SIAD	Système intégré d'aide à la décision
SIG	Système d'information géographique
Str	Structural

TO	Caméra d’inspection télévisée avec téléobjectif
PI	Plan d'interventions
VR	Valeur de remplacement à neuf
WRc	Water Research centre

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$	dollars canadiens
M$	millions de dollars canadiens
%	pourcentage
=	égal
≤	inférieur ou égal
≥	supérieur ou égal
>	supérieur
<	inférieur
ans	années
c_n	coefficient de risque relatif de la conduite selon le nombre n de bris historiques
km	kilomètre
m	mètre

INTRODUCTION

Cette thèse traite de la gestion des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie et plus particulièrement de l'identification et de la planification des besoins de renouvellement des conduites d'eau potable, des conduites d'égouts et des chaussées. Elle vise à optimiser la gestion intégrée de ses infrastructures, qui partagent généralement la même emprise et présentent des interactions entre elles, du fait de leur proximité, de leur positionnement, de leur configuration et caractéristiques respectives. Elle s'inscrit dans l'amélioration continue de la gestion des infrastructures urbaines concernées, suite à une meilleure connaissance du comportement de ces derniers dans le temps, un meilleur portrait et un bilan plus complet de l'utilisation des indicateurs de performance, processus et stratégies actuels de gestion de ces actifs. Les paramètres ciblés en priorité dans l'optimisation de la gestion de ces infrastructures sont l'efficacité, le coût, la rentabilité à long terme, la durabilité, l'impact et l'acceptabilité sociale des interventions d'entretien, de maintien et surtout de renouvellement, réalisées sur ces réseaux.

Tel qu'évoqué au paragraphe précédent, les infrastructures concernées sont essentiellement les réseaux d'eau potable, les réseaux d'égouts et les chaussées. Ces infrastructures sont essentielles pour la population, ont une valeur de remplacement élevée et sont habituellement directement gérées par la municipalité ou la ville concernée. La qualité de la gestion de ces infrastructures a donc une incidence directe et considérable qui se reflète sur la population, autant dans le niveau de service (état, performance et fiabilité) des infrastructures que dans les coûts de gestion et donc les taxes foncières ou municipales. La gestion pérenne et saine de ces infrastructures est donc capitale dans un contexte où elle se heurte à de nombreux défis (l'urbanisation et la densification accrue des villes, l'hyper-sollicitation des infrastructures et leur vieillissement naturel ou prématuré, les lacunes observées dans les diagnostics d'état, les limites des techniques d'interventions actuelles, les contraintes opérationnelles, budgétaires, stratégiques, etc.) qui sont de plus en plus complexes.

Pour atteindre l'objectif ciblé, ce projet de recherche va s'articuler autour de trois axes principaux à savoir :

a) l'amélioration de la planification et de la gestion des interventions de renouvellement des réseaux d'eau potable;
b) l'amélioration de la planification et de la gestion des interventions de renouvellement des réseaux d'égouts;
c) l'optimisation de la gestion intégrée et coordonnée des interventions sur les réseaux d'eau potable, les réseaux d'égouts et les chaussées.

Cette thèse expose de façon détaillée la problématique, les hypothèses, analyses et travaux réalisés pour améliorer d'une part les indicateurs d'état ou de performance utilisés pour supporter les décisions d'interventions, et d'autre part les processus menant à la prise de décisions. Une revue de l'état de l'art et des travaux antérieurement réalisés dans le domaine a également été effectuée afin de mieux situer la contribution scientifique de ce travail de recherche. En outre, de nouvelles méthodes et approches d'identification et de planification des besoins d'interventions sur les réseaux d'eau potable, les réseaux d'égouts et les chaussées y sont développées et proposées aux gestionnaires de ces infrastructures dans un souci de gestion intégrée et optimale. Finalement, des études de cas ont été réalisées et les approches proposées ont été appliquées partiellement ou complètement à des secteurs de réseaux d'eau potable, d'égouts ou de voirie de la Ville de Montréal dans le but d'en mesurer la faisabilité, la simplicité, l'efficacité et la valeur ajoutée comparativement aux approches traditionnelles existantes.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce chapitre présente une description du contexte actuel de la gestion des infrastructures urbaines; en particulier les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie, tout en évoquant les limites, insuffisances et défis qui s'opposent présentement à une gestion performante de ces infrastructures essentielles.

1.1 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux d'eau potable

Un réseau d'eau potable est un ensemble de canalisations reliées entre elles, et permettant le transport, le stockage en réservoir puis la distribution aux différents utilisateurs via des branchements de services. On y retrouve également des éléments ponctuels tels que les bornes d'incendie, les vannes, les purgeurs d'airs, les postes de surpression, des chambres de mesure de débit et de régulation de pression, etc. La gestion des réseaux d'eau potable est dissociée de celle des usines de production d'eau potable, considérées comme des immobilisations ponctuelles, et de ce fait, exclues de cette analyse. De plus, la gestion des réseaux d'eau potable est davantage axée sur celle des actifs linéaires (conduites d'eau potable) car ces derniers représentent l'écrasante majorité de la valeur monétaire du réseau, incluant les éléments ponctuels.

La majorité du réseau d'eau potable des grandes villes occidentales a été installée ou reconstruite entre les années 1900 et 1970, notamment entre et au lendemain des deux grandes guerres. Les années qui ont suivi cette période de construction massive des infrastructures urbaines ont vu changer les priorités des gestionnaires de villes, pour qui l'état presque neuf ou satisfaisant des infrastructures justifiait aisément un ralentissement des investissements dans ces actifs. Ce ralentissement des investissements, combiné au vieillissement des infrastructures, ainsi qu'à un manque de méthodes de suivi diagnostic et de gestion efficace de ces infrastructures sur leur cycle de vie a engendré dans les dernières années une baisse drastique des niveaux de service des réseaux d'eau potable caractérisée par

des taux de bris et des pourcentages de perte d'eau très élevés, un vieillissement prématuré des conduites, une hausse significative des coûts d'exploitation et de maintien des services, une baisse de la fiabilité du service avec des impacts sur les utilisateurs (Parlikad & Jafari, 2016). La prise de conscience survenue au début des années 2000 a permis de relancer les investissements de renouvellement, d'accroitre la fréquence d'entretien de ces infrastructures afin d'en améliorer le mode de gestion. En dépit de l'augmentation des taux de renouvellement dans les municipalités et l'utilisation des meilleures approches disponibles, plusieurs problèmes persistent en lien avec la performance et l'efficacité du mode de gestion des réseaux d'eau. Les gestionnaires des réseaux d'eau potable ne parviennent qu'à stabiliser l'état de leurs actifs, et à ralentir leur dégradation. Ils ne parviennent ni à résorber durablement le déficit d'interventions accumulé, ni à améliorer l'état global de leurs réseaux. Ceci est dû en grande partie aux difficultés d'inspection des canalisations souterraines d'eau, dont le diagnostic d'état est généralement réalisé à base d'indicateurs indirects, parfois inefficaces ou inappropriés (ASCE, 2013; Parlikad & Jafari, 2016). Il s'en suit un manque d'optimisation des interventions autant dans le temps pour intervenir au moment approprié, que dans l'espace pour intervenir au bon endroit. La capacité d'intervention des villes qui est déjà limitée, se voit donc non-optimisée rendant encore plus difficile l'amélioration des niveaux de services.

Dans ce contexte, la rétroaction et le retour d'expérience de plusieurs villes et municipalités canadiennes ont permis d'analyser et de mieux cerner les lacunes associées à l'utilisation des indicateurs d'état usuels et aux méthodes traditionnelles de prise des décisions d'intervention sur les conduites d'eau. Parmi les insuffisances relevées, on note le mauvais usage de certains indicateurs, des divergences dans les recommandations d'interventions issues d'indicateurs différents, un nombre trop élevé et parfois déraisonnable d'interventions urgentes généré. À cela, s'ajoute l'incapacité des gestionnaires de réseaux d'eau à améliorer l'état et la performance de leurs actifs malgré des taux de renouvellement acceptables, ainsi que le manque d'outils efficaces pour les supporter dans le choix du type d'intervention approprié. Pour pallier ces insuffisances, de nouveaux paramètres de détérioration des conduites d'eau ont été explorés dans cette recherche, de même qu'une nouvelle méthode de combinaison des

indicateurs d'état. Le but de ces travaux est de proposer une nouvelle approche plus optimale d'aide aux décisions de renouvellement des conduites d'eau, qui répond plus efficacement et durablement au besoin des municipalités. L'approche proposée intègrerait le retour d'expérience de plusieurs municipalités canadiennes, un meilleur encadrement des indicateurs, une meilleure connaissance et utilisation de l'impact spatio-temporel des bris antérieurs sur la dégradation future et la vulnérabilité des conduites adjacentes.

1.2 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux d'égouts

Un réseau d'égouts est un ensemble de canalisations reliées entre elles, et permettant la collecte et le transport des eaux usées et pluviales jusqu'à un point de traitement ou de déversement dans le milieu naturel. On y retrouve également des éléments ponctuels tels que les puisards, les drains, les regards, les postes de pompage, des chambres d'égouts, les trop-pleins, etc.

Dans le même contexte global que les réseaux d'eau potable, en rapport avec la période d'installation, les enjeux de vieillissement, les niveaux d'investissements et d'entretien, le mode de gestion, les réseaux d'égouts présentent également des déficits élevés d'entretien et d'investissements ainsi que des défis majeurs autant dans la performance de ces infrastructures, que dans la manière dont elles sont gérées. La problématique est plus prononcée pour les réseaux unitaires. Une forte portion d'entre eux présentent soit un mauvais ou très mauvais état, soit une capacité de drainage insuffisante, dans de nombreuses municipalités nord-américaines (ASCE, 2013; El-Housni et al., 2019; FCM et al., 2016). Ces problématiques sont causées par le déficit d'entretien et d'investissements des années passées, auquel s'ajoutent l'urbanisation accrue des villes, l'augmentation des portions de surfaces imperméables, la croissance des volumes d'eaux usées domestiques rejetées, et surtout l'augmentation des débits d'eaux de ruissellement pour les événements extrêmes, à la suite des changements et perturbations climatiques observés. Les réseaux d'égouts sont donc de plus en plus sollicités, alors que leur résistance mécanique n'est plus optimale du fait de leur vieillissement, et qu'ils ne sont plus capables de drainer les eaux sans débordements. Le

contexte des changements climatiques ainsi que les nouvelles normes environnementales de rejets et de protection des milieux récepteurs font en sorte qu'il est nécessaire d'apporter des changements aux méthodes traditionnelles de gestion des réseaux d'égouts afin de livrer un service efficace quant au drainage des eaux usées et pluviales, et ce au moindre coût possible.

Depuis une vingtaine d'années, des organismes de référence (AWWA, 2011; CNRC & FCM, 2003; MAMR, 2005; Réseau-Environnement, 1999) n'ont cessé d'attirer l'attention des gestionnaires d'infrastructures d'eaux usées sur le déficit d'entretien et d'investissements des Villes et les impacts futurs de ce déficit. Dès lors, les Villes ont essayé d'augmenter les investissements et les cadences de renouvellement, avec plus ou moins de réussite. Il est constaté malgré tout, que les taux de renouvellement sont encore largement inférieurs aux besoins, et que les infrastructures continuent de vieillir et de se dégrader à une grande vitesse. Une partie de la faute est attribuable à une approche peu efficace et peu optimale de gestion des infrastructures. En effet, les interventions préventives susceptibles de prévenir des défaillances prématurées, et de prolonger la durée de vie utile des conduites, ne sont pas toujours planifiées de façon adéquate, ni réalisées au bon moment. Il en est de même pour les inspections télévisées d'égouts qui ne sont pas toujours réalisées au meilleur moment et sur les actifs critiques. Outre le manque d'anticipation et de proactivité dans les interventions préventives, les interventions curatives ne sont pas toujours bien encadrées, laissant place à des prises de décisions trop subjectives et pas toujours optimales. Ainsi, les critères financiers, techniques et contraintes opérationnelles soutenant une réparation ponctuelle, une réhabilitation sans tranchée, une reconstruction partielle ou complète, un aménagement complémentaire d'ouvrage de rétention, l'utilisation de PGOs, ne sont pas toujours clairement établis dans les méthodes d'analyse proposées aux utilisateurs. De plus, les nouvelles contraintes et normes sociétales telles que les changements climatiques, les préoccupations concernant l'environnement, la pollution et le développement durable ne sont pas toujours prises en compte dans les modèles classiques (Ben Tagherouit & Bennis, 2012; Chughtai & Zayed, 2008; Di Sivo & Ladiana, 2010; Wang et al., 2019). Finalement, les indicateurs d'état et les critères de décision proposés aux utilisateurs ne sont pas toujours pertinents. Toutes ces insuffisances minent la performance des interventions réalisées sur les

réseaux d'égouts et rendent difficile l'amélioration de l'état global de ces réseaux, malgré les efforts significatifs de renouvellement consentis par les municipalités.

Le présent travail vise à proposer une nouvelle méthodologie plus efficace dans l'évaluation de l'admissibilité des conduites d'égouts à des interventions de renouvellement, en renforçant la proactivité des interventions et l'anticipation de la dégradation et du vieillissement prématurés des conduites au moyen de critères de décisions plus optimaux.

1.3 Mise en contexte et problématique liée à la gestion des réseaux de voirie

Les réseaux de voirie sont constitués des chaussées, des intersections, des ilots, des bordures de voie, des trottoirs et de tout aménagement de voirie destiné à faciliter la circulation et le transport des biens et des personnes. L'un des principaux défis de la gestion des réseaux de voirie est lié au fait que les chaussées se trouvant au-dessus des conduites d'eau potable ou d'égouts sont les premiers actifs à subir coupes et entailles diverses, lors des réparations de bris d'aqueduc ou des effondrements d'égouts. Leur durée de vie se retrouve donc réduite au fil des années en plus du fait qu'elle soit déjà beaucoup plus courte que celles des conduites d'eau potable ou d'égouts. En outre, les réseaux de voirie subissent les charges directes de la circulation routière et les aléas climatiques. Leur vieillissement est donc souvent prématuré, et leur état rarement en phase avec celui des conduites souterraines. Ce qui met les gestionnaires dans l'embarras quant à la nature exacte et la fréquence des interventions à y effectuer. Malheureusement les modèles actuels et outils disponibles pour l'aide à la gestion des chaussées présentent plusieurs lacunes en rapport avec la détermination de l'intervention optimale requise (Allouche et al., 2014; Knost & Mishalani, 2021; Matthews et al., 2012; Najafi & Perez, 2016; Selvakumar et al., 2015). Les travaux réalisés dans cette recherche ne visent pas à optimiser directement l'utilisation des indicateurs utilisés pour la gestion des réseaux de voirie. Ainsi, les règles de l'art préconisées dans la prise des décisions de renouvellement des chaussées, telles que présentées dans l'état de l'art, seront considérées tel quel dans l'optimisation du processus d'intégration des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie.

1.4 Mise en contexte et problématique liée à la gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie

Durant de longues années, la gestion des réseaux d'eau potable, celle des réseaux d'égouts, et celle des réseaux de voirie ont été réalisées de façon unilatérale, en silos, sans coordination des interventions et sans prise en compte de l'interdépendance ou des interactions entre les différents actifs situés dans la même emprise (Parlikad & Jafari, 2016). La prise de conscience s'est opérée dans les vingt dernières années, face à ce mode de gestion simple en apparence, mais inefficace, couteux, et non durable. En conséquence, les mentalités et les pratiques ont évolué vers une gestion intégrée et plus coordonnée des interventions sur ces trois actifs qui partagent habituellement la même emprise ou se situent dans la même tranchée. Toutefois, les règles qui encadrent la coordination des interventions sur les réseaux de voirie, d'aqueduc et d'égouts sont pour l'instant rares, insuffisantes et peu précises (Abu et al., 2018). En pratique, la coordination des interventions est essentiellement guidée par l'expérience des gestionnaires de ces infrastructures compte tenu du manque de références, d'informations utiles et de retour d'expériences dans ce nouveau domaine d'expertise. Ainsi, quand devancer ou quand retarder une intervention sur un actif afin de le coordonner avec des interventions sur d'autres actifs adjacents ou voisins sont des préoccupations qui reviennent fréquemment et auxquelles l'état actuel de l'art n'apporte pas de solutions précises et efficaces. Il en est de même pour la détermination des interventions optimales à effectuer sur chacun des actifs se trouvant dans la même emprise ou zone de travaux. Ces insuffisances font en sorte que des critères qui devraient être objectifs, clairs et précis, deviennent subjectifs et finalement peu efficaces. Il convient donc d'apporter des pistes de solutions ou des réponses à ce problème afin de corriger ces lacunes qui minent encore la gestion intégrée de ces réseaux.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre fait état des travaux, des articles, des ouvrages, des principes et références pertinents qui existent à ce jour, et gouvernent la pratique actuelle de la gestion des infrastructures urbaines d'eau et de voirie.

La gestion des réseaux d'eau potable, d'égout ou de voirie englobe plusieurs volets du cycle de vie des actifs, dont trois (3) sont essentiels : l'exploitation, l'entretien et le renouvellement des actifs. Ces activités s'inscrivent selon des horizons de planification et de réalisation distincts, allant du court-terme au long-terme (Tableau 2.1). On y distingue la gestion opérationnelle à court-terme, la gestion tactique à moyen-terme et la gestion stratégique à long-terme (ASCE, 2013; Hamilton, 2014; NAMS & IPWEA, 2006; Zeb, 2021).

Tableau 2.1 Résumé des niveaux de gestion, horizons de planification et activités d'une gestion sur le cycle de vie des infrastructures

Type de gestion	**Horizon de planification**	**Activités englobées**
Gestion opérationnelle (gestion à court-terme)	1 à 3 ans	Exploitation, réparations, entretien préventif, auscultation diagnostic (toute opération nécessaire au maintien ou à une remise en service rapide des actifs)
Gestion tactique (gestion à moyen-terme)	3 à 10 ans	Réhabilitation majeure, remise à niveau, réfection ou reconstruction (intervention requérant souvent une ou plusieurs années pour planifier et réaliser les travaux)
Gestion stratégique (gestion à long-terme)	> 10 ans	Planification du financement et des stratégies futures d'interventions sur les actifs présentement en bon état, mais qui arriveront en fin de vie dans un horizon plus ou moins prévisible; planification anticipée des activités du cycle de vie complet des actifs.

Les spécificités propres à chacun des réseaux (eau potable, égouts, et voirie) sont différentes en l'occurrence les outils de planification, les indicateurs de performance, les critères de déclenchement des interventions, les interventions requises à chaque étape de vie de l'actif, et seront présentées plus en détail dans les sections suivantes.

2.1 État de l'art dans la gestion des réseaux d'eau potable

2.1.1 Gestion opérationnelle à court-terme

La gestion opérationnelle à court-terme est une planification sur un court-horizon, soit environ 1 à 3 ans, des activités inhérentes au fonctionnement régulier des réseaux d'eau potable, au maintien ou au rétablissement rapide du service (L. Chen & Bai, 2019). On y retrouve surtout les opérations liées à l'exploitation des réseaux (mesures et régulation de pression, branchement de nouveaux utilisateurs, arrêts de service,…), les activités d'entretien préventif et curatif (rinçage de conduites, installation de protection cathodique,…), les réparations ponctuelles de bris ou de fuites (pose de manchon, pose de bout de conduite, réparation de joint,…), l'auscultation et la surveillance des réseaux (recherche systématique des fuites, auscultation télévisée) et finalement l'inspection régulière des éléments ponctuels (NAMS, 2006; Campbell, 2020; Hamilton, 2014; NAMS & IPWEA, 2006). De façon générale, la gestion opérationnelle comprend toutes les opérations destinées à maintenir et assurer le service envers la clientèle, c'est-à-dire la distribution fiable d'une eau de qualité, en quantité suffisante, et à la bonne pression (Réseau-Environnement, 1999). Du point de vue financier, la gestion à court-terme relève souvent du budget de fonctionnement annuel ou régulier alloué à l'exploitation et à l'entretien des infrastructures urbaines. L'entretien inclut toutes les activités liées à la maintenance urgente ou préventive des conduites ainsi que des actifs ponctuels et peut être réalisé avec ou sans interruption de service. Les réparations de bris d'aqueducs, la recherche de fuites, le rinçage unidirectionnel, le remplacement des anodes sacrificielles, les inspections, la manipulation et la réparation des vannes et bornes d'incendie, ainsi que le dégel et la réparation des branchements de service d'eau sont, entre-autres, des opérations d'entretien couramment réalisées sur les réseaux d'eau potable (Bruxelle, 2005; Montréal & CGT, 2011).

2.1.2 Gestion tactique à moyen-terme

La gestion tactique à moyen-terme couvre un horizon de planification d'environ 3 à 10 ans et prend en compte les investissements et travaux de renouvellement envisagés dans les années subséquentes. De l'identification du besoin de renouvellement à la réalisation concrète des travaux, en passant par la phase de budgétisation et de planification détaillée des interventions, il peut s'écouler plusieurs années, compte tenu du fait qu'il s'agit de travaux majeurs avec des implications financières, contraintes techniques et opérationnelles importantes. Ces travaux nécessitent généralement une planification plus longue, et plus ardue avec plusieurs étapes cruciales et un chemin critique plus serré. Le renouvellement des réseaux englobe les travaux de réhabilitation et de remplacement de canalisations ou de parties du réseau qui sont soit en fin de vie, ou qui présentent des niveaux de défaillances et de dysfonctionnements élevés (Jenkins, 2014). Ce renouvellement vise aussi à accroitre la fiabilité des réseaux, à réduire les risques de défaillances, et à diminuer les coûts d'entretien curatif (Desbiens, 2016; Réseau-Environnement, 1999). Au Québec en particulier, la planification du renouvellement des conduites défaillantes (conduites ne rencontrant plus les niveaux de service attendu), se fait sur un horizon de 5 ans à travers un livrable appelé « Plan d'intervention (PI) des réseaux d'eau potable ». Ce plan quinquennal dresse pour chaque municipalité le portrait d'état de ses réseaux ainsi que les priorités d'interventions pour chaque tronçon (MAMROT & CERIU, 2013). Cet exercice est évidemment renouvelé à la fin de la période de référence, soit les 5 années de validité du PI, durant lesquelles les conduites admissibles à des interventions doivent avoir été réhabilitées.

La gestion tactique du renouvellement des conduites d'eau potable est réalisée grâce à une combinaison d'indicateurs et de critères permettant d'apprécier l'état de chacune des conduites du réseau. Ces indicateurs ont évolué au cours des dernières années pour inclure aussi l'épaisseur résiduelle, le taux de fuites, le coefficient de Hazen-williams, les problématiques de pression, de qualité d'eau et de capacité insuffisante, les coûts de maintenance, d'opération et de surpression (MAMROT & CERIU, 2013; Leong, 2021; Moslehi, 2021). Toutefois, les indicateurs les plus populaires utilisés pour déterminer

l'admissibilité des conduites à des interventions demeurent ceux préconisés par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) et résumés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Indicateurs d'état des réseaux d'eau potable selon la méthodologie du MAMH

Identifiant	Indicateurs	Catégorie	Exigence	Niveau
EP-1	Nombre de réparations	Structural	Requis	Localisé
EP-2	Taux de réparations	Structural	Requis	Localisé
EP-3	Durée de vie écoulée	Structural	Requis	Localisé
EP-4	Qualité et pression d'eau - Plaintes et constats d'évènements	Fonctionnel	Complémentaire	Sectoriel
EP-5	Perte d'épaisseur relative de la paroi	Structural	Complémentaire	Localisé
EP-6	Susceptibilité au gel	Fonctionnel	Complémentaire	Localisé
EP-7	Pression statique - Mesures ou simulation	Fonctionnel	Complémentaire	Sectoriel
EP-8	Protection contre l'incendie - Mesures ou simulations	Fonctionnel	Complémentaire	Sectoriel
EP-9	Pression statique - Étude	Fonctionnel	Complémentaire	Localisé
EP-10	Protection contre l'incendie - Étude	Fonctionnel	Complémentaire	Localisé
EP-11	Qualité de l'eau – Étude	Fonctionnel	Complémentaire	Localisé

Ces indicateurs permettent d'apprécier les niveaux de service, selon le franchissement de seuils de performance établis et disponibles dans la littérature (MAMROT & CERIU, 2013). À titre d'exemple, le tableau 2.3 résume les différents états associés aux conduites, lorsque le nombre de bris historiques, le taux de bris ou la durée de vie écoulée sont choisis comme indicateurs et utilisés selon la méthodologie proposée par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013). Les autres indicateurs proposés par le MAMH en complément des trois précédents sont exposés dans l'annexe I.

Tableau 2.3 Utilisation du nombre de réparations, du taux de réparations et de la durée de vie écoulée selon la méthodologie du MAMH

EP-1 : Nombre de réparations historiques

Statut selon le nombre historique de réparations et la hiérarchisation	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
Conduite de longueur < 150 m				
Excellent	1	0	0	0
Bon	2	1	1	1-2
Moyen	3	2	2-3	3-4
Mauvais	4	3	4	5
Très mauvais	5	4 et +	5 et +	6 et +
Note : Pour les conduites de longueur ≥ 150 m, les critères en lien avec le nombre historique de réparations sont disponibles dans l'annexe I.				

EP-2 : Taux de réparations (nombre de réparations/km/an)

Statut selon le taux de réparations et la hiérarchisation	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
Excellent	1	0	0	<1
Bon	2	Sans objet	<1	1 à <2
Moyen	3	<1	1 à <2	2 à <3
Mauvais	4	1 à <2	2 à <3	3 à <4
Très mauvais	5	2 et +	3 et +	4 et +

EP-3 : Durée de vie écoulée

Statut selon le pourcentage de vie écoulée	**Cote**	**Pourcentage de vie écoulée**
Excellent	1	20 % et moins
Bon	2	> 20 à 50 %
Moyen	3	> 50 à 90 %
Mauvais	4	> 90 %
Très mauvais	5	Sans objet

Il est à noter qu'une conduite de hiérarchie I est une conduite ayant une importance élevée sur le réseau, soit à cause de l'importance de son diamètre, sa fonction ou encore l'ampleur des conséquences en cas d'un bris ou d'une défaillance. Une conduite de hiérarchie II est une conduite d'importance modérée alors qu'une conduite de hiérarchie III est une conduite de faible importance. Le nombre de réparations historiques (EP-1) prend en compte toutes les

réparations de bris survenues sur la conduite depuis son installation. Quant au taux annuel de bris (EP-2), il est calculé à partir des 5 pires années de bris, choisies parmi les 10 années précédant celle de calcul des indicateurs. Parmi les onze (11) indicateurs proposés par le MAMH, trois (3) sont minimalement requis pour l'établissement d'un plan d'intervention à savoir le nombre de réparations, le taux de réparations et la durée de vie écoulée. Parmi les onze (11) indicateurs proposés, quatre (4) sont liés à l'état structural des conduites tandis que sept (7) sont relatifs à l'état fonctionnel du réseau. Dans un premier temps, chaque conduite se voit attribuer une cote pour chacun des indicateurs utilisés. Puis la conduite se voit attribuer la pire cote issue de chacun des indicateurs évalués pour cette conduite. Les correspondances entre cotes, conditions des conduites et les différents statuts sont résumés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 Échelle pour l'évaluation des indicateurs selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Appréciation de la condition**	**Cote**
Excellent	Condition optimale	1
Bon	Condition acceptable	2
Moyen	Condition tolérable	3
Mauvais	Condition préoccupante	4
Très Mauvais	Attention immédiate	5

Finalement, les conduites obtenant au moins une cote localisée égale à 5 sont admissibles à des interventions immédiates. Les conduites ayant au moins une cote localisée égale à 4 sont admissibles à des interventions souhaitables. Les conduites obtenant une cote sectorielle de 4 ou 5 sont admissibles à des études ou auscultations approfondies alors que celles n'ayant aucune cote 4 ou 5 ne sont admissibles à aucune intervention. L'établissement des différentes classes d'intervention est résumé par la figure 2.1.

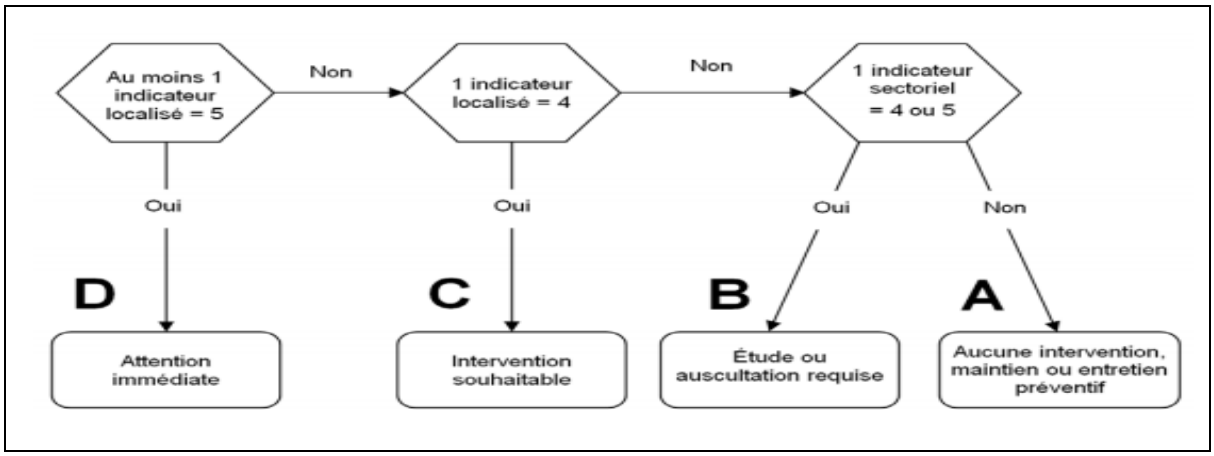


Figure 2.1 Arbre de décision du réseau d'eau potable selon la méthodologie du MAMH
Tirée de MAMH (2013, p. 52)

2.1.3 Gestion stratégique à long-terme

La gestion stratégique à long terme couvre le cycle de vie complet des conduites d'eau. Elle est arrimée avec la durée de vie des actifs (ASCE, 2013; Giacomella, 2021; Hamilton, 2014; NAMS & IPWEA, 2006) et va donc bien au-delà des prévisions de la gestion opérationnelle ou tactique. Les planifications stratégiques s'étendent donc sur un horizon dépassant les dix (10) ans et pouvant atteindre les cent (100) ans, et prévoient de façon sommaire et prévisionnelle les différentes activités et interventions qui seront nécessaires à différentes étapes du cycle de vie des conduites d'eau potable. L'objectif de cette planification est non seulement de prévoir les activités et interventions futures, mais aussi et surtout les budgets requis et le mode de financement de ces travaux. La gestion stratégique permet également de développer des stratégies permettant de prolonger durablement et à moindre coût la durée de vie des conduites qui se trouvent présentement dans un état moyen, afin d'anticiper des dégradations futures ou prévisibles qui nécessiteront des budgets plus conséquents (Ben Tagherouit & Bennis, 2012). Cette gestion est basée sur les modèles de prédiction permettant de simuler le vieillissement et la fin de la vie utile des conduites. Les résultats issus des simulations stratégiques permettent également de cibler le moment idéal pour réaliser des inspections au niveau des infrastructures prioritaires en tenant compte des contraintes économiques et logistiques (Al-Barqawi & Zayed, 2008). Les simulations issues de la gestion

stratégique à long-terme renseignent également sur la période d'amortissement, de rentabilité et de fin de vie utile probable des conduites (Nafi, 2006). Finalement, la gestion stratégique à long terme permet d'établir des plans d'investissements, des prévisions de budget et de financement, des cibles annuelles de renouvellement et les futurs scénarios d'interventions permettant de garantir la pérennité des réseaux. La gestion stratégique à long terme est davantage orientée vers la capacité à prévoir et à satisfaire les besoins futurs de la clientèle, tout en prenant les décisions nécessaires pour y arriver (Al-Barqawi & Zayed, 2006; Giacomella, 2021; Mohamed & Zayed, 2013; Wang et al., 2009; Werey, 2000; Zayed & Mohamed, 2013).

Les modèles de prédictions des défaillances des réseaux d'eau potable sont les principaux outils de simulation utilisés dans cet horizon de planification, et peuvent être regroupés en 3 principales catégories (Zangenehmadar & Moselhi, 2016) à savoir : (1) les modèles déterministes, (2) les modèles statistiques et probabilistes, (3) les modèles basés sur l'intelligence artificielle notamment les modèles experts flous, les réseaux de neurones artificiels et les modèles heuristiques.

Les modèles déterministes sont basés sur le principe de causalité et sont pour la plupart élaborés sur une base mécanistique ou empirique (St. Clair & Sinha, 2012) par les fabricants de canalisations d'eau à partir d'expériences réalisées en laboratoire sur leurs produits. Toutefois, les prédictions en termes de défaillances futures et de durée de vie, issues de ces modèles, sont considérées trop théoriques car elles ne prennent pas en compte les vraies conditions de terrain et d'utilisation des conduites (St. Clair & Sinha, 2012).

Les modèles statistiques et probabilistes sont basés sur l'historique des bris et défaillances réels observés sur une certaine période et la modélisation de l'évolution temporelle de ces bris et défaillances à l'aide des lois statistiques, des outils de régression ou des calculs de probabilités (Duchesne, Toumbou, & Villeneuve, 2016; Kabir, Tesfamariam, Loeppky, & Sadiq, 2015; Kabir, Tesfamariam, & Sadiq, 2015); (Duchesne et al., 2016; Mohammadi et al., 2020; Toumbou et al., 2012). Ces modèles sont les plus populaires et les plus utilisés

dans la planification à long terme des investissements compte tenu de leur simplicité et leur efficacité.

Les modèles basés sur l'intelligence artificielle ont été favorisés par l'évolution et la robustesse des outils informatiques actuels. Ces derniers ont permis d'utiliser l'intelligence artificielle des machines et les modèles mathématiques avancés pour combiner de nombreux paramètres et données afin d'établir de meilleures prédictions sur la base d'un apprentissage automatisé. Ces modèles sont capables de prédire avec une bonne précision, la durée de vie des conduites, les moments opportuns pour intervenir sur les différents actifs (Zangenehmadar & Moselhi, 2016), la performance des réseaux, les besoins d'entretien (Al-Barqawi & Zayed, 2006, 2008; El Chanati et al., 2015) et même le moment où apparaitront les bris et défaillances (Chen & Guikema, 2020; Harvey et al., 2013). Ces modèles sont toutefois peu populaires car ils sont trop sophistiqués, et nécessitent beaucoup de données.

2.2 Gestion des réseaux d'égouts

Un réseau d'égouts est un ensemble de canalisations reliées entre elles, et permettant la collecte et le transport des eaux usées et eaux pluviales jusqu'à la station d'épuration ou un lieu de déversement. On y retrouve également des éléments ponctuels tels que les puisards, les drains, les regards, les postes de pompage, des chambres d'égouts, les trop-pleins, etc.

2.2.1 Gestion opérationnelle à court-terme

La gestion opérationnelle à court-terme inclut les activités d'exploitation courante et d'entretien régulier des réseaux d'égouts mais exclut les interventions lourdes qui requièrent une période de planification plus longue, des implications de coordination et des contraintes techniques, opérationnelles et financières importantes (Desbiens, 2016; Hamilton, 2014). L'exploitation prend en compte toutes les opérations destinées à faciliter la collecte et l'acheminent des eaux usées et pluviales depuis leur point d'utilisation ou d'entrée dans les réseaux d'égouts vers la station d'épuration des eaux usées ou vers le cours d'eau récepteur dans les cas des eaux pluviales, sans causer de dommages aux résidents. Elle inclut le

contrôle et le fonctionnement des postes de pompage d'égouts, la gestion en temps réel des intercepteurs, des trop-pleins et des émissaires. Le drainage des eaux pluviales doit être réalisé sans débordement, sans refoulement, autant que possible de façon gravitaire, tout en respectant un certain nombre de normes environnementales et de bonnes pratiques en vigueur. La gestion opérationnelle des réseaux d'égouts inclus également la gestion en temps réel des effluents d'eaux usées et pluviales où les positions et points de consignes de différents ouvrages sont dynamiques, varient et son dictés en fonction de certaines mesures ou prédictions (Bruxelle, 2005; Lalonde, 2005). L'entretien des réseaux d'égouts englobe l'inspection des conduites d'égouts (par téléobjectif ou caméra tractée), le nettoyage, le colmatage, la réparation des joints de conduites, les réparations ponctuelles de conduites (trous, problème ponctuel d'étanchéité), regards, drains, puisards, poste de pompage, le remplacement des têtes, cadres ou grilles de puisards et regards, la détection et la correction des raccordements inversés. Les activités d'entretien peuvent donc être de nature préventive ou curative, ou encore des inspections diagnostiques permettant d'apprécier et de suivre l'état des conduites d'égouts. Elles répondent donc soit à des besoins urgents détectés, soit à une stratégie d'entretien préventive établie (CNRC & FCM, 2003; MAMROT & CERIU, 2012; Montréal & CGT, 2011; Québec, 2013; Réseau-Environnement, 1999).

2.2.2 Gestion tactique à moyen-terme

La gestion tactique à moyen-terme couvre généralement un horizon moyen d'environ 5 ans, tout comme celle des réseaux d'eau potable (Hamilton, 2014). Elle est également orientée vers la planification des projets et la concrétisation des travaux de renouvellement des conduites d'égouts se trouvant en mauvais ou en très mauvais état. L'identification des besoins et des priorités d'interventions sur les différentes conduites du réseau est réalisée à travers un plan d'intervention (PI) généralement triennal ou quinquennal où sont listées toutes les conduites admissibles aux interventions de réhabilitation ou de reconstruction.

La sélection des conduites admissibles aux interventions est basée sur des indicateurs d'état dont les plus populaires proviennent des résultats d'inspections télévisées, d'analyses ou de

simulations hydrauliques. D'autres indicateurs tels que l'âge de la conduite d'égouts, son historique de réparations, la fréquence des mises en charge, le facteur de charge théorique, la capacité de résistance aux sollicitations mécaniques externes, les problèmes de contamination à l'égout, les problèmes d'étanchéité, la fréquence des débordements, les plaintes relatives aux odeurs, la vulnérabilité du milieu environnant, sont également proposés dans la littérature pour aider à la prise des décisions d'interventions sur les conduites d'égouts.

Différentes approches méthodologiques encadrant l'utilisation des indicateurs les plus pertinents sont proposées dans la littérature pour déterminer les interventions les plus bénéfiques. Ainsi, Ben Tagherouit et Bennis (2012) proposent une évaluation des différentes conduites d'égouts, basée sur le *goal-progamming* pour optimiser la planification de la réhabilitation des réseaux d'égouts, avec l'utilisation d'un système expert flou et d'une programmation binaire. Cette approche prend en compte la combinaison des performances structurales et fonctionnelles afin d'établir une cote globale pour la conduite d'égouts. Le modèle comporte une possibilité d'extension du programme pour inclure les contraintes budgétaires, les coûts de maintenance et ceux de reconstruction. L'une des approches les plus utilisées est celle proposée par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013). Cette approche priorise les résultats issus d'inspections télévisées qui sont des données obligatoires à fournir lors de la production du plan d'intervention des réseaux. De plus, cette approche recommande l'utilisation des 4 indicateurs d'état listés au tableau 2.5 pour l'établissement des PI. Les grilles d'évaluation des différents indicateurs sont présentées à l'annexe II.

Tableau 2.5 Indicateurs d'état du réseau d'égout selon la méthodologie du MAMH

Identifiant	**Indicateur**	**Catégorie**	**Exigence**	**Niveau**
EU-1 ; EPL-1	État structural - inspection	Structural	Requis	Localisé
EU-2 ; EPL-2	Problème hydraulique - registre	Fonctionnel	Complémentaire	Sectoriel
EU-3 ; EPL-3	Défaillance structurale - inspection	Fonctionnel	Requis	Localisé
EU-4 ; EPL-4	Problème hydraulique - étude	Fonctionnel	Complémentaire	Localisé

Pour chacun des indicateurs, les cotes varient de 1 à 5, selon la gravité des déficiences. Les cotes 1, 2, 3, 4 et 5 représentent successivement l'état excellent, bon, moyen, mauvais et très mauvais. Après l'établissement des cotes pour chaque indicateur évalué, la prise de décision est effectuée en s'aidant de l'arbre de décisions de la figure 2.2. Cet arbre combine toutes les cotes obtenues par la conduite pour les différents indicateurs évalués.

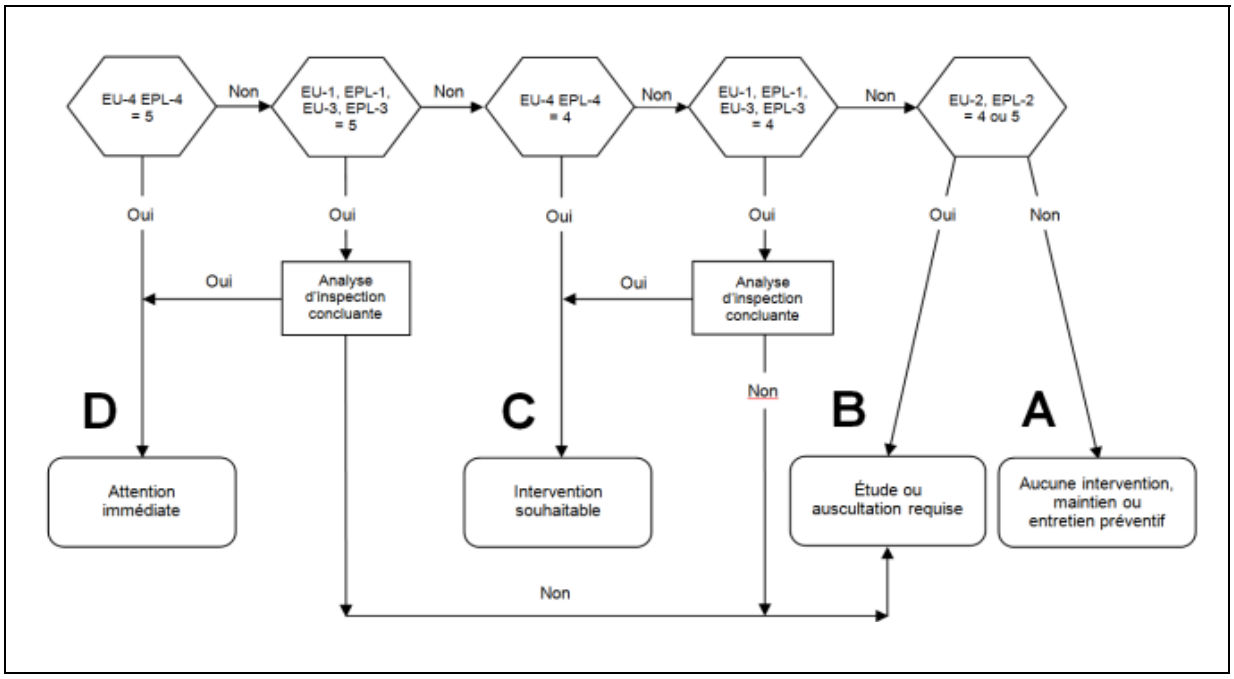


Figure 2.2 Arbre de décision du réseau d'égouts selon la méthodologie du MAMH
Tirée de MAMH (2013, p. 54)

Bien que l'arbre de décision ne conduise pas directement au type d'intervention spécifique à effectuer, le MAMH a néanmoins rendu disponible un guide d'aide au choix d'intervention selon l'état précis de détérioration de la conduite d'égouts en fonction de la gravité et de la répétition des défauts (MAMROT & CERIU, 2012). Il existe aussi des modèles avancés d'évaluation de la détérioration des conduites d'égouts, permettant d'estimer l'état actuel et l'intervention optimale requise, en se basant sur le dernier état connu pour la conduite d'égout (Ana & Bauwens, 2010). Les principales interventions sur les conduites d'égouts sont : réhabilitation structurale, réhabilitation fonctionnelle, réhabilitation avec ou sans

tranchée, remplacement complet ou partiel, réparation ponctuelle (Ben Tagherouit & Bennis, 2012; Kaddoura & Zayed, 2021; MAMROT & CERIU, 2012; Selvakumar et al., 2015).

Face aux nouveaux défis constatés dans la gestion traditionnelle des eaux pluviales ainsi que des conduites d'égouts qui y sont impliquées, des solutions novatrices, en l'occurrence les pratiques de gestion optimale (PGO), ont vu le jour au cours des deux dernières décennies afin de mieux gérer les eaux pluviales et l'impact des changements climatiques. En effet, l'urbanisation grandissante des villes, l'augmentation des surfaces imperméables dues aux nouveaux développements, les changements climatiques occasionnant des pluies plus intenses ou plus longues, augmentant par ricochet les quantités d'eaux ruisselées dans les réseaux d'égouts qui se mettent souvent en charge et provoquent des débordements (MDDELCC & MAMROT, 2011; El-Housni, 2018; El-Housni, 2019). Le problème est encore plus prononcé dans les réseaux unitaires. Ces derniers ont été construits il y a des années, n'ont pas été conçus pour les mêmes intensités de pluie, et présentent aujourd'hui, dans bien des cas, des défaillances fonctionnelles dues à l'augmentation de leur rugosité suite à leur vieillissement ou un mauvais entretien. Parallèlement, le degré de pollution élevé des premières eaux de ruissellement fait en sorte qu'il est nécessaire que ces premières eaux parviennent à la station d'épuration. Par le passé, on résolvait le problème en augmentant le diamètre des conduites, ou en érigeant des bassins de rétention. Ces solutions traditionnelles sont aujourd'hui insuffisantes et doivent être combinées à d'autres types de solutions car il y a désormais beaucoup de contraintes financières, techniques, sociales et environnementales qui rendent difficiles leur application et réduisent leur efficacité (Chocat, 1997). C'est dans ce contexte qu'une série de PGOs a été mise au point pour améliorer la gestion des eaux pluviales. Les PGOs favorisent la recharge de la nappe phréatique, l'augmentation du temps de parcours des eaux de ruissellement grâce à un stockage ou à une infiltration à la source, en réseau ou en fin de réseau. Ces pratiques permettent aussi la réduction de la pollution environnementale et celle du milieu récepteur, tout en favorisant le traitement des eaux de ruissellement au plus près de leur source (Boucher, 2010; MDDELCC & MAMROT, 2011). Ces pratiquent laissent envisager des solutions efficaces et moins couteuses dans la gestion durable et à long-terme des défaillances fonctionnelles d'égouts sans être obligé de renouveler ou reconstruire entièrement les réseaux. Toutefois, l'utilisation des PGOs

demeure très réduite dans la gestion actuelle des eaux pluviales et des réseaux d'égouts en raison du manque de données relatives à leur application.

2.2.3 Gestion stratégique à long-terme

Ce type de gestion vise la mise en place des politiques de gestion envisagées à long terme, des plans directeurs, des bonnes pratiques et des projets qui nécessitent plus de temps pour être réalisés ou intégrés aux habitudes de gestion, dans l'optique de pérenniser les infrastructures d'égouts tout en s'adaptant progressivement aux normes, contraintes et besoins futurs (Werey et al., 2012). C'est donc une planification à long-terme des stratégies de gestion, des scénarios d'investissements, des ressources financières et techniques, des cibles de renouvellement à long-terme qui permettront de répondre efficacement et raisonnablement aux besoins futurs de la clientèle, généralement dans un horizon de 20 ans, 50 ans, 100 ans ou plus (Davenport et al., 2014; Guzmán-Fierro et al., 2020; Hamilton, 2014; Kaddoura & Zayed, 2021; Uddin et al., 2013). Pour cela, il est donc important de faire des prédictions sur l'état et l'occurrence des défaillances, ainsi que des prévisions d'ordre financier et technique, sans oublier la prise en compte des nouveaux paramètres et défis, des nouvelles contraintes et normes de notre société tels que les changements climatiques, les préoccupations concernant l'environnement, la pollution et le développement durable (Ben Tagherouit & Bennis, 2012; Chughtai & Zayed, 2008; Di Sivo & Ladiana, 2010). Pour aider aux prévisions, il existe plusieurs modèles de prédiction des dégradations d'égouts disponibles dans la littérature (Ana & Bauwens, 2010; Chughtai & Zayed, 2008; Lalonde, 2005; Su et al., 2020). On distingue principalement : les modèles déterministes, les modèles statistiques et probabilistes et les modèles mathématiques avancés.

Les modèles déterministes sont pour la plupart composés de courbes de dégradation généralement basées sur les caractéristiques intrinsèques de la conduite d'égouts. Ils permettent de prédire, grâce aux essais en laboratoire, certaines détériorations futures de la conduite en service, dues à son vieillissement naturel, à l'augmentation des charges mortes ou de trafic, à l'environnement de la conduite d'égout ou encore à un mauvais entretien (Ana

& Bauwens, 2010). Bien que les défaillances puissent être de nature structurale ou fonctionnelle, c'est généralement l'état structural qui est généralement prédit par les modèles déterministes. On se réfère généralement à ces modèles pour de nouvelles techniques ou de nouveaux matériaux encore peu connus ou lorsque les données statistiques sont limitées ou insuffisantes pour établir des tendances statistiques à long terme. De nombreuses municipalités canadiennes dont la Ville de Montréal et de Québec utilisent ces modèles pour la gestion à long terme de leurs réseaux d'égouts, en combinaison avec d'autres approches (Montréal & CGT, 2011; Québec, 2013). Ces modèles permettent un suivi théorique de l'état des égouts, une priorisation des conduites à inspecter, mais ils ne sont pas utilisés dans la prise de décision directe de renouvellement (Ana & Bauwens, 2010).

Les modèles statistiques et probabilistes utilisent des fonctions de survie, des lois statistiques ou des analyses probabilistes d'occurrence des défaillances (Ana & Bauwens, 2010; Rutsch et al., 2006), calibrées avec des données réelles observées sur une période. À titre d'exemple, les modèles ROCA et GompitZ sont des modèles statistiques et probabilistes très utilisés en Europe, alors que les chaines de Markov et Weibull sont très populaires en Amérique du Nord (Ana & Bauwens, 2010). Ils permettent, entre autres, de modéliser les risques de défaillances, de prédire le vieillissement et la dégradation des conduites d'égouts, d'apprécier la sensibilité des conduites et l'impact de leur défaillance sur le fonctionnement global du réseau (Santos et al., 2016). Ces modèles permettent aussi de simuler à long-terme l'effet des réhabilitations annuelles et successives de conduites sur le réseau (Werey et al., 2012). La figure 2.3 illustre un exemple d'application du modèle statistique par les ingénieurs de la Ville de Montréal (Montréal, 2013) tandis que la figure 2.4 en illustre un autre, utilisé en Saskatchewan et réalisé avec la loi de Weibull par la firme Tetra-Tech (Tetra-Tech, 2015).

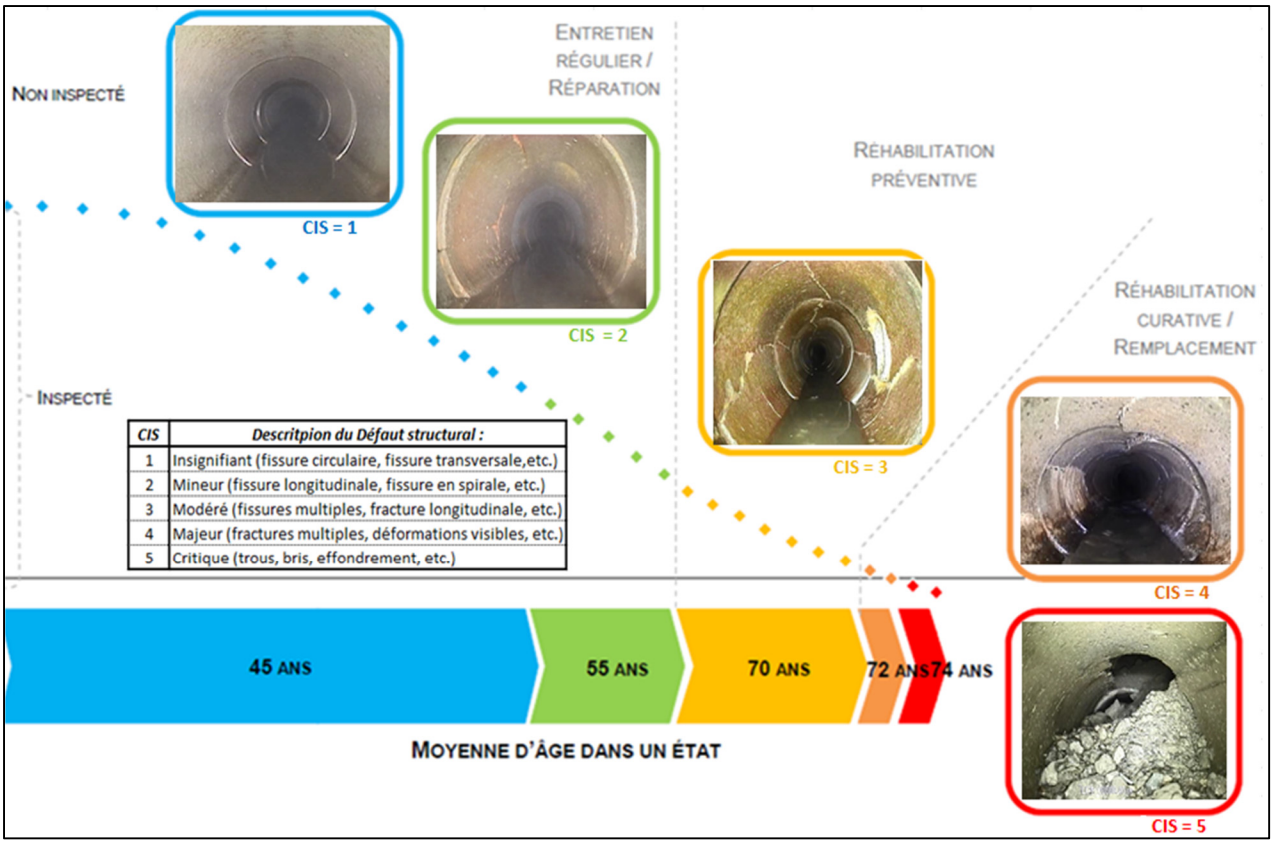


Figure 2.3 Courbe de dégradation des conduites d'égouts en béton armé de la Ville de Montréal construite selon un modèle déterministe

Tirée de Montréal (2013, p. 23)

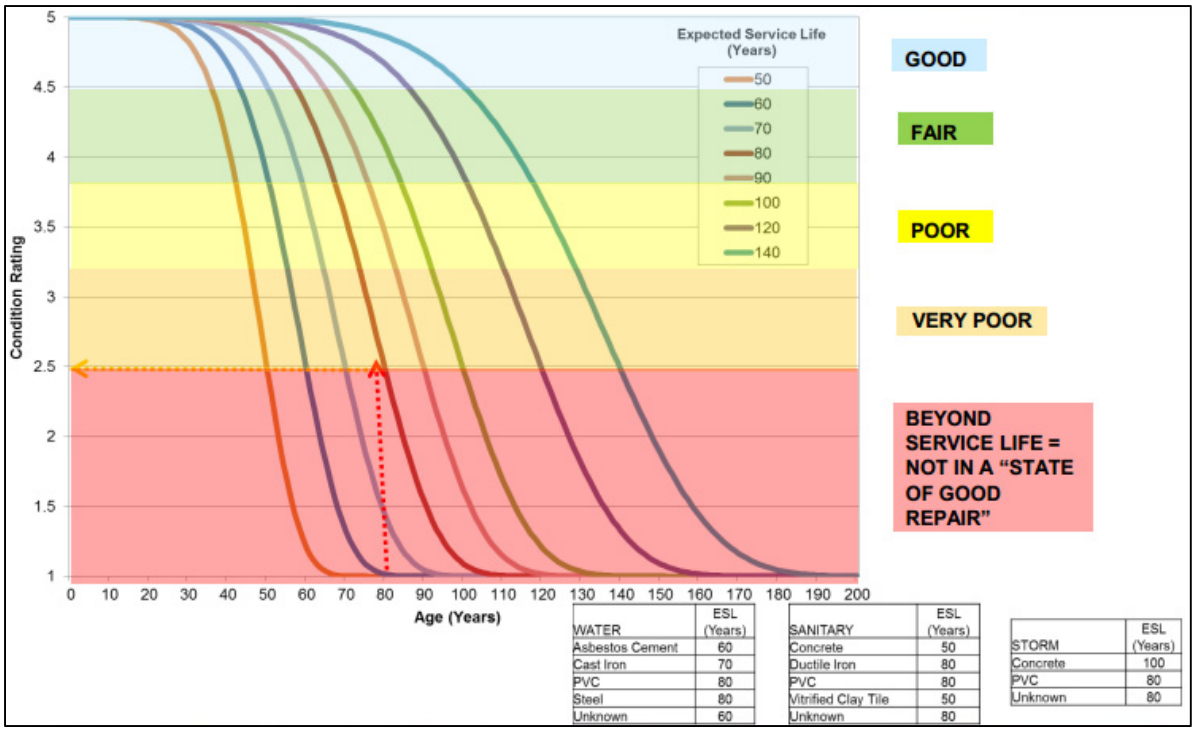


Figure 2.4 Courbe de dégradation des conduites d'égouts de la Saskatchewan selon le modèle de Weibull

Tirée de Tetra-Tech (2015, p. 25)

Les modèles avancés, tels que les réseaux de neurones artificiels et les modèles experts flous, font un usage soutenu de l'intelligence artificielle des systèmes informatiques de traitement de données, ainsi que des modèles mathématiques avancés. Ces modèles sont capables de combiner un grand nombre d'informations et de données liées directement ou indirectement à l'état de la conduite, pour faire des prédictions de l'évolution future des dégradations (Chughtai & Zayed, 2008). Le principe est d'apprendre à partir d'intrants et d'observations réelles puis de déceler les relations qui s'établissent entre des causes données et des conséquences observées, puis de reproduire le même raisonnement pour prédire l'état futur d'autres objets (Ana & Bauwens, 2010). Ces modèles utilisent des algorithmes complexes et lourds à manipuler. Ils sont qualifiés de modèles à boites noires compte tenu de la difficulté à cerner le contenu de ces modèles (Ben Tagherouit & Bennis, 2012). Ces modèles sont capables de traiter des données incomplètes, incertaines, ou ambiguës ou encore de faire usage d'une base minimale d'intrants (Ana & Bauwens, 2010; Harvey et al., 2013).

2.3 Gestion des réseaux de voirie

Un réseau de voirie est un ensemble de chaussées, d'ilots, de trottoirs et d'aménagements routiers divers reliés entre eux pour permettre et favoriser la mobilité, le déplacement et le transport des biens et des personnes d'un endroit vers un autre. Les chaussées constituent l'actif le plus important au sein des réseaux de voirie dont ils capitalisent la grande partie de la valeur monétaire.

2.3.1 Gestion opérationnelle à court-terme

La gestion à court-terme prend essentiellement en compte les activités d'entretien courant telles que la réparation des nids de poules, des ornières, des trous de roues, des affaissements de la chaussée, des dégradations ponctuelles de la couche superficielle, la réfection des marques de signalisation, de l'éclairage (Hamilton, 2014; Mokhbi & Assaf, 2015; Walters & Lees, 2013). Elle inclut également la réparation d'un bout de chaussée suite à un bris d'aqueduc ou un effondrement d'égouts. Ce type de gestion vise soit un maintien de l'état et de la performance des actifs en effectuant la réparation des défauts mineurs constatés avant l'amplification des détériorations, soit une remise en service rapide du tronçon de voirie suite à une interruption de la circulation causée par un défaut ponctuel significatif nécessitant une intervention urgente. Qu'elle soit planifiée ou non, la gestion opérationnelle à court-terme des réseaux de voirie est une tâche à l'année pleine pour répondre à des besoins d'entretien préventif ou curatif. Elle nécessite une courte durée de planification et/ou d'intervention, de faibles budgets ainsi que peu de ressources et de contraintes opérationnelles (CNRC & FCM, 2003; FCM et al., 2012; NAMS & IPWEA, 2006). Ces activités se déroulent généralement sans fermeture complète du tronçon requérant les interventions d'entretien, et des inspections visuelles suffisent dans la plupart des cas pour statuer sur l'état de la route et ses besoins d'entretien qui sont souvent des réparations mineures ou du nettoyage (FCM et al., 2016; Knost & Mishalani, 2021; Mokhbi & Assaf, 2015). Les budgets alloués à ce type de gestion sont généralement basés sur l'expérience des années précédentes quant aux réparations curatives urgentes survenues sur le réseau et les prévisions d'activités d'entretien préventif planifiées.

2.3.2 Gestion tactique à moyen-terme

La gestion à moyen-terme vise à planifier les interventions majeures telles que la réhabilitation ou la reconstruction des chaussées se trouvant dans un état critique (mauvais ou très mauvais), et dont la planification et la réalisation des travaux sont plus complexes à mettre en œuvre. Ces interventions occasionnent généralement des fermetures de voies, des coordinations importantes avec d'autres services ou d'autres actifs, des durées de travaux plus longues, des coûts plus élevés, et des impacts socio-économiques significatifs. Il peut s'agir d'un resurfaçage, d'un planage-revêtement, d'un renforcement de la couche de fondation, d'un élargissement de la voie, d'un réaménagement, ou encore d'une reconstruction partielle ou complète (Bruxelle, 2005; Knost & Mishalani, 2021; Lalonde, 2005). Le but de ce type de gestion est le renouvellement à moyen terme des chaussées du réseau se trouvant en fin de vie, ou dont l'état de détérioration est assez avancé. Compte tenu de leur accessibilité, l'évaluation de l'état des infrastructures routières est en pratique plus simple à établir que celle des conduites d'eau potable ou d'égouts, ces dernières étant enterrées. Il existe des méthodes d'inspections visuelles, d'inspections télévisées, des tests de capacité structurale, des méthodes directes et indirectes de mesures des dégradations des chaussées, ainsi qu'une panoplie d'indicateurs d'état potentiels proposés aux gestionnaires des réseaux de voirie pour apprécier l'état de leurs actifs (Ville de Québec, 2013). Les indicateurs les plus utilisés pour la production des plans d'interventions des réseaux de voirie sont : l'indice de rugosité international (IRI), l'état de la surface, le confort au roulement, la profondeur des ornières, la susceptibilité au gel, la capacité structurale, l'indice de performance de la chaussée, l'historique des réparations, les coûts d'entretien ou de maintien (Abaza et al., 2004; Alinizzi, 2013; Bruxelle, 2005; CNRC & FCM, 2003; FCM et al., 2016; Lalonde, 2005; Mokhbi & Assaf, 2015). La production des plans d'intervention est souvent triennale ou quinquennale afin de laisser aux municipalités le temps d'effectuer les travaux requis sur les réseaux avant l'élaboration d'un nouveau plan d'intervention. A titre d'exemple, le MAMH (MAMROT et CERIU, 2013) propose aux municipalités du Québec l'utilisation de quatre (4) indicateurs (état de la surface, confort au roulement, susceptibilité au gel et capacité structurale) dont les niveaux de sévérité varient de 1 à 5 (voir tableau 2.4),

et une détermination des classes d'intervention par chaussée, selon l'arbre de décision illustré à la figure 2.5. Les grilles d'évaluation des différents indicateurs de la chaussée, telles que préconisées par le MAMH, sont présentées plus en détails à l'annexe III.

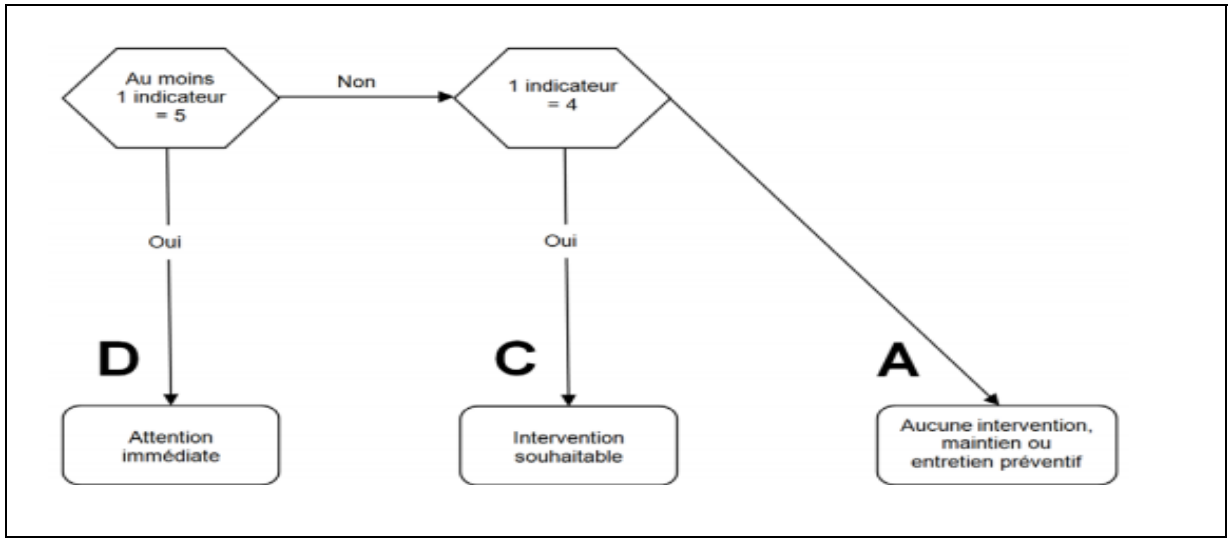


Figure 2.5 Arbre de décision des chaussées selon la méthodologie du MAMH
Tirée de MAMH (2013, p. 55)

2.3.3 Gestion stratégique à long-terme

La gestion à long-terme des chaussées permet la mise en place des stratégies d'investissements, politiques de financement et scénarios d'interventions à long-terme, permettant de prévoir les ressources nécessaires pour être capable de réaliser les différentes activités et interventions qui seront requises tout au long de la vie de l'infrastructure, ainsi que sa reconstruction à la fin de sa vie utile. C'est donc une gestion sur le cycle de vie, dont le but est d'assurer la pérennité des infrastructures et la satisfaction à long-terme des besoins de la clientèle en termes de mobilité (FCM et al., 2012, 2016; H. Wang & Wang, 2019). Les planifications à long-terme sont généralement basées sur des modèles de prédictions à long-terme de l'évolution de l'état de la chaussée. Ces modèles de prédiction des détériorations des routes sont de 3 types (Alinizzi, 2013) : les modèles empiriques, les modèles mécanistiques, et mécanistiques-empiriques. Les simulations se font généralement sur la durée de vie des infrastructures routières, soit environ une vingtaine d'années (Montréal,

2014; Québec, 2013), et permettent des prédictions théoriques de l'état des chaussées dans le temps, afin de planifier les besoins d'interventions et les budgets alloués aux travaux de reconstruction ou de réhabilitation (Abaza et al., 2004; CNRC & FCM, 2003; NRC-CNRC, FCM, & Canada, 2003; Walters & Lees, 2013). À titre d'exemple, la figure 2.6 illustre une courbe de dégradation issue d'un modèle empirique utilisée par la ville de Québec pour prédire l'évolution de l'état de ses infrastructures routières (Québec, 2013). Sur cette figure, le rouge correspond à un état très mauvais et très critique alors que le bleu traduit un excellent état. Cette figure révèle l'importance d'intervenir au bon moment sous peine de rater des opportunités intéressantes d'améliorer à moindre coût l'état de l'infrastructure.

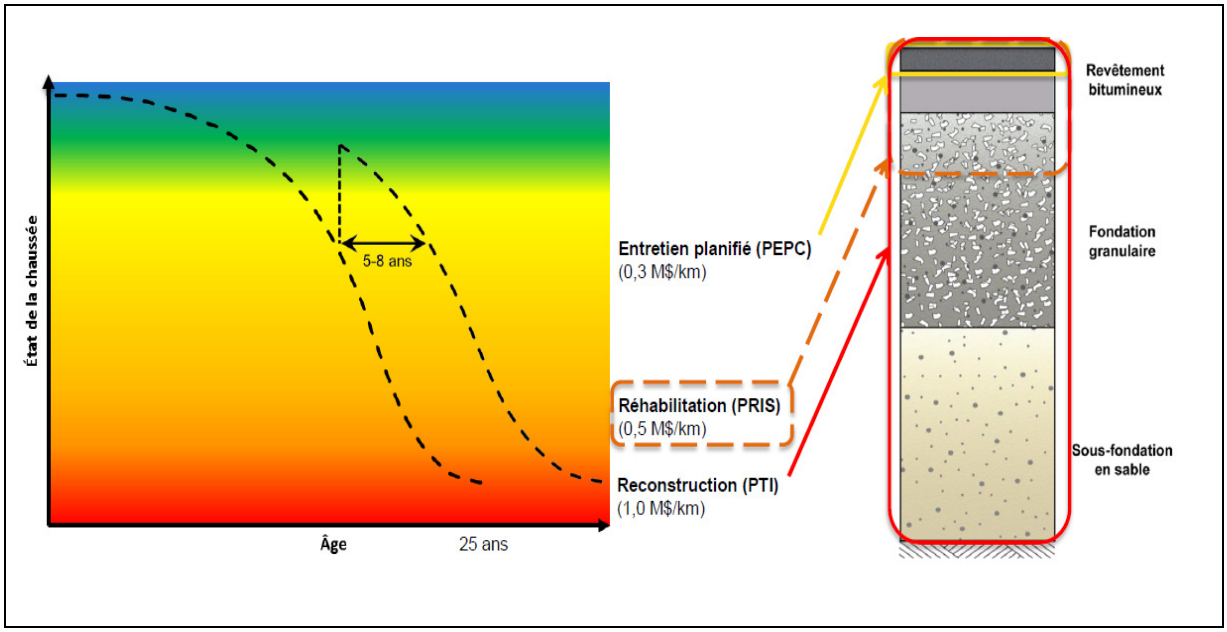


Figure 2.6 Courbe de dégradation des chaussées de la Ville de Québec
Tiré de Québec (2013, p. 13)

2.4 Gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie

Traditionnellement, la gestion des réseaux d'eau potable, celle des réseaux d'égouts ou celle des réseaux de voirie a souvent été réalisées en silos, de façon unilatérale ou non coordonnée. En conséquence, la chaussée pourrait être neuve alors que les conduites d'eau potable ou d'égouts du même tronçon se trouvent dans un état critique. De même, les conduites d'eau

pourraient être en mauvais état sous une chaussée nouvellement construite. Dans les deux cas, les infrastructures en mauvais état vont accélérer la détérioration et le vieillissement prématuré des infrastructures de la même tranchée se trouvant en excellent état, de même les interventions en silos sur les actifs font perdre les opportunités d'effectuer des économies de masse sur l'immobilisation de la machinerie, la main d'œuvre ou les excavations, alors que la tendance actuelle des gouvernants est à l'économie et aux restrictions budgétaires (Di Sivo & Ladiana, 2010). Les modèles traditionnels basés sur une gestion en silos des différents actifs ont montré leurs nombreuses limites à savoir : coûts de gestion élevés, fréquences élevées des interruptions de services, des nuisances et perturbations sociales dues aux travaux, coûts élevés des travaux, coûts sociaux élevés, taux de renouvellement faibles, dommages causés aux autres infrastructures se trouvant dans la zone de travaux (Chartrand, 1999; Sadek, 2003; (Chartrand et al., 1999; Elsawah et al., 2016; Elsawah et al., 2014; Giacomella, 2021; Lalonde, 2005; Sadek et al., 2003; Thomas et al., 2012; Yong Kim & Thuc, 2021). Des études budgétaires ont montré que le tiers des coûts de travaux de renouvellement des conduites d'eau potable ou d'égouts sont attribuables à la réfection de la chaussée et que ces coûts ainsi qu'une bonne part des coûts sociaux pourraient être économisés si les travaux étaient coordonnés sur l'aqueduc, l'égout et la chaussée (Montréal & CGT, 2011). Cette prise de conscience a conduit les gestionnaires de ces réseaux vers une gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie, mettant ainsi l'accent sur la coordination des interventions sur les différents actifs d'une même emprise. Ainsi le MAMH préconise par exemple de prioriser les travaux sur les tronçons où plusieurs actifs sont critiques; c'est-à-dire en mauvais ou très mauvais état. Il recommande également, lorsqu'un des actifs du tronçon nécessite une intervention immédiate, d'intervenir aussitôt de façon immédiate sur tous les actifs du même tronçon qui requièrent une intervention initialement souhaitable (MAMROT & CERIU, 2013). Halfawy (2013) propose l'architecture d'une approche d'analyse optimisée des coûts effectifs sur le cycle de vie des différents actifs du tronçon, en tenant compte des avantages monétaires globaux liés à l'utilisation de différentes combinaisons de paramètres et d'interventions tels que : performance actuelle des différents actifs du tronçon, interdépendance entre eux, urgence des interventions requises, niveau de performance attendu, techniques de renouvellement efficaces disponibles, impact sur les

coûts d'entretien, d'exploitation et de gestion des risques de dysfonctionnement. La figure 2.7 illustre le cadre théorique qu'il propose pour l'intégration des trois réseaux. Toutefois, le modèle proposé par Halfawy (2013) requiert trop de paramètres et de processus de traitements, ainsi que des outils d'optimisation très avancés. Ceci rend son utilisation trop complexe autant pour un seul tronçon qu'à l'échelle d'un secteur ou d'une municipalité avec plusieurs réseaux. L'approche de Alinizzi (2013) est similaire à celle de Halfawy autant dans la méthode (Analyse des coûts effectifs sur le cycle de vie), que dans la complexité du traitement compte tenu des nombreux paramètres à combiner et à traiter.

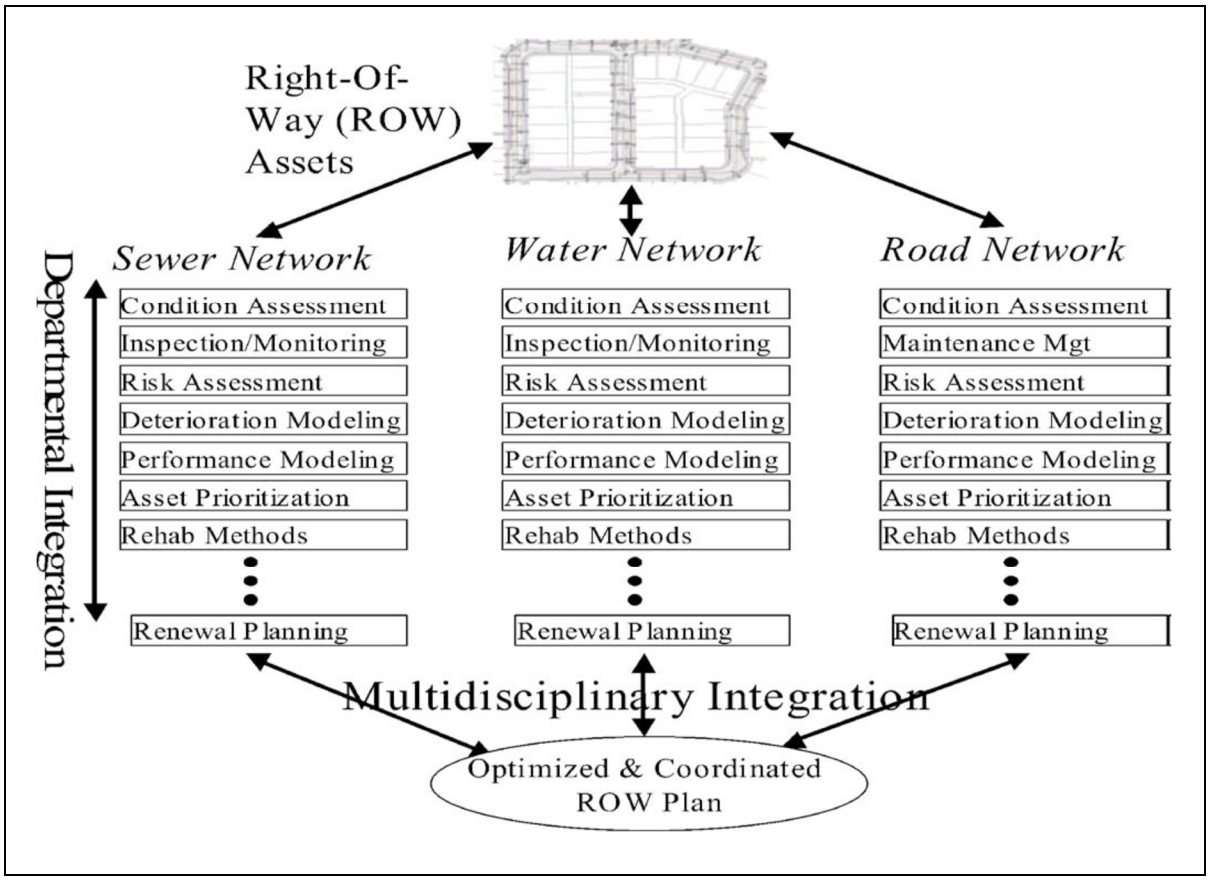


Figure 2.7 Processus d'intégration des réseaux d'eau et de voirie d'un même tronçon selon le modèle de Halfawy

Tirée de Halfawy (2013, p. 2)

Elsawah et al. (2016) proposent d'établir pour chacun des actifs situés dans un tronçon commun, un indice de criticité individuel compris entre 1 et 5 selon l'urgence et le besoin

d'intervention (voir tableau 2.6), puis de produire un indice de criticité intégré pour tout le tronçon qui tient compte de toutes les infrastructures présentes, et ceci en combinant progressivement les actifs deux à deux (voir table 2.7).

Tableau 2.6 Indice de criticité individuel pour chaque réseau du tronçon unifié selon le modèle d'Elsawah

Indice de criticité individuel	**Niveau de détérioration**	**Action ou intervention requise**
1	Non critique	Aucune
2	Peu critique	Aucune ou Entretien de routine
3	Moyennement critique	Inspection, suivi régulier, maintenance
4	Très critique	Réparation/remplacement à court-terme
5	Extrêmement critique	Réparation/remplacement immédiat

Tableau 2.7 Indice de criticité intégré du tronçon unifié selon le modèle d'Elsawah

		Indice de criticité de l'actif 1 (conduite d'eau potable par exemple)				
		1	2	3	4	5
Indice de criticité de l'actif 2 (conduite d'égout par exemple)	1	1	2	3	3	4
	2	2	2	3	4	4
	3	3	3	3	4	4
	4	3	4	4	4	5
	5	4	4	4	5	5

Cependant, la méthode d'intégration proposée par le MAMH ainsi que celle proposée par Elsawah n'offrent pas d'aide à la décision quant aux types d'interventions adéquats et requis sur chacun des différents actifs du tronçon. Ce qui fait en sorte que les interventions à

effectuer deviennent subjectives et sont choisies sans critère de performance, d'efficacité ou de rentabilité (à long-terme). Dans la pratique, on retrouve également d'autres façons de procéder plus conservatrices. Ainsi, la Ville de Montréal, par exemple, reconstruit automatiquement tous les actifs d'un même tronçon dès lors que l'égout, qui est en théorie l'actif le plus profond de la tranchée, est à reconstruire. D'autres municipalités reconstruisent automatiquement les réseaux de voirie, d'aqueduc et d'égouts dès lors qu'un des 3 actifs nécessite une intervention majeure ou une reconstruction. Toutefois, la gestion intégrée des infrastructures est encore récente et embryonnaire avec des bases et des règles qui restent à consolider. De nombreuses améliorations doivent encore être apportées aux modèles existants de gestion intégrée, afin de les rendre performants et efficaces (Badham et al., 2019; Desbiens, 2016; Di Sivo & Ladiana, 2010; Oreto et al., 2022; Shahata & Zayed, 2016).

CHAPITRE 3

OBJECTIFS, HYPOTHÈSES ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE

Ce chapitre expose les objectifs qui sont visés dans cette étude ainsi que les hypothèses significatives qui ont été utilisées et qui ont guidé les différentes étapes de cette recherche. L'originalité de ce travail y est également mise en lumière afin de faire ressortir la contribution scientifique de cette recherche.

3.1 Optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable

3.1.1 Objectifs de recherche

L'objectif fondamental visé par cette étape du travail est l'optimisation des critères permettant d'évaluer les différentes conduites d'un réseau d'eau potable afin d'en établir l'admissibilité à des interventions de renouvellement. L'accent sera mis sur l'efficacité, la rentabilité à long-terme et l'augmentation significative de la performance des décisions d'interventions émanant du modèle proposé. Pour y arriver, les objectifs spécifiques poursuivis par ces travaux sont :

a) intégrer le retour d'expériences de plusieurs municipalités canadiennes au processus d'élaboration des plans d'intervention;
b) proposer un meilleur encadrement des indicateurs de performance dans la prise de décision;
c) améliorer la connaissance et l'utilisation de l'impact spatio-temporel des bris antérieurs sur la dégradation future et la vulnérabilité des conduites adjacentes;
d) proposer une nouvelle méthodologie plus performante d'évaluation multicritère des conduites admissibles aux interventions de renouvellement.

3.1.2 Hypothèses et originalité

Le retour d'expériences des municipalités, leur rétroaction concernant l'utilisation des approches et modèles existants d'aide à la gestion du renouvellement des conduites, ainsi que l'analyse des données de leurs réseaux, ont permis d'établir les hypothèses fondamentales de cette recherche.

Hypothèse 1 : Les indicateurs d'état souvent utilisés dans la pratique courante ne sont pas tous pertinents, ni toujours représentatifs de l'état réel des conduites. Ils doivent donc être analysés, ré-évalués et leur utilisation doit être améliorée et encadrée.

Hypothèse 2 : Les indicateurs d'état ne devraient pas tous avoir le même poids dans les processus de décision; certains indicateurs semblent plus pertinents que d'autres, et devraient donc être davantage priorisés ou avoir plus de poids, lorsqu'ils sont disponibles.

Hypothèse 3 : Il est possible que de nouveaux paramètres de dégradation, actuellement peu explorés, puissent avoir un impact significatif dans les prédictions de dégradations futures et les processus d'aide à la décision; Ainsi, l'impact spatio-temporel des bris antérieurs et particulièrement du dernier bris, semble être un paramètre crucial et significatif dans la prévision des dégradations futures et de la vulnérabilité des conduites.

Hypothèse 4 : La méthode d'analyse multicritère de surclassement, consistant à attribuer à une conduite le pire état obtenu au terme d'une évaluation par plusieurs indicateurs distincts, n'est pas optimale et doit être améliorée.

Les travaux visés dans cette recherche sont originaux car certaines des hypothèses retenues dans notre démarche n'ont jamais été analysées de façon exhaustive, testées, ni intégrées dans les processus de décisions concernant la gestion du renouvellement des conduites d'eau. Il en est de même pour notre démarche méthodologique et surtout la combinaison des hypothèses qui sont utilisées dans l'ossature de ce travail.

3.2 Optimisation de la gestion des réseaux d'égouts

3.2.1 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce volet de la recherche est de proposer une solution plus performante à la détermination de l'état des conduites d'égouts, de leur besoin de renouvellement ainsi que de leur priorité relative d'intervention. La solution envisagée vise à être une méthodologie ou un processus d'élaboration plus efficace, plus performant, plus rentable, plus durable et plus inclusif que les méthodes traditionnelles, en termes d'indicateurs d'état et de facteurs (internes ou externes) aggravants la détérioration des conduites. Les objectifs spécifiques qui en découlent sont :

a) analyser l'impact de certains facteurs internes ou externes, et de leur combinaison, sur l'aggravation ou l'accélération de la dégradation des conduites d'égouts;
b) mettre en place une procédure permettant d'intégrer et de refléter l'impact des facteurs aggravants dans l'évaluation de l'état et de la vulnérabilité des conduites d'égouts;
c) proposer une méthodologie plus performante d'élaboration des besoins et des priorités d'interventions des conduites d'égouts, en tenant compte des résultats obtenus pour les objectifs spécifiques précédents.

3.2.2 Hypothèses et originalité

Ce volet de la recherche s'appuie sur les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Les indicateurs d'état ou de performance des conduites d'égouts devraient être catégorisés en deux groupes soit les indicateurs structuraux et les indicateurs fonctionnels, hydrauliques ou opérationnels, et les conduites d'égouts devraient obligatoirement être évaluées selon ces deux catégories distinctes d'indicateurs.

Hypothèse 2 : Les deux catégories d'indicateurs évoquées au paragraphe précédent devraient toujours être prises en compte conjointement dans les décisions d'intervention; que ce soit pour déterminer la sévérité des défauts, la priorité des interventions ou la détermination du type d'intervention appropriée.

Hypothèse 3 : Outre l'utilisation des deux catégories d'indicateurs de performance des conduites d'égouts, les facteurs (internes et externes) susceptibles d'aggraver la détérioration des conduites d'égouts et d'accroître leur vulnérabilité, devraient être pris en compte, ainsi que leur concomitance, dans les processus d'évaluation des conduites et de prise des décisions d'interventions. Ce qui devrait permettre de ne pas sous-estimer le vieillissement prématuré des conduites soumises à des environnements et des conditions plus agressives.

Ces hypothèses sont originales car elles n'ont jamais été combinées et intégrées dans un processus unique et conjoint menant à la prise de décisions concernant la planification des interventions sur les conduites d'égouts.

3.3 Optimisation de la gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie

3.3.1 Objectifs de recherche

L'objectif principal poursuivi dans cette section de recherche est de proposer un meilleur encadrement des critères et règles de coordination des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts, et de voirie. Le cadre proposé pour la gestion intégrée de ces trois (3) actifs, doit spécifiquement aider les gestionnaires de ces actifs dans la prise de deux types de décisions à savoir : Est-il opportun de coordonner les interventions sur un tronçon, aux vues de l'état de chacun des différents actifs ? Quels types d'interventions seraient les plus appropriées et les plus optimales sur chacun des actifs en termes d'efficacité et de rentabilité à long terme ? Les objectifs spécifiques découlant de cet objectif principal sont :

a) évaluer l'efficacité et la rentabilité de divers type d'interventions susceptibles d'être réalisés sur un tronçon composé de conduites d'eau potable, de conduite d'égouts et de chaussées se trouvant chacune dans différents états ou statuts de condition;

b) proposer des règles de décisions permettant un meilleur encadrement de la gestion intégrée et coordonnée des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie.

3.3.2 Hypothèses et originalité

L'hypothèse considérée dans cette partie de la recherche est basée sur le fait qu'il soit possible à partir d'une analyse coût-bénéfice appliquée à plusieurs tronçons, d'établir les conditions les plus favorables associées à l'utilisation des interventions les plus bénéfiques (en termes d'efficacité, de rentabilité et de durabilité) réalisables sur chacun des actifs d'une même tranchée dans une démarche d'intégration, de sorte à s'en inspirer pour proposer des règles générales mais prouvées, encadrant une coordination performante des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie. Une telle analyse exhaustive et quantitative débouchant sur des règles simples mais rigoureuses permettant l'optimisation de la gestion intégrée de ces actifs n'a jamais été réalisée.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée ainsi que les grandes étapes de travail qui ont été réalisées afin d'atteindre les objectifs ciblés dans cette recherche.

4.1 Optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable

La méthodologie utilisée dans cette recherche s'appuie sur une base statistique et analytique ainsi que sur l'apprentissage supervisé du comportement temporel des conduites d'eau selon différents paramètres accessibles tels que le nombre de bris historiques, le taux de bris annuel par kilomètre, l'impact spatial et temporel du dernier bris sur la dégradation future et la vétusté. Les liens de convergence et de dépendance entre les principaux paramètres d'état ont également été analysés, interprétés et testés afin d'être intégrés de façon efficace dans la nouvelle approche méthodologique proposée pour la sélection des conduites admissibles aux travaux de renouvellement. Les données utilisées proviennent de municipalités québécoises dont les conduites ont été installées, en grande partie, entre les années 1890 et 2000 et totalisent plus de 6 000 km de canalisations. Finalement, une méthode de combinaison multicritère plus performante des indicateurs d'état a été élaborée afin d'établir l'état le plus représentatif possible de chacune des conduites du réseau. Cette méthode prend en compte les meilleurs atouts des méthodes de surclassement et de pondération, mais s'appuie également sur des indicateurs plus précis et mieux encadrés. Les étapes de travail qui seront réalisés dans ce volet de la recherche sont :

- analyse des données d'état et des résultats issus de l'application d'une approche classique telle que celle du MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) aux conduites d'eau potable utilisées dans cette recherche, et décrites au paragraphe précédent. Dans cette rubrique, les statistiques comparatives entre divers indicateurs d'état des conduites seront analysées afin d'évaluer, d'une part, la cohérence des résultats issus de la combinaison de différents indicateurs et, d'autre part, le degré de pertinence et de représentativité des indicateurs les plus populaires;

- validation de manière objective et quantitative de l'impact réel du nombre de bris historiques sur l'état de dégradation actuelle et future des conduites d'eau;
- exploration et analyse de l'impact spatio-temporel du dernier bris, surtout, et des bris précédents sur les bris subséquents de la conduite d'eau potable;
- utilisation de la corrélation entre durée de vie et bris observés, pour établir une méthode plus dynamique et représentative d'élaboration des durées de vie des conduites d'eau potable;
- élaboration d'une nouvelle approche plus performante pour l'établissement de l'état des conduites et l'optimisation des priorités d'intervention sur le réseau d'eau potable;
- validation de l'approche proposée à travers son application à un échantillon des conduites d'eau potable précédemment décrites, et une étude comparative des résultats obtenus avec ceux issus de l'utilisation d'autres méthodes usuelles.

4.2 Optimisation de la gestion des réseaux d'égouts

Pour atteindre les objectifs fixés dans le volet d'optimisation de la gestion des réseaux d'égouts, et en l'occurrence l'établissement des priorités d'interventions sur les conduites d'égouts, la méthode du MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) sera combinée avec celle du WRc (WRc, 2001) pour établir une nouvelle approche méthodologique plus performante. En effet, la méthode du MAMH considère 4 indicateurs distincts (l'état structural (EU-1 ou EPL-1), les problèmes hydrauliques basés sur l'historique des nettoyages et des refoulements (EU-2 ou EPL-2), l'état selon les déficiences fonctionnelles relevés à la suite des inspections télévisées (EU-3 ou EPL-3), puis les problèmes hydrauliques relevées à la suite des études hydrauliques (EU-4 ou EPL-4)) dont la pire cote devient la cote globale de la conduite évaluée. Ni les facteurs aggravants discutés aux paragraphes précédents, ni l'effet de la concomitance de plusieurs indicateurs critiques sur l'état et la vulnérabilité des conduites ne sont pris en compte. En revanche, La méthode du WRc propose une liste de facteurs impactant la détérioration des conduites d'égouts (facteurs aggravants), et une façon de les répercuter sur la cote de condition interne de la conduite. Toutefois la méthodologie du WRc est trop qualitative, en plus de n'utiliser qu'un seul indicateur d'état spécifique à la conduite,

soit la cote de condition interne assimilable à l'état structural dans la méthode du MAMH. La combinaison des deux méthodes permettra non seulement de ne pas être dépendant d'un seul indicateur état, mais également de pouvoir intégrer les facteurs aggravants et pouvoir ainsi répercuter quantitativement leurs impacts sur l'état des conduites, sans oublier la prise en compte de la concomitance de plusieurs indicateurs ou facteurs critiques pour une même conduite. Pour ce faire, on se propose d'utiliser un indicateur d'état structural (EPL-1/EU-1) et un indicateur d'état hydraulique et fonctionnel global (basé à la fois sur EPL-2/EU-2, EPL-3/EU-3 et EPL-4/EU-4) et de montrer l'impact combiné de la variation des différents indicateurs d'état et de la présence de facteurs aggravants sur la cote finale de la conduite, en procédant par les étapes suivantes :

- établir les nouvelles matrices de cotes d'état global EPL-combinée (ou EU-combinée dans le cas de conduites unitaires), pour chacune des 3 catégories de sol ((1) sable, limon et argile de faible plasticité; (2) gravier fin à moyen; (3) argile de moyenne à haute plasticité), en intégrant pour chaque type de sol et situation de cote structurale (EPL-1/EU-1), l'effet du niveau de la nappe phréatique (niveau haut dans le cas d'infiltration et niveau bas sans infiltration), ainsi que la concomitance des paramètres précédents avec les défauts hydrauliques et fonctionnels (EPL-Hyd ou EU-Hyd);
- montrer l'effet d'EPL-combinée (ou EU-combinée), sur la priorité de réhabilitation de l'égout pluvial ou de l'égout unitaire, à partir des classes d'intervention préconisées par le MAMH. Il est à rappeler que bien que l'indicateur EPL-Hyd (ou EU-Hyd dans le cas de conduites unitaires) ne soit pas considéré comme un indicateur d'état dans les règles d'évaluation d'état des conduites d'égouts du MAMH, notre étude considère que cet indicateur décrit bien les problèmes de surcharge hydrauliques, et sa valeur est définie comme étant la valeur maximale des cotes EPL2, EPL3 et EPL4 du MAMH (ou celle des cotes EU-2, EU-3, et EU-4 dans le cas de conduites unitaires);
- valider la faisabilité, l'application et l'utilité de la nouvelle méthodologie proposée à travers une étude de cas appliquée à un réseau d'égouts réel.

4.3 Optimisation de la gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie

Afin de proposer un cadre simple, pratique et efficace aux règles de coordination des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts, et de voirie, et de contribuer de façon intéressante à l'effort d'optimisation de la gestion intégrée des réseaux, une méthode d'analyse avantage-coût-bénéfice sera utilisée pour établir des règles générales applicables par les gestionnaires d'infrastructures dans leur stratégie de gestion. Les étapes de travail successives de l'application de cette méthode sont identifiées à la figure 4.1.

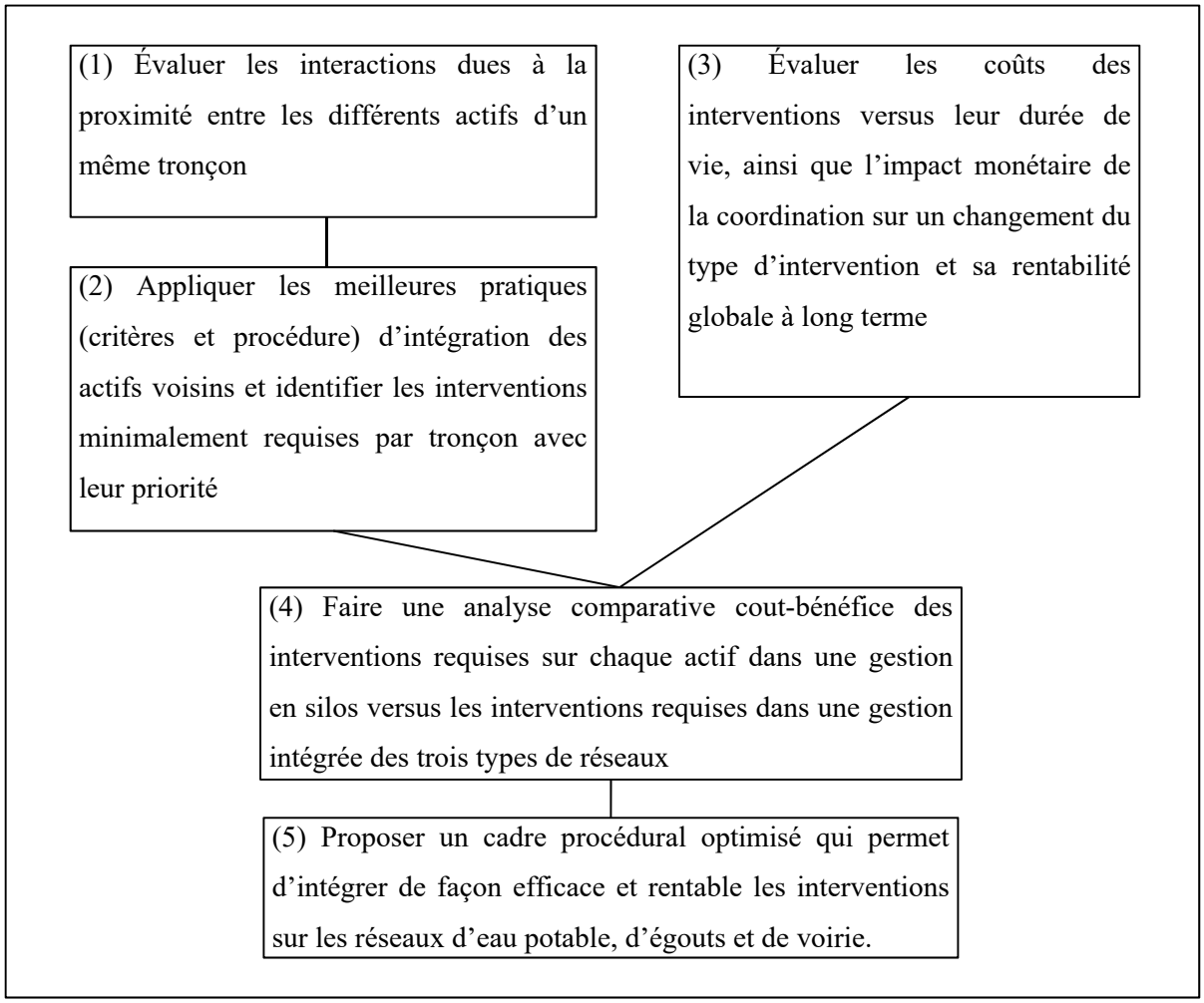


Figure 4.1 Étapes de travail dans le cadre de l'optimisation de la gestion coordonnée des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DU RENOUVELLEMENT DES CONDUITES D'EAU POTABLE

Ce chapitre présente les résultats des analyses et études réalisées dans le cadre de l'amélioration de la gestion des réseaux d'eau potable et surtout de l'optimisation du renouvellement des conduites d'eau potable. Un bref rappel de la problématique et des objectifs ciblés y est réalisé pour remettre en contexte ce travail. La méthodologie et les étapes de recherche sont celles décrites à la section 4.1.

5.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à l'optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable

La gestion tactique du renouvellement des réseaux d'eau potable fait face à de nombreux défis qui ont été énumérés et discutés plus en détail dans la première partie du chapitre 1 de ce rapport. Entre autres, on y retrouve les insuffisances relevées dans l'utilisation de certains indicateurs pourtant populaires dans la sélection des conduites admissibles à des travaux majeurs de renouvellement, l'absence de critères clairs et précis permettant une priorisation efficace et plus performante des indicateurs d'état selon leur degré de pertinence ainsi que le manque d'indications capables d'aider les gestionnaires de réseaux d'eau à choisir les interventions les plus appropriées pour les conduites problématiques. De plus, les nombreux efforts consentis par les municipalités dans le renouvellement de leurs réseaux d'eau durant les dernières années n'ont pas toujours eu l'impact et le résultat attendu sur l'amélioration des niveaux de service des réseaux d'eau potable.

C'est dans ce contexte que cette recherche visant l'optimisation de la gestion du renouvellement des réseaux et surtout des conduites d'eau potable s'est déroulée avec les objectifs spécifiques suivants :

a) intégrer le retour d'expériences de plusieurs municipalités canadiennes au processus d'élaboration des plans d'intervention;
b) proposer un meilleur encadrement des indicateurs moins performants;

c) améliorer la connaissance et l'utilisation de l'impact spatio-temporel des bris antérieurs sur la dégradation future et la vulnérabilité des conduites adjacentes;
d) proposer une méthodologie optimale d'évaluation multicritères des conduites admissibles aux interventions de renouvellement.

5.2 Présentation des résultats

5.2.1 Analyse des statistiques comparatives et des liens de convergence entre divers indicateurs d'état des conduites d'eau potable

Afin d'apprécier de façon objective l'utilisation qui est faite des indicateurs disponibles pour évaluer l'état des conduites d'eau potable, vingt (20) municipalités canadiennes, dont dix-sept (17) issues du Québec, ont été invitées par courriel durant le printemps 2019, à répondre à un court sondage. Ce dernier, composé de cinq questions disponibles à l'annexe IV, visait à savoir si la municipalité dispose d'un plan d'intervention pour ses conduites d'eau potable, la fréquence de mise-à-jour de ce plan d'intervention, les indicateurs d'état utilisés par la municipalité, la possibilité d'obtenir le dernier plan d'intervention de la municipalité et finalement sa disponibilité à répondre à des questions supplémentaires dans le cadre de notre étude. Les municipalités qui n'ont pas répondu par courriel ont par la suite été contactées par téléphone afin de répondre directement au sondage. Les informations obtenues auprès des municipalités ayant collaboré à l'étude ont permis de mesurer le degré de satisfaction et de confiance des gestionnaires de réseaux d'eau à l'égard des indicateurs d'état les plus utilisés dans l'élaboration des plans d'interventions des réseaux d'eau potable au Québec. Ces indicateurs sont, sans surprise, le nombre de bris historiques (EP-1), le taux de bris annuels (EP-2) et le pourcentage de vie écoulée (EP-3), et correspondent aussi à ceux préconisés par le Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation du Québec (MAMROT & CERIU, 2013). La satisfaction et la confiance des gestionnaires de réseaux d'eau varient beaucoup d'un indicateur à l'autre. Si certains indicateurs semblent largement acceptés, notamment EP-2 et dans une moindre mesure EP-1, l'utilisation de EP-3 est davantage controversée. Il est également à noter que plus de 90 % des municipalités se limitent généralement à l'utilisation

de ces trois indicateurs, même si plus d'une dizaine d'indicateurs peuvent potentiellement être utilisés.

Afin de valider les hypothèses de cette recherche, nous avons décidé de vérifier si les données d'un échantillon des conduites à l'étude présentent des anomalies et/ou divergences quant à l'état de chaque conduite, établi sur la base de ces trois indicateurs. Pour réaliser cette validation, nous avons choisi d'utiliser le réseau d'eau potable de la Ville de Montréal dont le linéaire totalise près de 4 450 kilomètres de conduites. De ce nombre, on distingue environ 3 650 kilomètres de conduites secondaires et 800 kilomètres de conduites principales pour un total de 21 550 tronçons d'environ 167 mètres de longueur moyenne. L'âge moyen du réseau est de 60 ans. Le réseau est composé à 60 % de conduite en fonte grise, à 26 % de conduite en fonte ductile, à 7 % de conduite en béton armé, à 4 % de conduite en chlorure de polyvinyle, à 2 % de conduite en béton précontraint, et à 1 % d'autres matériaux.

Une distribution de l'état de ce réseau en fonction de EP-1 et de EP-2, a été réalisée au tableau 5.1. Elle révèle a priori une bonne convergence et une relation directe entre les deux indicateurs EP-1 et EP-2 qui sont tous deux reliés aux bris. Ainsi, les pourcentages les plus élevés pour chaque classe d'état se retrouvent sur la diagonale, confirmant que la majorité des conduites en bon ou excellent état selon EP-1 le sont aussi selon EP-2. Il est utile de rappeler qu'une conduite en excellent état selon un indicateur donné, est une conduite qui présente une condition optimale (cote = 1) selon cet indicateur. Une conduite en bon état est une conduite présentant une condition acceptable (cote = 2). Une conduite dans un état moyen est une conduite dont la condition est tolérable (cote = 3). Finalement une conduite en mauvais ou très mauvais état est une dont la condition est respectivement soit préoccupante (cote = 4), soit nécessitant une attention immédiate (cote = 5).

Tableau 5.1 État du réseau à l'étude selon le nombre de bris historiques EP-1 et le taux de bris EP-2

Répartition des conduites selon :		**EP2 (en %)**					
		Excellent	**Bon**	**Moyen**	**Mauvais**	**Très mauvais**	**Total**
EP1	**Excellent**	63,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	63,6%
	Bon	20,3%	1,2%	0,4%	0,1%	0,0%	22,0%
	Moyen	4,9%	1,0%	1,0%	0,9%	0,3%	8,2%
	Mauvais	1,8%	0,4%	0,5%	0,7%	0,6%	4,0%
	Très mauvais	0,6%	0,2%	0,2%	0,3%	0,9%	2,2%
	Total	91,2%	2,7%	2,1%	2,0%	1,9%	100,0%

Une seconde analyse portant cette fois sur les 375 km de conduites en mauvais et très mauvais état selon EP-1, a ensuite été menée. Cette analyse fait constater que près de la moitié de ces conduites critiques selon EP-1 sont plutôt en excellent ou bon état selon EP-2 (tableau 5.2). D'ailleurs, la grande majorité de ces conduites n'a pas brisé depuis plus de 10 voire 20 ans. Ceci amène une remise en question de la pertinence de l'indicateur EP-1 lorsqu'il est utilisé seul car il peut déclencher des interventions non justifiées.

Tableau 5.2 Répartition en fonction de EP-2 des conduites initialement critiques selon EP-1

	Répartition selon les différents statuts de EP-2					
	Excellent	**Bon**	**Moyen**	**Mauvais**	**Très mauvais**	**Total**
Répartition des 375 km de mauvaises et très mauvaises conduites selon EP1	39,2%	8,6%	11,5%	15,5%	25,2%	100,0%

De plus, une autre analyse a été réalisée sur les 320 kilomètres de conduites ayant atteint ou dépassé 90 % de leur durée de vie écoulée ; c'est-à-dire les conduites ayant un statut mauvais selon l'indicateur EP-3. Le but de cette nouvelle analyse est de valider la présence et la fréquence des bris (défaillances réelles observables) sur ces conduites vétustes et supposées en fin de vie. Les résultats du tableau 5.3 font constater que la grande majorité des mauvaises conduites selon EP-3, en raison de l'atteinte ou du dépassement de 90 % de leur durée de vie utile, n'ont jamais brisé ou sont encore en très bon état, selon les bris observés. Les

indicateurs EP-1 et EP-2 sont bon ou excellent respectivement dans une proportion de 97,0 % et 99,1 %, malgré une population constituée uniquement de conduites ayant un statut mauvais selon EP-3. Ceci amène encore à une remise en question de la pertinence de l'indicateur EP-3 lorsqu'il est utilisé seul car il peut déclencher des interventions non justifiées.

Tableau 5.3 Répartition en fonction de EP-1 et EP-2 des mauvaises conduites selon EP-3

	État	**Selon EP-1**	**Selon EP-2**
Répartition des 320 km de conduites « mauvaises » selon EP3	Excellent	90,8%	98,9%
	Bon	6,2%	0,2%
	Moyen	2,5%	0,9%
	Mauvais	0,6%	0,1%
	Total	100,0%	100,0%

5.2.2 Analyse de l'impact du nombre de bris historiques sur l'état de dégradation actuelle et future des conduites d'eau

Afin de mesurer l'impact du nombre de bris historiques d'une conduite sur sa dégradation future et surtout sur l'apparition de nouveaux bris, une étude des bris survenus de 2009 à 2018 dans le réseau d'eau potable de la Ville de Montréal a été menée. Les caractéristiques du réseau d'eau potable de la Ville de Montréal sont les mêmes que celles qui ont précédemment été énumérées à la section 5.2.1 de cette thèse. L'objectif de la présente analyse est de vérifier si le risque d'apparition des nouveaux bris augmente ou non avec le nombre de bris historiques de la conduite. Pour ce faire, nous avons tout d'abord réparti chacun des bris survenus selon sa chronologie dans la chaine des bris antérieurs d'une conduite. Ainsi, chaque bris survenu depuis 2009 a pu être classé comme étant survenu sur une conduite ayant précédemment brisé 0, 1, 2, 3 ou n fois. La tendance moyenne sur une dizaine d'année a permis d'établir le portrait de la répartition des nouveaux bris annuels en fonction du nombre de bris historiques des conduites (confer tableau 5.4).

Tableau 5.4 Répartition des bris annuels 2009-2018 de la ville de Montréal selon le nombre de bris initial de la conduite

	Nombre de bris répertoriés en											
Nombre de bris initial de la conduite	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**Total**	**Pourcentage**
0	146	139	183	171	155	141	156	90	123	132	1436	16%
1	266	251	294	225	237	308	294	258	275	336	2744	31%
2	177	122	200	156	158	199	191	168	175	172	1718	19%
3	137	91	120	114	92	129	110	109	105	122	1129	13%
4	57	64	65	70	52	75	59	76	55	64	637	7%
5	61	38	41	43	66	56	60	29	30	34	458	5%
6	26	24	30	21	27	35	33	22	20	22	260	3%
7	9	23	10	30	23	21	14	16	5	19	170	2%
8	12	8	19	11	16	19	20	8	14	6	133	1%
9	6	17	9	13	10	7	3	3	5	1	74	1%
10	1	9	3	11	5	7	5	11		9	61	1%
11	4	1	5		1	4	9	1	1		26	0,3%
12		1	1	2	2	11	6	1			24	0,3%
13						1	3	1			5	0,1%
14	1	2	1		3	2		1			10	0,1%
15 +	2	1	7		1	2	5	2	1		21	0,2%
Total	905	791	988	867	848	1017	968	796	809	917	8906	100%

À titre d'exemple, la dernière ligne de la deuxième colonne du tableau 5.4 indique qu'il y'a eu 905 bris de conduites d'eau en 2009 sur le territoire de la Ville de Montréal. Les lignes successives de la deuxième colonne indiquent que durant l'année 2009, 146 bris se sont produits sur des conduites n'ayant jamais subi de bris auparavant, 266 bris se sont produits sur des conduites ayant subi un seul bris, 177 bris se sont produits sur des conduites ayant déjà subi deux bris et 137 bris se sont produits sur des conduites ayant déjà subi trois bris, ainsi de suite. La troisième ligne du tableau 5, nous renseigne par exemple sur le nombre de bris qui sont survenus entre 2009 et 2018, sur des conduites n'ayant jamais subi de bris auparavant. Le cumul des données fait état de 1436 bris en tout qui sont survenus en dix ans sur des conduites n'ayant jamais brisé auparavant ; ce qui représente 16 % des 8906 bris

recensés de 2009 à 2018. La dernière colonne du tableau 5 permet ensuite de dégager une tendance globale sur les 10 ans. Ainsi 16 % des bris annuels surviennent sur des conduites n'ayant jamais brisé auparavant, 31 % des bris annuels se produisent sur des conduites avec 1 bris précédent, 19 % des bris annuels sur des conduites ayant 2 bris précédents, ainsi de suite. Par la suite, le coefficient de risque relatif qui est le rapport de la proportion de bris d'une cohorte relativement à l'ensemble des bris survenus et de la proportion linéaire de la cohorte relativement à l'ensemble du réseau des conduites, a été calculé (tableau 5.5). Ce coefficient permet de mesurer et d'apprécier la variation du risque de défaillance future des différentes cohortes de conduites. Les conduites sont regroupées en cohortes selon leur nombre de bris antérieurs, tel que listé à la colonne 1 du tableau 5.5.

Tableau 5.5 Calcul du coefficient de risque relatif pour chaque cohorte de conduites

Nombre de bris initial de la conduite	**Proportion du réseau**	**Pourcentage de bris reçu**	**Coefficient de risque relatif**	**Niveau de risque relatif**
0	58,28%	16%	0,3	faible
1	17,79%	31%	1,7	modéré à élevé
2	9,80%	19%	2,0	
3	5,13%	13%	2,3	
4	3,33%	7%	2,3	
5	2,16%	5%	2,4	
6	1,21%	3%	2,4	
7	0,77%	2%	2,5	
8	0,59%	1%	2,5	
9	0,29%	1%	2,9	très élevé
10	0,23%	1%	2,9	
11	0,09%	0,3%	3,2	
12	0,08%	0,3%	3,2	
13	0,02%	0,1%	3,3	
14	0,03%	0,1%	3,3	
15 +	0,07%	0,2%	3,3	
----------	100%	100%	1	uniforme

À titre d'exemple, la deuxième ligne du tableau 5.5 indique que les conduites n'ayant jamais subi de bris auparavant représentent 58,28 % de l'ensemble du réseau mais supportent 16 % des bris annuels qui se produisent sur tout le réseau. Cette cohorte de conduites possède un coefficient de risque relatif de 0,3 (très en dessous du risque uniforme de 1), ce qui

correspond à un faible niveau de risque relatif. Les lignes successives, à l'exception de la dernière, nous renseignent sur les mêmes informations relativement aux autres cohortes. Rappelons que le risque relatif de 1 est le risque de référence qui caractérise une population où tous les individus, représentés ici par les cohortes, courent le même risque (risque uniforme). Un coefficient de risque relatif inférieur à 1 caractérise les individus les moins à risque alors qu'un coefficient de risque relatif supérieur à 1 caractérise les individus les plus à risque. Ce coefficient largement utilisé en épidémiologie permet de mesurer efficacement le risque relatif et la vulnérabilité d'une sous-population par rapport à une autre, face à une menace ou une maladie. Les résultats de cette étude confirment qu'indépendamment de la longueur et de l'âge des conduites, le coefficient de risque relatif est croissant avec l'augmentation du nombre de bris antérieurs des conduites (figure 5.1). De plus, si une conduite n'ayant jamais brisé possède un risque relatif très faible (c_0 = 0,3) de briser à moyen terme, une conduite ayant déjà brisé une fois possède un risque relatif six fois plus élevé (c_1 = 1,7). De même, une conduite ayant dix bris antérieurs possède un risque relatif dix fois plus grand (c_{10} = 2,9) qu'une autre n'ayant jamais brisé. Ceci permet de conclure que le nombre de bris historiques est bien un indicateur d'état pertinent et qu'une conduite ayant un nombre élevé de bris historiques est plus à risque de briser à moyen terme, qu'une autre ayant un nombre de bris historiques plus faible.

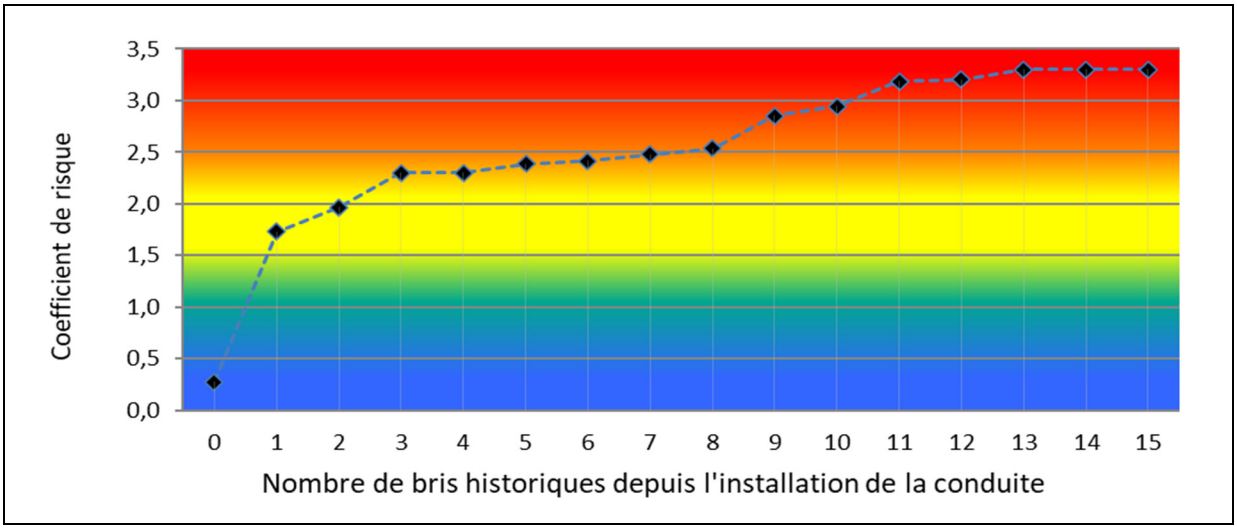


Figure 5.1 Risque de bris futurs en fonction du nombre de bris historiques de la conduite

5.2.3 Analyse de l'impact spatio-temporel du dernier bris et des bris précédents sur les bris subséquents

L'objectif de la présente analyse est de déterminer les probabilités d'occurrence d'un nouveau bris après une période donnée et à une distance donnée d'un bris antérieur. Cette analyse vise à améliorer la connaissance sur l'apparition de nouveaux bris, et leur corrélation avec les bris antérieurs sur la même conduite. Pour réaliser cette étude, un échantillon aléatoire de conduites ayant eu au moins deux bris historiques a été choisi parmi les conduites d'eau de la Ville de Montréal. Le secteur étudié a été volontairement restreint à une seule ville afin de garantir la représentativité et la précision des résultats. Deux paramètres relatifs aux bris ont été choisis et recueillis pour chacune des conduites : la distance d'apparition des bris subséquents (2ème bris, 3ème bris, etc.) et le temps d'apparition de chacun de ces bris depuis le dernier bris. Les résultats obtenus pour la fonte ductile (FD) sont séparés de ceux obtenus pour la fonte grise (FG). Pour la fonte grise, l'analyse est basée sur une cinquantaine de conduites installées entre 1920 et 1955, de longueur moyenne d'environ 200 m et totalisant 183 bris. Les conduites analysées ont été choisies dans des arrondissements où l'archivage des bris a démarré en 1956, soit l'année du bris le plus ancien répertorié, et dont la base de données des bris est assez fiable depuis 1974. Les résultats sont compilés dans le tableau 5.6 où les colonnes représentent les distances d'apparition des bris subséquents et les lignes représentent les intervalles de temps séparant ces bris. À titre d'exemple, la deuxième cellule de la seconde ligne du tableau 5.6 indique que 27 % des bris se produisent dans les 5 années suivant le bris précédent, et ce à moins de 10 m d'un ancien bris. La troisième cellule de la seconde ligne indique que 15 % des bris se produisent dans les cinq (5) années suivant le bris précédent, et ce dans un rayon de 10 à 20 m. Les cellules successives de la même ligne renseignent sur les pourcentages de bris survenant dans un délai de 5 ans après le précédent bris, mais pour diverses distances. La dernière cellule de cette ligne rapporte que 68 % de tous les bris analysés surviennent dans un délai global de 5 années après un bris précédent, sans égard à la distance. La dernière ligne indique successivement que 39 % des bris se produisent dans un rayon de 10 m autour d'un ancien bris, 20 % dans un rayon de 10 à 20 m, 20 % dans un rayon de 20 à 30 m, 7 % dans un rayon de 30 à 40 m, etc. Finalement, il est constaté que 83 % des bris subséquents sur une conduite

en fonte grise se produisent dans les 10 années suivant un bris précédent et que près de 60 % des bris subséquents ont lieu dans un rayon de 20 m à proximité d'un bris antérieur.

Tableau 5.6 Répartition spatio-temporelle des bris subséquents sur les conduites de fonte grise

Prob FG (x,t)	0-10m	10-20m	20-30m	30-40m	40-50m	50-60m	60-70m	70-80m	80-90m	90-100m	100m et +	Total
0-5ans	27%	15%	10%	5%	2%	2%	0%	0%	2%	2%	2%	68%
5-10ans	7%	2%	2%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%
10-15ans	5%	2%	5%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%
15-20ans	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
20-25ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
25-30ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
30-35ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
35-40ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40-45ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Total	39%	20%	20%	7%	5%	2%	0%	0%	2%	2%	2%	100%

Pour la fonte ductile, le tableau 5.7 présente les résultats d'analyse basée sur une quarantaine de conduites installées entre 1960 et 1990, de longueur moyenne d'environ 180 m et totalisant 127 bris. Les conduites analysées ont été choisies dans des arrondissements où l'archivage des bris a démarré en 1956 et est assez fiable depuis 1974.

Tableau 5.7 Répartition spatio-temporelle des bris subséquents sur les conduites de fonte ductile

Prob FD (x,t)	0-10m	10-20m	20-30m	30-40m	40-50m	50-60m	60-70m	70-80m	80-90m	90-100m	100m et +	Total
0-5ans	10%	16%	6%	4%	6%	4%	5%	1%	0%	1%	0%	52%
5-10ans	11%	5%	7%	1%	1%	2%	0%	0%	1%	0%	0%	29%
10-15ans	2%	2%	2%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	1%	11%
15-20ans	0%	2%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
20-25ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
25-30ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
30-35ans	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	2%
35-40ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40-45ans	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Total	23%	27%	16%	6%	9%	9%	5%	1%	1%	2%	1%	100%

La tendance est sensiblement similaire pour la fonte ductile où 81% des bris subséquents, se produisent dans les 10 années suivant un bris précédent, tandis que près de 50 % se produisent à moins de 20 m d'un bris antérieur. Il en ressort que les conduites sont beaucoup plus vulnérables et fragiles à proximité d'un précédent bris, que ce soit spatialement ou temporellement, et plus particulièrement dans les 10 années suivant un précédent bris. Finalement, selon les statistiques combinées des conduites en fonte grise et ductile, plus de 80 % des bris subséquents ont lieu dans les 10 années suivant un bris précédent. Cette information permet ainsi de considérer, lorsque deux conduites ont le même nombre de bris historiques, que la plus critique est celle dont le dernier bris est le plus récent. En outre, au regard des résultats de cette étude, une plus grande priorité d'intervention devrait être accordée aux conduites ayant au moins un bris survenu durant les dix dernières années, Par ailleurs, 1/3 des bris subséquents se produisent à moins de 10 m d'un bris précédent et plus de 50 % surviennent à moins de 20 m. Il est donc clair que les conduites sont plus fragiles au voisinage d'une ancienne réparation. Ceci s'explique fondamentalement par le fait que le phénomène de corrosion est directement lié à l'environnement dans lequel évolue une conduite. Tout d'abord le remplacement d'un court tronçon de conduite ou l'installation d'un manchon de réparation crée une cellule de corrosion galvanique à l'interface de matériaux dissemblables. Cette corrosion sera d'autant accélérée que la résistivité électrique du sol dans le voisinage est faible. La corrosion peut aussi être due à la présence de particules de carbone provenant de cendres, issues par exemple de la formation des roches volcaniques, et agissant comme des cathodes dans tout le voisinage de la conduite qui devient anodique. La présence de courants vagabonds sortant de la conduite peut expliquer aussi la vulnérabilité d'un tronçon de conduite sur une certaine longueur. Enfin, l'aération différentielle peut créer une pile géologique ou de concentration dans une conduite qui se trouve à cheval entre un sol sablonneux ou graveleux bien aéré et un sol argileux humide, mal aéré. D'une manière plus générale, une conduite se trouvant dans un sol peu résistif au passage d'un courant électrique sera vulnérable à la corrosion dans tout son voisinage.

5.2.4 Établissement de la relation entre la durée de vie écoulée et les bris de conduites

La notion de durée de vie des conduites selon leur matériau est très controversée à plusieurs égards. Tout d'abord, la durée de vie réelle d'une conduite peut s'écarter sensiblement de la vie théorique pour différentes raisons. Comme nous l'avons déjà établi au tableau 4, il y'a une grande divergence entre l'état d'une conduite issu du pourcentage de vie écoulée (EP-3) et celui issu de l'historique des bris (EP-1 et EP-2). En effet, au moins 97 % des conduites qui ont atteint ou dépassé 90 % de leur durée de vie présentent un bon ou excellent état, que ce soit en termes de nombre de bris historiques ou de taux de bris. Un des objectifs du présent travail est d'estimer la durée de vie réelle d'une conduite en fonction de sa performance en termes de risque de bris dans un territoire donné. Ainsi, la durée de vie des conduites est établie en mesurant l'âge atteint par au moins 80 % des conduites de chaque groupe de matériau, avant que ces conduites ne présentent des défaillances en rapport avec les bris. Une conduite est considérée en fin de vie utile lorsqu'elle présente un mauvais ou très mauvais état pour au moins un des deux indicateurs EP-2 ou EP-3, auquel cas elle requiert une intervention de réhabilitation ou de reconstruction. Pour calculer cette durée de vie, nous proposons d'utiliser la méthode de survie des cohortes (Eisenbeis, Rostum, & Le Gat, 1999) et le modèle de régression de Cox-1972 (Fox, 2002). Les données utilisées sont celles de conduites installées entre 1870 et 2018. Les courbes de survie sont établies pour chaque type de matériau, en mettant en relation les pourcentages de conduites qui sont dans un état excellent, bon ou moyen selon EP-1 ou EP-2 et l'âge des cohortes (figures 5.2, 5.3 et 5.4). La durée de vie de chaque cohorte est obtenue par lecture de l'abscisse du point obtenu lorsque 80 % sur l'axe vertical est projeté horizontalement sur la courbe de survie du matériau choisi. Les durées de vie ainsi obtenues sont : 125 ans pour la fonte grise installée avant 1950, 65 ans pour la fonte grise installée après 1950 et 75 ans pour la fonte ductile. Les résultats obtenus pour les durées de vie des cohortes analysées sont résumés au tableau 5.8.

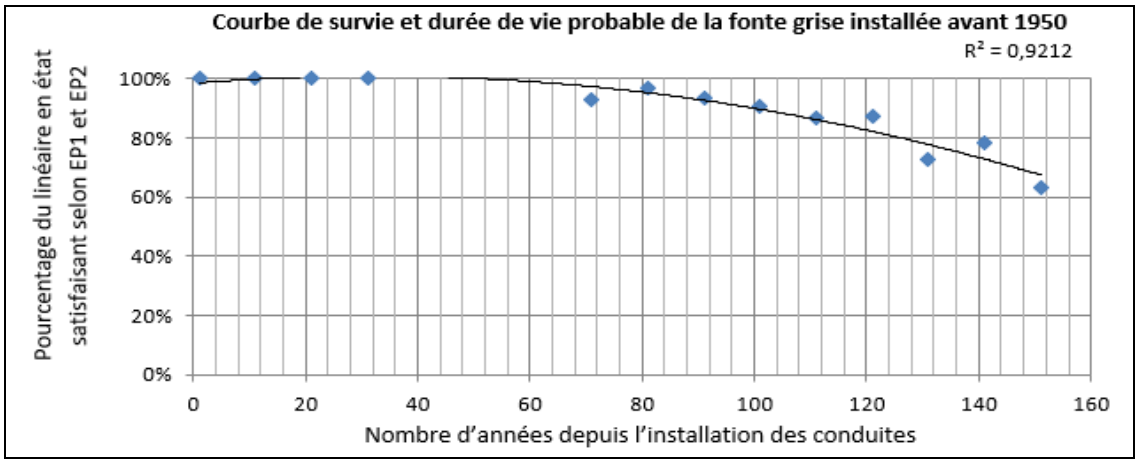


Figure 5.2 Courbe de survie et durée de vie de la fonte grise installée avant 1950 à Montréal

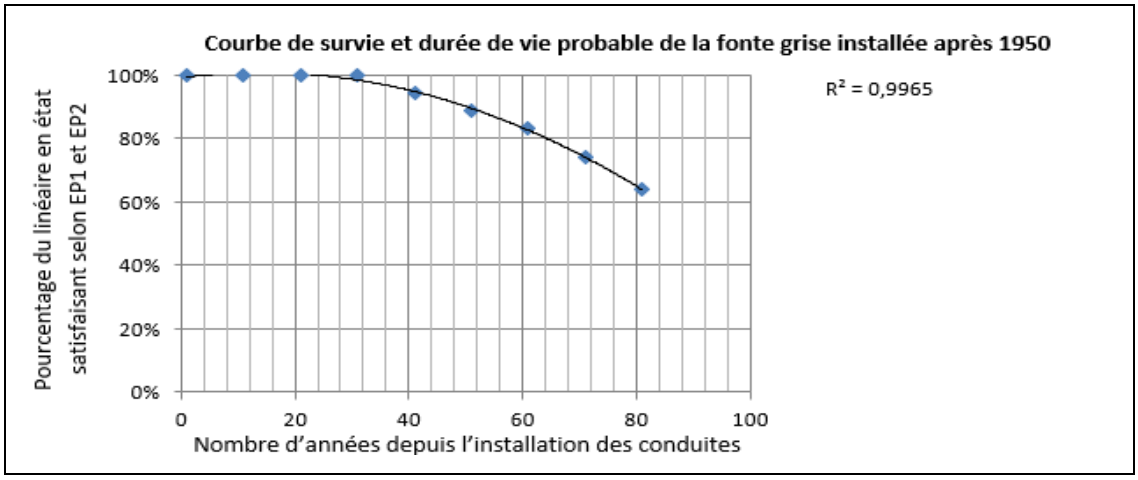


Figure 5.3 Courbe de survie et durée de vie de la fonte grise installée après 1950 à Montréal

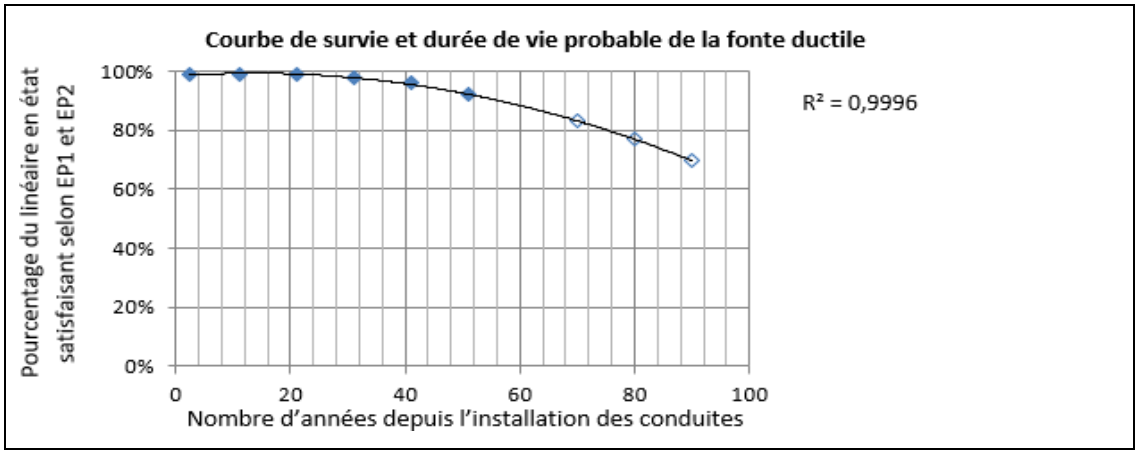


Figure 5.4 Courbe de survie et durée de vie de la fonte ductile installée à Montréal

Tableau 5.8 Durées de vie locales établies pour les conduites en fonte de la Ville de Montréal

Matériaux	Basé sur EP1 et EP2, 80% des conduites survivent jusqu'à	Basé sur EP1 et EP2, 70% des conduites survivent jusqu'à	Basé sur EP1 et EP2, 60% des conduites survivent jusqu'à
Fonte Grise installée avant 1950	125 ans	140 ans	150 ans
Fonte Grise installée après 1950	65 ans	75 ans	80 ans
Fonte Ductile	75 ans	90 ans	95 ans

L'élaboration des courbes de survie et des durées de vie fait ressortir le lien intrinsèque entre ces durées de vie et des probabilités de survie. Il est ainsi constaté que bien que 80 % des conduites parviennent généralement à la fin de leur durée de vie utile en maintenant un état satisfaisant, 70 % d'entre elles survivent au-delà de cette durée, et 60 % se rendent encore plus loin. Ainsi, pour une conduite en fonte grise installée avant 1950, les durées de vie associées à ces 3 probabilités sont respectivement 125 ans, 140 ans et 150 ans. Même si la référence en gestion d'actifs demeure 80 % de probabilité pour représenter avec un bon degré de confiance une population d'actifs, il est évident qu'une forte proportion de conduites survivra au-delà de la durée de vie utile ainsi déterminée. Cette proportion de conduites, qui maintiennent de bonnes performances au-delà de leur durée de vie utile, va diminuer progressivement avec l'âge des conduites. Toutefois, il est inexact et injustifié d'attribuer à une conduite un statut mauvais, sur la seule base du pourcentage de vie écoulée ou du dépassement de sa durée de vie utile. De plus, lorsque les courbes de survie sont établies pour une zone restreinte dont les conditions de terrains sont homogènes (type de sols, pression sectorielle, etc.), les durées de vie sont plus représentatives des conduites locales et plus proches de la réalité du site. À l'inverse, dans un secteur très étendu, l'écart-type autour de la durée de vie probable ou moyenne est si grand que ces données deviennent peu fiables et peu pertinentes pour qualifier l'état des conduites. En effet, l'application de cette nouvelle méthodologie pour la détermination des durées de vie des conduites d'eau de la Ville de Montréal, ainsi que le calcul de l'indicateur lié au pourcentage de vie écoulée (EP3) pour

toutes les conduites de la Ville de Montréal ont montré que 28% des conduites déficientes selon EP3 le sont aussi pour au moins un des indicateurs liés au bris (EP1 ou EP2), alors que ce pourcentage n'est que de 3% lorsque les durées de vie proposées par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) sont celles utilisées. Les résultats de cette analyse rejoignent les conclusions d'anciens travaux portant sur le même sujet (Le Gat & Eisenbeis, 2000; Renaud et al., 2011) et estimant que l'utilisation des durées de vie théoriques moyennes pour cibler le renouvellement des canalisations d'eau n'était pas assez pertinent, et que cet indicateur doit être amélioré ou encadré. Les durées de vie des conduites établies à partir de cette méthode diffèrent des durées de vie théoriques qui sont préconisées par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) et disponibles à l'annexe I (dans la section relative à EP-3). Les durées de vie réelles obtenues reflètent mieux les défaillances réelles observées, en rapport avec les bris. L'utilisation de cette méthodologie dynamique d'établissement des durées de vie préalablement au calcul du pourcentage de vie écoulée est une alternative intéressante à la méthode traditionnelle de calcul de EP-3. Elle augmente considérablement la fiabilité de l'indicateur EP-3, qui est davantage associé au risque probable de défaillance selon l'âge de la conduite, et non à un état de défaillance réelle.

5.2.5 Approche proposée pour l'établissement de l'état des conduites et l'optimisation des priorités d'intervention sur le réseau d'eau potable

La rétroaction des gestionnaires de réseaux d'eau potable a fait apparaitre plusieurs lacunes tant dans les indicateurs utilisés que dans le processus de détermination des conduites admissibles à des interventions. Ainsi, il n'est pas rare de trouver des conduites avec un statut « très mauvais » basé sur le nombre de bris historiques, et nécessitant donc une intervention immédiate, alors que ces conduites n'ont ni brisé depuis 10 ans, ni atteint un âge critique. En effet, diverses raisons peuvent occasionner des bris concentrés sur une période du cycle de vie d'une conduite, sans affecter significativement son état à long-terme, en autant que la cause des défaillances ait été découverte et correctement corrigée. Ainsi, une mauvaise qualité des réparations précédentes, des vibrations ponctuelles dans le sol dues à des travaux de proximité, de la surpression dans le réseau sectoriel, des hivers particulièrement froids sont quelques raisons pouvant expliquer ces phénomènes. Aussi, plusieurs conduites se

voient attribuer un statut « mauvais » dû au pourcentage de vie écoulée, nécessitant ainsi une intervention souhaitable, alors que ces conduites n'ont jamais brisé auparavant. Une partie de l'explication provient du fait que les durées de vie utilisées sont des valeurs moyennes théoriques qui ne tiennent pas forcément compte ni du comportement de la majorité des individus, ni des conditions locales spécifiques à chaque municipalité. L'écart-type sur les durées de vie moyennes théoriques est parfois si grand que les résultats issus de l'utilisation de l'indicateur EP-3 sont peu pertinents. Les méthodes traditionnelles d'élaboration des plans d'interventions, à l'instar de celle du MAMH, génèrent un trop grand nombre de conduites critiques et d'interventions urgentes à réaliser dans des délais peu raisonnables ainsi qu'avec des budgets limités. Ainsi, avec la méthode du MAMH par exemple, les conduites en très mauvais état et celles en mauvais état génèrent respectivement des interventions urgentes et souhaitables pour tout indicateur localisé, en l'occurrence EP-1, EP-2 et EP-3. Dans ces conditions, il devient difficile de résorber les déficits d'entretien, d'optimiser les interventions et d'améliorer la performance globale des réseaux même avec des budgets conséquents. La figure 5.5 illustre l'arbre de décision amélioré proposé aux gestionnaires des réseaux d'eau, à la suite des différentes études réalisées dans les sections précédentes. L'arbre de décision proposé se décrit comme suit : (1) lorsqu'une conduite obtient la cote 5 pour l'indicateur EP-2, elle est directement admissible à une attention immédiate. (2) Dans le cas contraire, on vérifie si la cote selon EP-1 est 5. Si la réponse est oui et qu'en plus la conduite a enregistré un bris dans les dix dernières années, alors elle est éligible à une attention immédiate. (3) Dans le cas contraire, on vérifie si la cote selon EP-2 est 4. Le cas échéant, la conduite est admissible à une intervention souhaitable. Autrement, on valide si la cote selon EP-1 est 4. Si la réponse est oui et qu'en plus la conduite a enregistré un bris dans les dix dernières années, alors elle est éligible à une intervention souhaitable. Dans le cas contraire, on valide si la cote selon EP-3 est 4. Si la réponse est oui et qu'en plus la conduite a enregistré un bris dans les dix dernières années, alors elle est éligible à une intervention souhaitable. Si la cote selon EP-3 est 4, mais que la conduite n'a pas enregistré de bris durant les dix dernières années, elle pourrait néanmoins être admissible à une intervention souhaitable à condition d'avoir une cote 4 ou 5 selon EP-1. Dans le cas où aucune des conditions précédentes ne s'applique à la conduite, on vérifie finalement si elle possède une

cote 4 ou 5 pour un autre indicateur localisé (exemple : perte d'épaisseur résiduelle de la paroi de la conduite) autre que EP-1, EP-2 ou EP-3. Si la réponse est positive, alors la conduite est admissible à une intervention souhaitable. Dans le cas contraire, aucune intervention n'est requise sur cette conduite excepté des activités de maintenance ou d'entretien préventif.

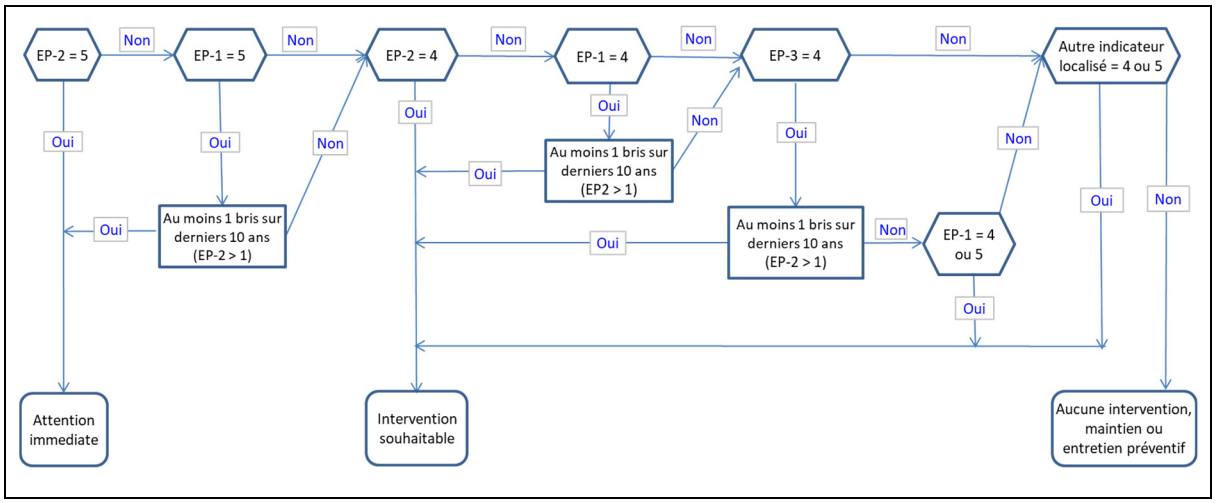


Figure 5.5 Arbre de décision proposé pour l'établissement des interventions pour les conduites d'eau potable

5.3 Validation du modèle proposé : application au réseau d'eau potable de la Ville de Montréal

5.3.1 Description des données utilisées

Pour valider l'efficacité de l'approche proposée, nous l'avons appliquée au réseau d'eau potable de la Ville de Montréal dans le cadre de la planification quinquennale des interventions requises de 2016 à 2020. Une analyse comparée des résultats issus de l'approche proposée a été réalisée avec les résultats issus de deux autres approches. Les deux autres approches sont : l'approche du MAMH (MAMROT & CERIU, 2013) et une méthode multicritère d'optimisation linéaire en nombre entier, qui sera davantage expliquée à la section 5.3.2.3. Il est à rappeler que la Ville de Montréal compte 4457 km de conduites d'eau potable toutes utilisées dans l'analyse.

5.3.2 Analyse comparative des résultats issus de l'application de différentes méthodologies

5.3.2.1 Optimisation des interventions par la méthode du MAMH

L'application de la méthodologie préconisée par le MAMH a permis d'établir que 12,4 %, soit 552 km de conduites d'eau potable, sont identifiées comme requérant des interventions. L'analyse s'est basée essentiellement sur l'utilisation des trois indicateurs minimalement requis selon cette approche, soient EP-1, EP-2 et EP-3. Les résultats du PI, établis selon cette méthode, sont résumés au tableau 5.9.

Tableau 5.9 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal
selon la méthodologie du MAMH

Répartition des conduites du réseau selon EP-1						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	63,6%	22,0%	8,2%	4,0%	2,2%	100%
Longueur (km)	2 833	980	368	178	99	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-2						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	91,2%	2,7%	2,1%	2,0%	1,9%	100%
Longueur (km)	4 067	121	96	87	86	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-3						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	9,3%	17,0%	69,1%	4,6%	0,0%	100%
Longueur (km)	415	757	3 081	204	-	4 457
Répartition des conduites selon la pire cote entre EP-1, EP-2 et EP-3 pour chaque conduite						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	8,4%	17,0%	62,3%	8,8%	3,6%	100%
Longueur (km)	373	756	2 775	392	159	4 457
Répartition des conduites selon les interventions requises						
	Aucune intervention			Intervention souhaitable	Attention immédiate	
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	87,6%			8,8%	3,6%	100%

Planification quinquennale	**12,4%**	**855 M$**	**Réalisation cumulée**	**6,7%**	**460 M$**
Planification annuelle - 2016	2,5%	171 M$	Taux réel 2016	1,3%	91 M$
Planification annuelle - 2017	2,5%	171 M$	Taux réel 2017	1,4%	96 M$
Planification annuelle - 2018	2,5%	171 M$	Taux réel 2018	1,5%	102 M$
Planification annuelle - 2019	2,5%	171 M$	Taux réel 2019	1,4%	95 M$
Planification annuelle - 2020	2,5%	171 M$	Taux réel 2020	1,1%	76 M$

État des réseaux secondaires de la Ville de Montréal de 2010 à 2019		
Années	2010-2015	2016-2020
Nombre annuel moyen de bris sur le réseau	915	840
Dépenses annuelles moyennes en réparations	13,7 M$	12,6 M$
Taux de bris annuel du réseau par 100 km/an	25,1	23,1
Coef de risque relatif (conduites renouvelées)		3,7

Durant la période de 2016 à 2020, seulement 300 km de conduites ont pu être renouvelées, soit 6,7 % de réseau et 54 % des besoins en interventions. Les conduites renouvelées ont causé près de 25 % des bris annuels des dix dernières années, et présentent donc un coefficient de risque relatif de 3,7. Leur remise à neuf devrait empêcher l'apparition de nouveaux bris sur ces conduites à moyen terme. Ce qui engendrerait une baisse du nombre et du taux de bris annuels du réseau. Le calcul de la moyenne mobile pour les périodes 2010-2015 et 2016-2020 montre une baisse de 8 % du taux de bris entre ces deux périodes. Aussi, un minimum de 10 ans serait nécessaire pour résorber le déficit établi à la suite du PI 2016, compte tenu des taux réels de renouvellement des réseaux, alors qu'un nouveau PI sera élaboré en 2021 et rajoutera au déficit existant, de nouvelles conduites nécessitant des interventions.

5.3.2.2 Optimisation des interventions par la nouvelle approche proposée

Les résultats issus de l'application de la nouvelle approche proposée, sont résumés au tableau 5.10.

Tableau 5.10 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal
selon la nouvelle méthodologie proposée

Répartition des conduites du réseau selon EP-1						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	63,6%	22,0%	8,2%	4,0%	2,2%	100%
Longueur (km)	2 833	980	368	178	99	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-2						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	91,2%	2,7%	2,1%	2,0%	1,9%	100%
Longueur (km)	4 067	121	96	87	86	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-3						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	9,3%	17,3%	71,5%	1,8%	0,0%	100%
Longueur (km)	415	773	3 186	82	-	4 457
Répartition des conduites selon les interventions requises						
	Aucune intervention			Intervention souhaitable	Attention immédiate	
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	93,0%			4,0%	3,0%	100%

Planification quinquennale	**7,0%**	**485 M$**	**Réalisation cumulée**	**6,7%**	**460 M$**
Planification annuelle - 2016	1,4%	97 M$	Taux réel 2016	1,3%	91 M$
Planification annuelle - 2017	1,4%	97 M$	Taux réel 2017	1,4%	96 M$
Planification annuelle - 2018	1,4%	97 M$	Taux réel 2018	1,5%	102 M$
Planification annuelle - 2019	1,4%	97 M$	Taux réel 2019	1,4%	95 M$
Planification annuelle - 2020	1,4%	97 M$	Taux réel 2020	1,1%	76 M$

État des réseaux secondaires de la Ville de Montréal de 2010 à 2019		
Années	2010-2015	2016-2020
Nombre annuel moyen de bris sur le réseau	915	777
Dépenses annuelles moyennes en réparations	13,7 M$	11,7 M$
Taux de bris annuel du réseau par 100 km/an	25,1	21,3
Coef de risque relatif (conduites renouvelées)		6,6

La nouvelle approche proposée permet de réduire de 12,4% à 7 % le pourcentage des conduites nécessitant des travaux, permettant ainsi de mieux concentrer les efforts sur les interventions les plus pertinentes et les plus bénéfiques pour la performance globale du réseau. Les résultats découlant de cette approche permettraient sur 5 ans, en gardant le même volume de travaux de renouvellement, de réaliser 96 % des besoins en interventions identifiés par l'approche proposée. De plus, les conduites ainsi ciblées causent en moyenne 46 % des bris annuels, basé sur l'historique des 10 dernières années, et possèdent donc un coefficient de risque relatif égale à 6,6. Leur remise à neuf devrait empêcher l'apparition de nouveaux bris sur ces conduites à moyen terme. Ceci engendrerait une baisse potentielle du nombre et du taux de bris du réseau d'environ 15 % entre les périodes 2010-2015 et 2016-2020. Le résultat précédent a été déduit des observations réelles en lien avec l'application de la méthode du MAMH (tableau 9). En effet, le renouvellement réel des conduites responsables de 25 % des bris actifs a engendré une baisse de 8 % du taux de bris, alors que celui des conduites responsables de 46 % des bris actifs engendrerait proportionnellement une baisse de 15 %. De plus, cela nécessiterait 5,2 années à la ville pour résorber la totalité du déficit établi à la suite du PI 2016 par la nouvelle approche proposée, comparativement à 10 ans avec la méthode traditionnelle. Il est à noter aussi que le fait d'intervenir plus vite sur les conduites les plus critiques en augmentant le risque relatif des conduites ciblées de 3,7 à 6,6 pourrait avoir un effet combiné de type exponentielle sur la baisse des taux de bris. En effet, plusieurs courbes de survie des conduites, incluant celles que nous avons établies au paragraphe 5.2.4, suivent des modèles exponentiels. En conséquence les courbes de dégradation associées à ces actifs suivent aussi des modèles exponentiels, laissant présumer que l'apparition des bris suit hypothétiquement une courbe exponentielle. Dans le cas échéant, la baisse anticipée des bris pourrait être supérieure à 15 %. Le niveau de service des réseaux s'améliorerait donc plus rapidement, et cela se ferait à des coûts moindres en termes de budget d'investissements (97 M$/an plutôt que 171 M$/an). Finalement, la baisse rapide du nombre de bris annuels permettra également une diminution des dépenses en réparations de bris et des économies substantielles de l'ordre de 1 000 000 $/an de plus qu'avec la méthode traditionnelle, en tenant compte du coût moyen

d'une réparation de conduite d'eau à Montréal (25 000 $) et de la diminution moyenne annuelle anticipée du nombre de bris (50) à l'échelle du réseau d'eau de la ville de Montréal.

5.3.2.3 Optimisation des interventions par la méthode combinatoire multicritère d'optimisation linéaire en nombres entiers

Pour valider la robustesse et l'efficacité de notre modèle, une troisième méthode d'optimisation multicritère a été testée. Le programme d'optimisation testé ici, vise à améliorer l'état du réseau d'eau potable au complet en minimisant sa cote globale pour la ramener le plus proche possible de la valeur parfaite de l'unité (1). La cote globale est calculée à partir de la moyenne des cotes EP1, EP2 et EP3 de chaque conduite, pondérées par leurs longueurs respectives. Pour ce faire, le programme choisit initialement de façon aléatoire des conduites à renouveler. Puis, il simule l'impact de ces renouvellements en réduisant la cote des différents indicateurs associés à ces conduites à un (1), synonyme d'un état excellent. Les conduites n'ayant pas été sélectionnées maintiennent leurs côtes initiales. L'impact de ces renouvellements se traduit donc par une diminution de la cote globale du réseau au complet. Le programme optimise ensuite le choix des conduites à renouveler, en sélectionnant celles permettant de minimiser la cote globale du réseau, pour donner suite aux travaux projetés. C'est alors que les conduites dont le renouvellement auront le plus d'impact sur l'amélioration de l'état du réseau sont choisies. On rappelle qu'une cote moyenne proche de 1 est synonyme d'un réseau en excellent état alors qu'une cote moyenne proche de 5 est synonyme d'un réseau en très mauvais état. Les conduites ciblées par un renouvellement sont choisies parmi celles ayant au moins une cote 4 ou 5 pour au moins un des indicateurs obligatoires préconisés par la méthode du MAMH, et ceci dans les limites de la capacité de réalisation de la Ville de Montréal, soit 6,7 % de travaux de renouvellement sur 5 ans. La fonction « objectif » à optimiser peut être formulée comme suit:

$$\text{Minimiser} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{k} (EPij - Xj\,(EPij - 1)) \qquad (5.1)$$

Les contraintes du modèle d'optimisation sont :

$$\frac{\sum_{j=1}^{n} Xj\,Lj}{\sum_{j=1}^{n} Lj} \leq t \qquad \text{avec} \qquad Xj = \{0;1\} \qquad (5.2)$$

j : identifiant ou indice de chacune des conduites du réseau

i : identifiant ou indice de l'indicateur d'état pris en compte

EPij : indicateur d'état i pour la conduite j

n : nombre de conduites du réseau

k : nombre d'indicateurs utilisées (k=3 dans notre cas)

Xj : variable du modèle qui détermine si la conduite doit subir une intervention (0 ou 1)
0 pour une conduite non ciblée et 1 pour une conduite ciblée pour une intervention

t : le pourcentage du réseau à renouveler selon la capacité de la ville

Lj : la longueur de la conduite j

Une image de l'onglet Excel des résultats du programme d'optimisation formulé ci-dessus décrit est présentée à la figure 5.6. La première colonne en couleur jaune montre les conduites qui ont été sélectionnées pour être renouvelées (valeur = 1) et celles qui n'ont pas été choisies (valeur = 0). La seconde colonne en couleur jaune montre la longueur de chacune des conduites sélectionnées dans le programme de renouvellement.

ID_CONDUITE	Etat_EP1	Etat_EP2	Etat_EP3	CLASSE_INTERVENTION	COTE_EP1 - 1	COTE_EP2 - 1	COTE_EP3 - 1	Sum	LONGUEUR	Intervention	Longueur rehabilite	% renouvelé	t
7591	Bon	Excellent	Moyen	A	1	0	2	3	325,9	0	0	**128**	
6023	Moyen	Excellent	Moyen	A	2	0	2	4	225,6	0	0	**6,7%**	**6,7%**
8449	Excellent	Excellent	Bon	A	0	0	1	1	247,6	0	0		
709	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	149,0	0	0		
716	Mauvais	Mauvais	Moyen	C	3	3	2	8	249,8	1	249,8		
718	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	294,8	0	0		
7891	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	199,1	0	0		
6063	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	153,3	0	0		
6065	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	204,5	0	0		
7544	Bon	Bon	Moyen	A	1	1	2	4	200,2	0	0		
775	Très mauvais	Très mauvais	Moyen	D	4	4	2	10	274,9	1	274,9		
2477	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	152,5	0	0		
2478	Excellent	Excellent	Mauvais	C	0	0	3	3	26,2	1	26,2		
2483	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	159,4	0	0		
2484	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	232,1	0	0		
1282	Très mauvais	Excellent	Moyen	D	4	0	2	6	121,8	1	121,8		
8426	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	214,3	0	0		
1247	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	167,0	0	0		
594	Excellent	Excellent	Bon	A	0	0	1	1	179,0	0	0		
595	Excellent	Excellent	Bon	A	0	0	1	1	194,8	0	0		
6270	Bon	Mauvais	Moyen	C	1	3	2	6	111,9	1	111,9		
6271	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	116,9	0	0		
6510	Moyen	Excellent	Moyen	A	2	0	2	4	233,2	0	0		
7404	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	340,6	0	0		
7405	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	238,9	0	0		
7406	Bon	Excellent	Moyen	A	1	0	2	3	230,4	0	0		
8802	Excellent	Excellent	Excellent	A	0	0	0	0	246,8	0	0		
914	Moyen	Excellent	Mauvais	C	2	0	3	5	269,9	0	0		
915	Très mauvais	Très mauvais	Moyen	D	4	4	2	10	169,0	1	169,0		
919	Moyen	Excellent	Moyen	A	2	0	2	4	223,6	0	0		
987	Excellent	Excellent	Excellent	A	0	0	0	0	247,1	0	0		
1894	Excellent	Excellent	Moyen	A	0	0	2	2	212,0	0	0		
1141	Bon	Excellent	Bon	A	1	0	1	2	86,8	0	0		
1144	Moyen	Excellent	Bon	A	2	0	1	3	312,0	0	0		
1145	Très mauvais	Très mauvais	Bon	D	4	4	1	9	147,1	1	147,1		
6009	Excellent	Excellent	Bon	A	0	0	1	1	222,4	0	0		

Figure 5.6 Résultat partiel des simulations issues de l'optimisation des interventions avec la méthode d'optimisation linéaire en nombres entiers

Les résultats récapitulatifs à l'issue de cette simulation sont présentés au Tableau 5.11. Les conduites admissibles à des interventions ne diffèrent pas de celles obtenues avec la méthode classique du MAMH. Toutefois, ce processus méthodique de priorisation des conduites à renouveler parmi celles admissibles, en tenant compte de la capacité de la Ville, permet déjà de mieux cibler les 6,7 % d'actifs qui subiront en priorité des interventions. D'où une meilleure performance de cette méthode sur les niveaux de service au bout des cinq années de référence du PI, comparativement à la méthode classique du MAMH.

Tableau 5.11 Résultats du PI 2016-2020 de la Ville de Montréal selon la méthode d'optimisation linéaire en nombres entiers

Répartition des conduites du réseau selon EP-1						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	63,6%	22,0%	8,2%	4,0%	2,2%	100%
Longueur (km)	2 833	980	368	178	99	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-2						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	91,2%	2,7%	2,1%	2,0%	1,9%	100%
Longueur (km)	4 067	121	96	87	86	4 457
Répartition des conduites du réseau selon EP-3						
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	9,3%	17,0%	69,1%	4,6%	0,0%	100%
Longueur (km)	415	757	3 081	204	-	4 457
Répartition des conduites selon les interventions requises						
	Aucune intervention			Intervention souhaitable	Attention immédiate	
Statut	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais	Total
Pourcentage	87,6%			8,8%	3,6%	100%

Planification quinquennale	**12,4%**	**855 M$**	**Réalisation cumulée**	**6,7%**	**460 M$**
Planification annuelle - 2016	2,5%	171 M$	Taux réel 2016	1,3%	91 M$
Planification annuelle - 2017	2,5%	171 M$	Taux réel 2017	1,4%	96 M$
Planification annuelle - 2018	2,5%	171 M$	Taux réel 2018	1,5%	102 M$
Planification annuelle - 2019	2,5%	171 M$	Taux réel 2019	1,4%	95 M$
Planification annuelle - 2020	2,5%	171 M$	Taux réel 2020	1,1%	76 M$

État des réseaux secondaires de la Ville de Montréal de 2010 à 2019		
Années	2010-2015	2016-2020
Nombre annuel moyen de bris sur le réseau	915	804
Dépenses annuelles moyennes en réparations	13,7 M$	12,1 M$
Taux de bris annuel du réseau par 100 km/an	25,1	22,1
Coef de risque relatif (conduites renouvelées)		5,5

Selon cette méthode combinatoire d'optimisation, les interventions les plus pertinentes, à hauteur de la capacité de la Ville (6,7% en 5 ans), permettent d'intervenir sur les conduites responsables de 37 % des bris annuels, soit des conduites ayant un coefficient de risque relatif de 5,5. Toutefois, le besoin total en interventions reste à 12,4 % pour la période de référence de ce PI. En outre, la cadence d'amélioration des réseaux selon les projections du taux annuel de bris, la baisse des dépenses annuelles de réparations, et les économies substantielles réalisables est également moindre avec cette méthode d'optimisation comparativement au modèle heuristique proposé. Cette moindre performance s'explique par le fait que la méthode combinatoire d'optimisation ne donne pas a priori plus de poids à un indicateur qu'à un autre. Ainsi les indicateurs basés sur des défaillances réelles telles que les bris observés ne sont pas priorisés par rapport aux indicateurs plus théoriques comme le pourcentage de vie écoulée. À titre d'exemple, des conduites ayant des cotes 2, 3, 4 ou 3, 2, 4 respectivement selon EP-1, EP-2 et EP-3, sont davantage priorisées dans les interventions ciblées que des conduites avec des cotes 2, 4, 2 respectivement selon EP-1, EP-2 et EP-3. Alors que cette dernière conduite présente un taux de bris plus élevé sur les dix dernières années. Ce qui est surtout important pour cette méthode est la somme des cotes des différents indicateurs de la conduite, car le programme priorise les conduites ayant le total le plus élevé.

5.4 Conclusions partielles

La nouvelle approche proposée permet de prioriser les interventions les plus pertinentes, de maximiser l'impact et le bénéfice des interventions sur l'amélioration des niveaux de service, et de réduire les déficits d'entretien et d'interventions. Cette approche peut être utilisée par toutes les municipalités dans la gestion du renouvellement de leur réseau d'eau potable et en l'occurrence la planification périodique des interventions de réhabilitation et de reconstruction des conduites. L'approche proposée est plus dynamique et plus efficace que plusieurs approches traditionnelles notamment celle préconisée par le MAMH ainsi que celle basée sur l'optimisation combinatoire multicritère. Notre approche propose une solution alternative aux critères de décisions qui génèrent trop de travaux plus ou moins pertinents, souvent impossibles à réaliser dans des délais raisonnables compte tenu des contraintes

opérationnelles. Elle offre également une alternative intéressante à l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la prise de décisions, grâce à sa simplicité, la clarté du raisonnement qui soutient les prises de décisions et sa prise en compte du comportement dynamique des conduites, en l'occurrence la méthode proposée pour établir les durées de vie des canalisations ainsi que l'impact spatial et temporel du dernier bris dans les prévisions de dégradation future.

De plus en plus de techniques de réhabilitation sans tranchée sont disponibles et efficaces pour intervenir sur les conduites d'eau sans affecter les actifs voisins. Toutefois, il est fortement conseillé d'inclure la gestion du renouvellement des conduites d'eau potable dans une approche globale de gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie de sorte à effectuer des économies de masse sur les coûts directs et indirects en coordonnant les travaux sur plusieurs actifs, lorsque cela est possible. À ce titre, cette approche peut facilement être intégrée dans un tel processus de gestion intégrée des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie.

Par ailleurs, même si cette étude a été limitée à l'utilisation des trois indicateurs les plus populaires EP-1, EP-2 et EP-3 en raison de leur disponibilité et facilité d'utilisation, il est possible d'intégrer plus explicitement de nouveaux indicateurs, à l'arbre de décision proposé pour maximiser son efficacité. À titre d'exemple, les combinaisons suivantes de facteurs : « Sol agressif + matériau de conduite corrosif + pourcentage élevé de vie écoulée » ou encore « Pression sectorielle élevée + pourcentage élevé de vie écoulée » semblent présenter un potentiel risque de défaillance élevée. Ces combinaisons de facteurs pourraient éventuellement générer des interventions immédiates ou souhaitables, mais n'ont pas été traitées dans ces travaux.

CHAPITRE 6

OPTIMISATION DU RENOUVELLEMENT DES CONDUITES D'ÉGOUTS

Ce chapitre expose les résultats des études effectuées dans le cadre de l'amélioration de la gestion des réseaux d'égouts pour optimiser le renouvellement des conduites. Un rappel de la problématique et des objectifs ciblés y est aussi brièvement réalisé. La méthodologie et les étapes de travail sont celles décrites à la section 4.2.

6.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à l'optimisation de la gestion des réseaux d'égouts

De nombreuses insuffisances minent la gestion actuelle des interventions sur les réseaux d'égouts. On note entre autres : (1) le manque de proactivité dans les interventions avec le risque de rater l'opportunité de faire une intervention préventive, moins couteuse et éventuellement sans tranchée, qui prolongerait à moindre coût la durée de vie des conduites; (2) la non-prise en compte de facteurs aggravants la détérioration des conduites d'égouts au sein des critères classiques de décision; (3) les critères structuraux et hydrauliques ne sont pas systématiquement pris en compte conjointement dans la prise des décisions d'intervention ainsi que dans le choix du type d'intervention; (4) la non-prise en compte des nouveaux défis environnementaux tels que les changements climatiques, la pollution et le développement durable dans les approches classiques actuellement disponibles; (5) le manque de précisions des méthodes disponibles, quant au type précis d'intervention à réaliser. Malgré des taux de renouvellement raisonnables, les efforts significatifs consentis par les municipalités durant les dernières années et des budgets élevés de travaux, il devient de plus en plus difficile pour les gestionnaires des réseaux d'égouts de maintenir ou d'améliorer l'état ainsi que les performances de leurs actifs. C'est dans ce contexte qu'intervient cette recherche visant à optimiser les critères et la démarche d'établissement de l'admissibilité des conduites d'égout à des interventions.

L'objectif fondamental de ce chapitre est de proposer une solution plus performante à la détermination de l'état, des besoins de renouvellement ainsi que des priorités d'intervention associées aux différentes conduites formant le réseau d'égouts. La solution envisagée serait une méthodologie d'élaboration des interventions sur les réseaux d'égouts plus efficace, plus performante, plus rentable, et durable. Pour ce faire, cette méthodologie devrait prendre en considération les indicateurs d'état et des facteurs (internes ou externes) aggravant la détérioration des conduites. Les objectifs spécifiques ciblés sont : (1) analyser l'impact de certains facteurs internes ou externes, et de leur combinaison, sur l'aggravation ou l'accélération de la dégradation des conduites d'égouts; (2) mettre en place une procédure permettant d'intégrer et de refléter l'impact des facteurs aggravants dans l'évaluation de l'état et de la vulnérabilité des conduites d'égouts; (3) proposer une méthodologie plus performante d'élaboration des besoins et des priorités d'interventions des conduites d'égouts, en tenant compte des résultats obtenus pour les objectifs spécifiques précédents.

6.2 Présentation des résultats

Selon le WRc (2001), l'environnement dans lequel évolue une conduite peut avoir une grande influence sur l'évolution de ses défauts structuraux et le risque de défaillance à court terme. Le WRc définit les facteurs de présomption de risque, qui peuvent aggraver l'état structural d'une conduite dans le futur; on y retrouve le type de sol en place, le niveau de la nappe phréatique et le régime hydraulique à l'intérieur de la conduite. Le type de sol intervient par sa texture qui détermine d'une part la cohésion entre ses particules et la facilité de son lessivage et d'autre part le pourcentage de particules fines qui peuvent migrer et créer un vide autour de la conduite. Cette texture intervient aussi pour la détermination de la capacité de drainage du sol qui influence le module de réaction du sol et sa rigidité. La nappe phréatique intervient par son niveau par rapport à la couronne de la conduite. La fluctuation de la nappe phréatique génère le déplacement des particules fines et la création de vides autour de la conduite. Ces problèmes peuvent être aggravés en présence de conduites non étanches. Finalement, le régime hydraulique de la conduite est évalué par rapport à la fréquence des mises en charge. Le tableau 6.1 élaboré par le WRc (2001), montre comment

modifier les échelles d'évaluation structurales obtenues par inspection CCTV, pour prédire l'évolution des échelles de gravité dans un futur proche. Les échelles d'évaluation présentées dans la 1ère colonne de gauche du tableau 6.1, sont modifiées selon le risque géotechnique présenté par une des trois lignes de ce tableau, selon le niveau du risque relié à la fréquence des mises en charge dans la conduite indiquée par une des trois colonnes et le niveau de la nappe phréatique indiqué par un (+) lorsqu'elle est haute ou un (-) lorsqu'elle est basse. On peut constater que les échelles 1 (conduite parfaite) et 5 (conduite complétement détériorée) ne sont pas affectées par ces facteurs de risque qui aggravent l'échelle d'évaluation structurale. L'échelle 1 n'est pas modifiée car la conduite étant parfaite, elle est à toute épreuve en rapport avec les facteurs aggravants. L'échelle 5 étant déjà à son maximum, on ne peut pas l'augmenter et la conduite doit être de toute façon réhabilitée ou remplacée.

Tableau 6.1 Méthodologie du WRc pour l'établissement des cotes d'état selon les présomptions de risque pour divers facteurs influençant la dégradation des conduites d'égout

Tiré de WRc (2001)

		Cote de condition interne modifiée					
		Surcharge					
		Rare		Fréquente		Journalière	
Cote de condition interne	Position de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+
	Type de sol						
4	Risque élevé	4	5	5	5	5	5
3		3	4	4	5	5	5
2		2	3	3	4	3	4
4	Risque moyen	4	5	4	5	5	5
3		3	3	4	4	4	4
2		2	2	2	2	3	3
4	Risque faible	4	4	4	4	5	5
3		3	3	3	3	3	3
2		2	2	2	2	2	2

De façon globale la méthodologie du WRc dresse un cadre propice à l'intégration de divers facteurs internes et externes dans l'établissement de l'état global de la conduite. Toutefois le caractère qualitatif ou trop général de certains indicateurs ou paramètres comme le niveau de surcharge ou le risque géotechnique relié au sol rend difficile leur utilisation dans la pratique courante, à cause du manque de précision quant à la façon de les établir, de les estimer et de les différencier. Contrairement au modèle du WRc, celui proposé par le MAMH ne tient pas compte des facteurs aggravants et des impacts de leur combinaison avec d'autres indicateurs critiques, dans le processus de prise de décisions d'interventions. Toutefois, le modèle du MAMH propose une gamme variée d'indicateurs d'état, tous quantitatifs et pertinents, dont l'ajustement et la combinaison avec le modèle du WRc permet d'anticiper des résultats intéressants. Ainsi, dans les étapes suivantes, la méthode WRc est combinée avec la méthode du MAMH pour établir les grilles d'évaluation améliorées envisagées.

6.2.1 Évaluation de l'impact des performances hydrauliques et fonctionnelles combinées au niveau de la nappe phréatique sur l'état structural des conduites d'égouts

Le but de cette section est d'analyser et de répercuter objectivement et quantitativement l'effet des surcharges hydrauliques et des infiltrations sur la détérioration structurale des conduites d'égouts pluviaux ou unitaires, et ceci en tenant compte du type de sol environnant la conduite. La grille du WRc (Tableau 6.1) sera utilisée comme cadre de référence pour la combinaison des différents indicateurs et facteurs aggravants. De plus les modifications suivantes seront apportées et intégrées à la méthodologie :

a) les situations de surcharges sont prises en compte par un indicateur global d'état hydraulique appelé cote EPL-hyd;
b) la cote structurale EPL-1 est tout d'abord corrigée par l'impact de la cote EPL-hyd;
c) la cote EPL-combinée est la cote finale issue de la combinaison de toutes les cotes (structurale et hydraulique) et facteurs aggravants pris en compte dans l'évaluation. Elle correspond à la valeur maximale entre EPL-1, EPL-1 corrigée et EPL-hyd.

6.2.1.1 Sol composé de sable et limon

Quand le sol entourant la conduite est constitué de sable ou de limon, le risque géotechnique est élevé en rapport avec l'entrainement des particules fines et la formation de vides autour de la conduite. Une grille d'évaluation intermédiaire est générée pour tenir compte de l'impact des surcharges hydrauliques sur les cotes structurales, le tout dépendant des niveaux de la nappe phréatique (voir tableau 6.2). Par la suite, la cote globale combinée qui tient compte de la concomitance de tous les indicateurs est établie. La cote globale combinée est la cote maximale entre celle obtenue au tableau 6.2 puis celle de EPL-hyd. La grille d'évaluation finale proposée pour élaborer la cote globale combinée des conduites d'égouts se trouvant dans ces conditions est illustrée au Tableau 6.3.

Tableau 6.2 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale initiale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque élevé

Cote hydraulique globale (EPL-hyd)	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale initiale (EPL-1)	Impact de la cote EPL-hyd sur la cote EPL-1									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	3	2	3	3	4	3	4	3	4
3	3	4	3	4	4	5	4	5	5	5
4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Les zones où la cote initiale de l'indicateur EPL-1 est modifiée à une cote supérieure

Tableau 6.3 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et des performances structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque élevé

Cote EPL-hyd	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale EPL-1	Cote EPL-combinée									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	3	2	3	3	4	**4**	4	**5**	**5**
3	3	4	3	4	4	5	4	5	5	5
4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Pour ce type de sol, les situations où les valeurs des cotes de l'indicateur structural EPL1 sont modifiées en fonction des cotes de l'indicateur EPL-hyd sont nombreuses. Ainsi, on observe que lorsque les conduites sont placées dans des zones où le niveau de la nappe est bas :

- la cote de l'indicateur EPL-hyd n'impacte pas la cote de l'indicateur structural EPL1 lorsqu'une cote EPL-hyd = 1 ou 2;
- la cote de l'indicateur EPL1 augmente d'un palier lorsqu'une cote EPL-hyd = 3 ou 4;
- la cote de l'indicateur structural EPL1 augmente d'un palier et plus lorsque la cote de l'indicateur EPL-hyd est de 5.

Pour les conduites situées dans des zones où le niveau de la nappe phréatique est haut :

- lorsque la cote EPL-hyd = 1 ou 2, la cote de l'indicateur EPL1 augmente d'un échelon;
- lorsque la cote EPL-hyd = 3, 4 ou 5, la cote de l'indicateur structural augmente d'un échelon et plus.

6.2.1.2 Sol composé d'argile de faible plasticité ou de gravier fin à moyen

Le sol composé d'argile de faible plasticité ou de gravier fin à moyen présente un risque géotechnique moyen. Une grille d'évaluation intermédiaire est générée pour tenir compte de l'impact des surcharges hydrauliques sur les cotes structurales, le tout dépendant des niveaux

de la nappe phréatique (voir tableau 6.4). Par la suite, la cote globale combinée qui tient compte de la concomitance de tous les indicateurs est établie, et définie comme étant la cote maximale entre celle obtenue au tableau 6.4 puis celle de EPL-hyd. La nouvelle grille d'évaluation finale proposée pour élaborer la cote globale combinée des conduites d'égout se trouvant dans ces conditions est illustrée au Tableau 6.5.

Tableau 6.4 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale initiale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque moyen

Cote EPL-hyd	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale EPL-1	Impact de la cote EPL-hyd sur la cote EPL-1									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
4	4	5	4	5	4	5	4	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Les zones où la cote initiale de l'indicateur EPL-1 est modifiée à une cote supérieure

Tableau 6.5 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et des performances structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque moyen

Cote EPL-hyd	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale EPL-1	Cote EPL-combinée									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**
3	3	3	3	3	4	4	4	4	**5**	**5**
4	4	5	4	5	4	5	4	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

En comparaison avec le sable et le limon, on remarque que les situations conduisant à des changements dans les cotes d'EPL-combinée, relativement à EPL-hyd ou EPL1, sont moins nombreuses pour ce type de sol. Ainsi, on observe au tableau 6.5 que les conduites placées

dans une zone où la nappe est haute, et en présence d'EPL1 égale à 4, les mises en charges hydrauliques augmentent la détérioration structurale et la cote de cet indicateur passe de 4 à 5 (niveau maximal). De même, et peu importe le niveau de la nappe, on constate que :

- lorsque la cote de l'indicateur de performance hydraulique EPL-hyd est de 3, 4 ou 5, la valeur de l'indicateur structural EPL1 passe de 3 à 4;
- lorsque la cote de l'indicateur de performance hydraulique EPL-hyd est égale à 5, la valeur de l'indicateur structural EPL1 passe de 4 à 5;
- lorsque la cote de l'indicateur de performance hydraulique EPL-hyd est égale à 5, la valeur de l'indicateur structural EPL1 passe de 2 à 3;

6.2.1.3 Sol composé d'argile de moyenne à haute plasticité

Le sol constitué d'argile de moyenne à haute plasticité correspond à un sol de risque géotechnique faible. Une grille d'évaluation intermédiaire est générée pour tenir compte de l'impact des surcharges hydrauliques sur les cotes structurales, le tout dépendant des niveaux de la nappe phréatique (voir tableau 6.6). Par la suite, la cote globale combinée qui tient compte de la concomitance de tous les indicateurs est établie, et est la cote maximale entre celle obtenue au tableau 6.6 et celle de EPL-hyd. La nouvelle grille d'évaluation proposée pour élaborer la cote globale combinée des conduites d'égout, est illustrée au Tableau 6.7.

Tableau 6.6 Impact de la cote hydraulique globale sur la cote structurale selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque faible

Cote EPL-hyd	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale EPL-1	Impact de la cote EPL-hyd sur la cote EPL-1									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Les zones où la cote initiale de l'indicateur EPL-1 est modifiée à une cote supérieure

Tableau 6.7 Effet de la concomitance des performances hydrauliques et structurales selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH pour un sol à risque faible

Cote EPL-hyd	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
Niveau de la nappe phréatique	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Cote structurale EPL-1	Impact de la cote EPL-hyd sur la cote EPL-1									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**
3	3	3	3	3	3	3	**4**	**4**	**5**	**5**
4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Pour ce type de sol, on observe au tableau 6.6 que la valeur de la cote de l'indicateur structural EPL1 est modifiée uniquement lorsque la cote de l'indicateur EPL-hyd = 5 ; à ce moment la valeur d'EPL1 passe de 4 à 5 avec ou sans présence de risque d'infiltration.

6.2.2 Impact des modifications de la grille d'évaluation sur les classes d'intervention et priorités de réhabilitation des conduites d'égouts

La prise en compte des nouvelles valeurs des cotes de l'indicateur EPL-combinée sur l'établissement des classes d'intervention des conduites représente la 3ème étape de l'étude. Selon les recommandations du MAMH (2013), il faut continuer à étudier ou à ausculter les conduites lorsque leur cote d'état structural EPL1 est 3 (classe d'intervention B), et prévoir des interventions (classes d'intervention C ou D) si la conduite présente une cote EPL1 égale à 4 ou 5, appuyée par une analyse concluante des inspections télévisées. Dans la partie suivante, on présente les différentes classes d'intervention possibles auxquelles on aboutit pour les 3 types de sol, en tenant compte de l'effet combiné des performances hydrauliques, structurales et facteurs aggravants c'est-à-dire suivant les cotes de l'indicateur d'état combiné EPL-combinée.

6.2.2.1 Sol à risque géotechnique élevé

Dans les cas où la détérioration structurale est moyenne (EPL1 = 3), avec un sol à risque géotechnique élevé, en présence de risque d'infiltration et de surcharges hydrauliques fréquentes (EPL-hyd = 3), le risque de détérioration prématurée de l'état structural de la conduite augmente significativement, entrainant EPL-combinée = 5. Il serait recommandé d'accorder à cette conduite une priorité de réhabilitation immédiate. Le même constat se fait pour une conduite dont les performances hydrauliques sont excellentes (EPL-hyd = 1) sans risque de surcharge lié à sa capacité, mais en présence de risque d'infiltration. Dans un tel cas, EPL1 = 4 entraine EPL-combinée = 5; nécessitant une attention immédiate pour éviter une situation extrême telle que l'effondrement de la conduite. La figure 6.1 montre les situations où la classe d'intervention est amplifiée par les performances hydrauliques.

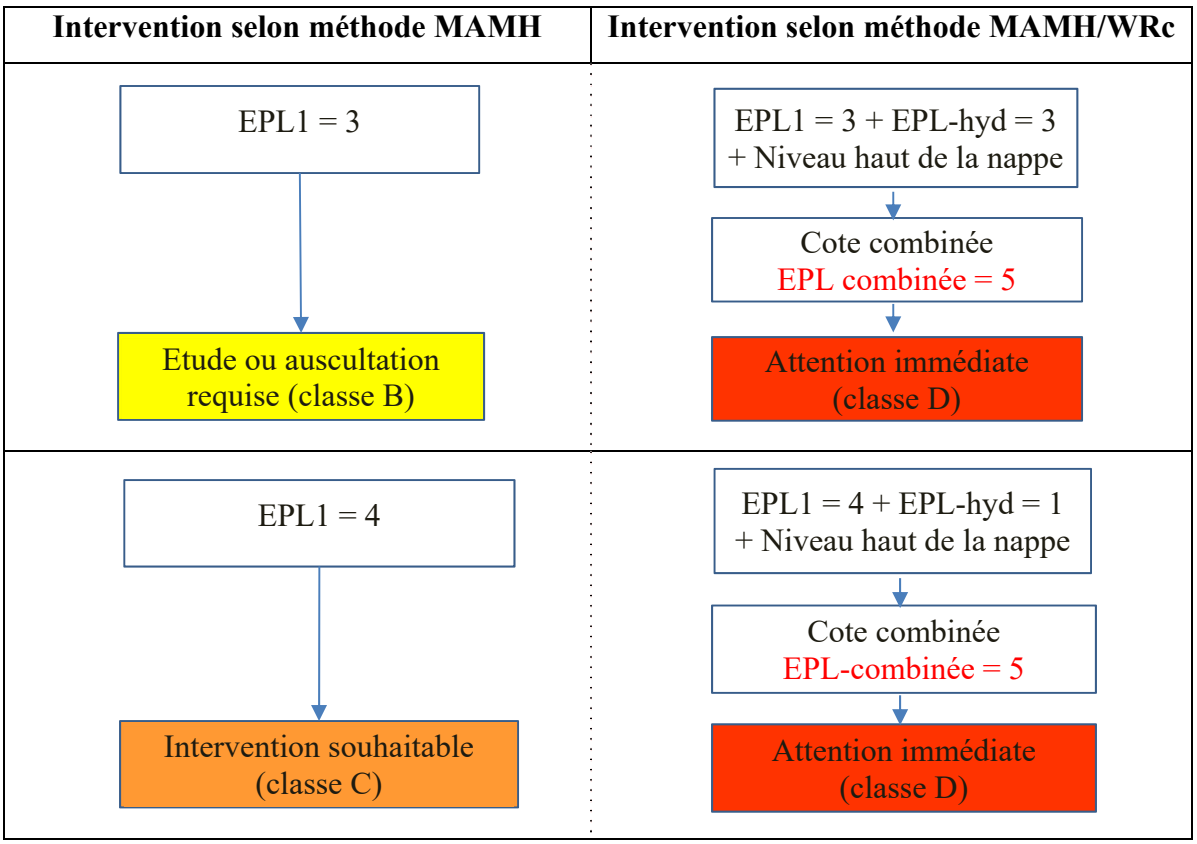


Figure 6.1 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égout pour un sol à risque élevé

6.2.2.2 Sol à risque géotechnique moyen

Pour ce type de sol, on observe 2 situations (Figure 6.2) où l'assignation des travaux de réhabilitation est modifiée, à savoir :

- EPL1 = 3, pour un segment d'égout présentant des surcharges fréquentes combinées à un état hydraulique moyen (EPL-hyd = 3) en présence de risque d'infiltration, le risque de détérioration prématurée de l'état structural devient élevé (EPL-combinée = 4) et il serait souhaitable de prévoir une intervention de réhabilitation (classe d'intervention C);
- EPL1 = 3, pour un segment d'égout ayant d'excellentes performances hydrauliques (EPL-hyd = 1), mais présentant des risques d'infiltration, le risque de dégradation prématurée s'accentue (EPL-combinée = 5), d'où la recommandation d'attention immédiate.

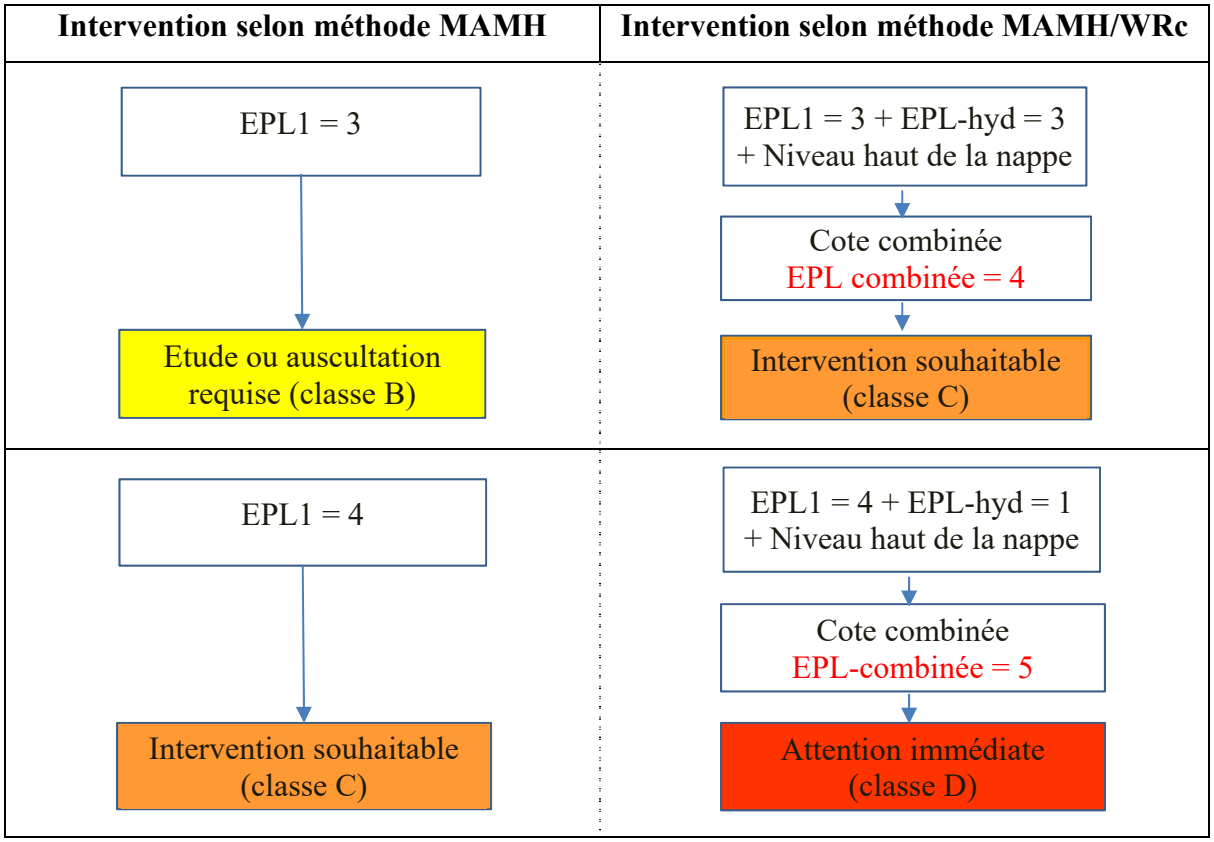


Figure 6.2 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égouts pour un sol à risque moyen

6.2.2.3 Sol à risque géotechnique faible

Pour ce type de sol, une seule situation suscite le changement d'affectation des classes d'intervention dans l'établissement du PI des conduites d'eaux pluviales. Il s'agit de la situation (voir la Figure 6.3) où une conduite d'eau pluviale possède une cote EPL1 égale à 4, et présente des problèmes hydrauliques de surcharge (EPL-hyd = 5) avec ou sans risque d'infiltration. Le risque que son état structural se détériore davantage devient élevé (EPL-combinée = 5) ; c'est-à-dire qu'il serait souhaitable de placer ce segment sous attention immédiate (classe d'intervention D au lieu de la classe initiale C).

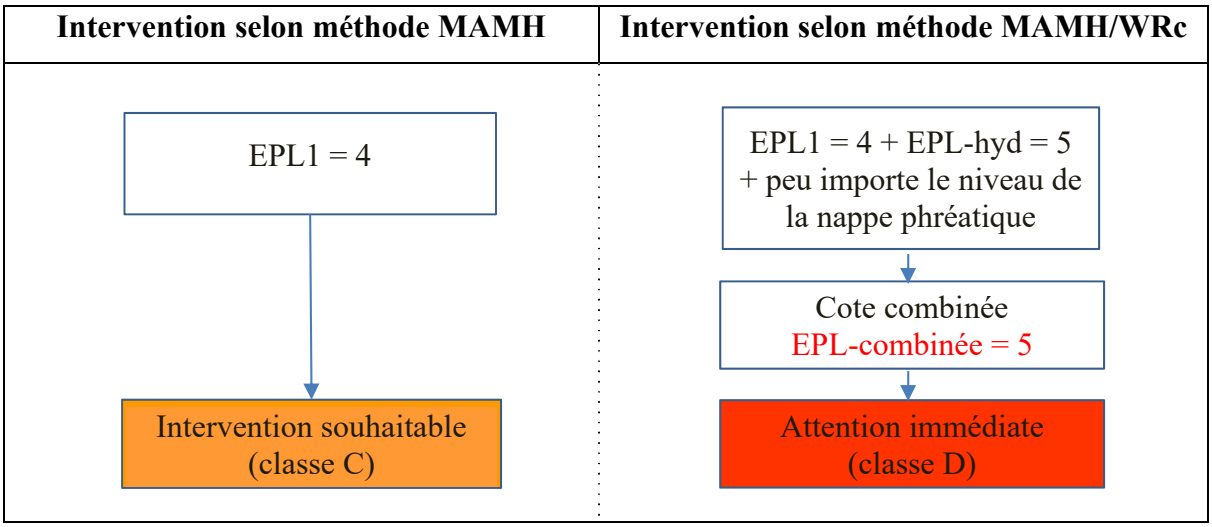


Figure 6.3 Variation des classes d'intervention selon la combinaison des performances structurales et hydrauliques des conduites d'égouts pluviaux pour un sol à risque faible

6.2.3 Optimisation des recommandations et priorités d'intervention sur les réseaux d'égouts

L'évaluation de l'état d'une conduite est généralement basée sur deux facteurs. Le premier décrit l'état physique de la conduite défini par la cote structurale. Le deuxième est lié aux conditions fonctionnelles et/ou hydrauliques décrites par l'ensemble des cotes EPL3, EPL2 et EPL4. Dans le présent travail, ces deux côtes d'état ont été combinées tout en intégrant l'effet du type de sol et le niveau de la nappe pour donner une cote unique à la conduite. La combinaison de l'indicateur structural basé sur le protocole du WRc (2001) et de l'indicateur

hydraulique EPL-hyd a permis de développer les matrices avec les nouvelles cotes d'état présentées dans les Tableaux 6.5, 6.6 et 6.7. L'indicateur hydraulique global (EPL combiné) peut intégrer la défaillance fonctionnelle relevée par inspection, par plainte (selon les registres) ou par étude. Il est loisible à la municipalité de choisir le mode à utiliser pour démontrer l'état hydraulique de l'égout. Par ailleurs, l'utilisation de la cote structurale est décisive pour toute intervention en termes de réhabilitation. L'approche proposant des cotes combinées pour une conduite donnée est basée sur le fait que la valeur de la cote structurale est soit maintenue si aucun facteur ne risque d'aggraver l'état structural, soit incrémentée par 1 si la qualité du sol est considérée agressive et le niveau de la nappe est élevé.

Ainsi, un sol composé d'argile de moyenne à haute plasticité présente un risque faible d'aggraver l'état structural, sauf dans le cas de présence d'une nappe à niveau assez élevé dans la zone de la conduite, combiné à la présence de déficiences fonctionnelles importantes (cote hydraulique de 5). Dans ce cas une cote de 4 passe automatiquement à 5.

Dans le cas d'un sol composé d'argile de faible plasticité ou de gravier fin à moyen, une cote incrémentée de 1 est assignée aux conduites avec un état structural mauvais en présence de nappe à niveau élevé quelle que soit la cote hydraulique. Pour une conduite ayant une cote structurale de 3, la cote combinée passe automatiquement à 4 à partir du moment où l'état hydraulique est jugé moyen (cote de 3 à 5) quel que soit le niveau de la nappe.

Concernant le type de sol constitué de sable et limons, le facteur « niveau de la nappe » est prépondérant pour juger de l'état structural. La cote est incrémentée de 1 dès que le niveau de la nappe est haut, quelle que soit la cote d'état hydraulique de la conduite. Sauf pour un état structural excellent où il est jugé que le niveau de la nappe ou la déficience hydraulique n'ont pas d'influence.

6.2.3.1 Priorité de réhabilitation des conduites d'égouts

Une fois la détermination des cotes d'état combiné réalisée pour l'ensemble des conduites du réseau, nous proposons les priorités de réhabilitation résumées dans le tableau 6.8, en conformité avec l'approche proposée par le MAMH (MAMROT & CERIU, 2013).

Tableau 6.8 Grille de priorité proposée pour les interventions de réhabilitation

Côte d'état combinée		**Hiérarchisation (criticité)**	**Priorité de la réhabilitation**
Échelle numérique	**Échelle linguistique**		
1	Excellent	Peu importe	Non nécessaire
2	Bon	Supérieur ou égale à II	Non nécessaire
		Inférieur à II	Faible
3	Moyen	Supérieur ou égale à II	Faible
		Inférieur à II	Moyenne
4	Mauvais	Supérieur ou égale à II	Moyenne
		Inférieur à II	Élevée
5	Très mauvais	Peu importe	Immédiate

Nous avons associé deux échelles pour les cotes d'état combinées. Une échelle numérique allant de 1 à 5 correspondant à un état allant d'excellent à très mauvais. Pour les deux états extrêmes (excellent et très mauvais), la priorité de la réhabilitation est indépendante du niveau de hiérarchisation. Si le tronçon a une cote de 1 aucune réhabilitation n'est nécessaire. Un tronçon avec une cote 5 nécessite une réhabilitation immédiate quel que soit son niveau hiérarchique. La priorité de la réhabilitation pour les cotes 2, 3 et 4 dépend du niveau hiérarchique de la conduite. Plus le niveau est important, plus la priorité d'intervenir est grande.

6.2.3.2 Arbre décisionnel et classes d'intervention des conduites d'égouts

La première étape du mécanisme d'établissement des infrastructures prioritaires est la détermination d'une classe d'interventions préliminaires en fonction des statuts obtenus pour les indicateurs combinés et selon la criticité du segment. Par la suite, on garde les mêmes classes d'intervention que celles du MAMH. Les classes d'interventions sont présentées de façon sommaire dans la figure suivante (Figure 6.4).

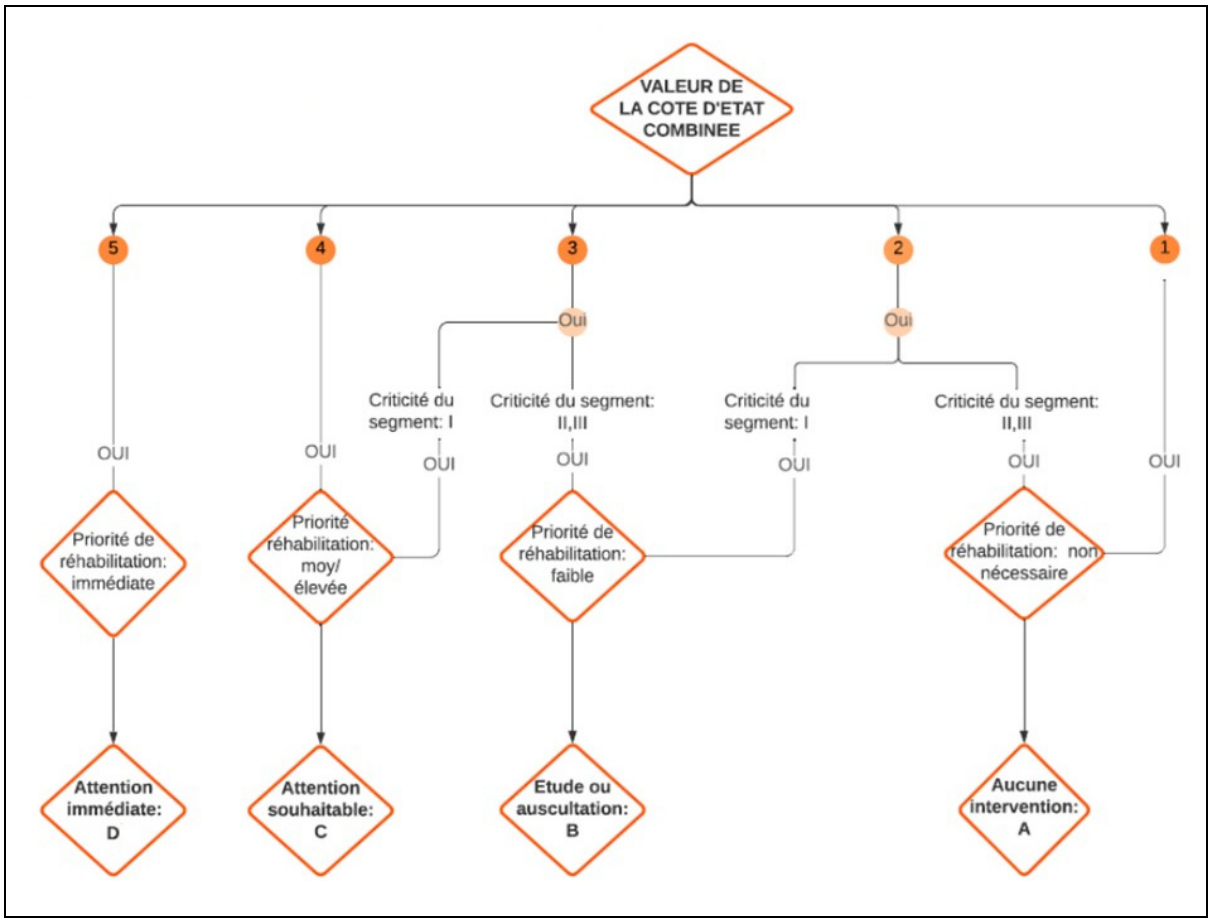


Figure 6.4 Arbre décisionnel proposé sur la base de la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH

6.3 Validation de l'approche proposée : application au réseau d'égouts de la ville de Montréal

Pour valider l'approche proposée, nous l'avons appliquée sur une partie du réseau d'égout de la Ville de Montréal. Le choix de la Ville de Montréal est motivé par le déficit d'investissement cumulé des dernières années en rapport avec les actifs du réseau d'égout (Vérificateur général de la ville de Montréal, 2012). Les réseaux choisis sont situés dans 2 zones différentes : la zone 1 située dans le secteur Villeray-Saint-Michel (Figure 6.5) et la zone 2 située dans le secteur de Verdun (Figure 6.6). Pour la nature du sol, celui de la zone 1 est de type sable limon, tandis que celui de la zone 2 est de type argile ou gravier fin suivant la carte des dépôts meubles de l'île de Montréal (V. Prest & Hode keyser, 1982). Compte tenu du manque de données de terrain, nous considérons que le réseau d'égouts de la zone 1 est placé dans une zone où le niveau de nappe est bas, vu son éloignement du cours d'eau. Tandis que le niveau de la nappe du réseau de la zone 2 est haut, puisqu'il est proche du fleuve Saint-Laurent.

6.3.1 Description des données physiques et d'état des secteurs étudiés

Réseau d'égout pluvial de la zone 1

Le réseau d'égout pluvial, de type séparatif, est composé de conduites de grands diamètres (> 600 mm) totalisant environ 900 mètres de longueur, construites en béton armé en 1987 et dont l'âge n'a pas encore atteint le quart de leur cycle de vie. Les conduites ont été inspectées en 2010, et présentent des cotes d'état structural EPL1 variant de 1 à 4 et l'une des 2 cotes d'indicateurs fonctionnels et hydrauliques est au moins connue. Selon les résultats du PI de la Ville de Montréal (2016-2021), l'état de ces conduites varie de mauvais à moyen et les classes d'intervention sont de type classe A, sauf pour un tronçon qui nécessite l'auscultation (voir Tableau 6.9).

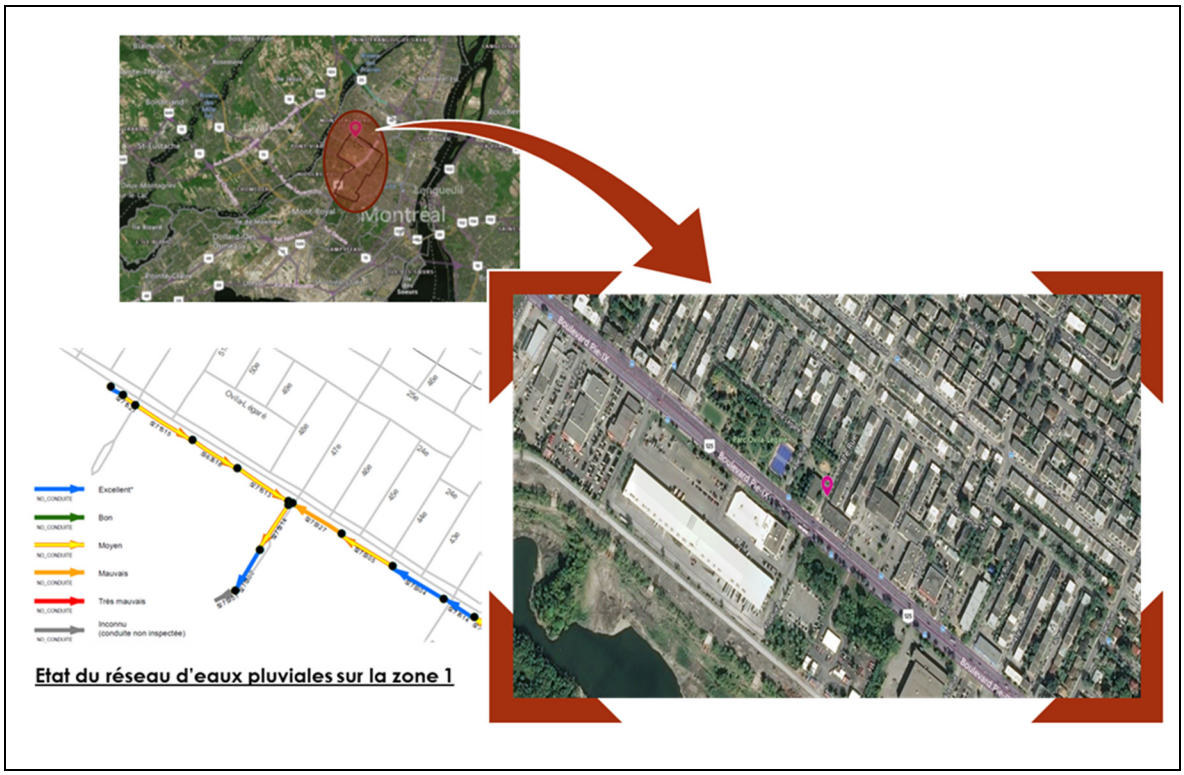


Figure 6.5 Emplacement du réseau d'égout pluvial de la zone 1

Tableau 6.9 Données d'état du réseau d'égout de la zone 1 selon la méthode du MAMH

Données physiques						**Indicateurs et cotes d'état selon méthode MAMH**				
Arrondis.	Conduite	Mat.	Date instal.	Type réseau	Année insp	EPL-1	EPL-3	EPL-4	Statut	Classe inter-vention
Villeray	5275304	B.A.	1987	Pluvial	2010	1		1	Excellent	A
Villeray	5275305	B.A.	1987	Pluvial	2010	3			Moyen	A
Villeray	5275327	B.A.	1987	Pluvial	2010	4	1	1	Mauvais	B
Villeray	5275300	B.A.	1987	Pluvial	2010	1		1	Excellent	A
Villeray	5275314	B.A.	1987	Pluvial	2010	3	1	1	Moyen	A
Villeray	5271513	B.A.	1987	Pluvial	2010	3	1	1	Moyen	A
Villeray	5271515	B.A.	1987	Pluvial	2010	3	1	1	Moyen	A
Villeray	5363516	B.A.	1987	Pluvial	2010	3	1	1	Moyen	A
Villeray	5271521	B.A.	1987	Pluvial	2010	3	3	1	Moyen	A

Réseau d'égout pluvial de la zone 2

Le réseau à l'étude est composé de conduites de grands diamètres (>600 mm) totalisant environ 500 mètres de longueur et construites en béton armé entre 1968 et 1969. Notons que les conduites ont légèrement dépassé le premier tiers de leur cycle de vie. Les conduites ont été inspectées en 2012-2013, et présentent des cotes d'état structural EPL1 variant de 1 à 3. Les cotes d'indicateurs fonctionnels et hydrauliques sont connues avec EPL4 = 1 et EPL3 qui varie de 1 à 3. Selon les résultats du PI de la Ville de Montréal (2016-2021), l'état de ses conduites varie de moyen à excellent et toutes les classes d'intervention sont de type classe A, c'est-à-dire aucune intervention n'est prévue (Tableau 6.10).

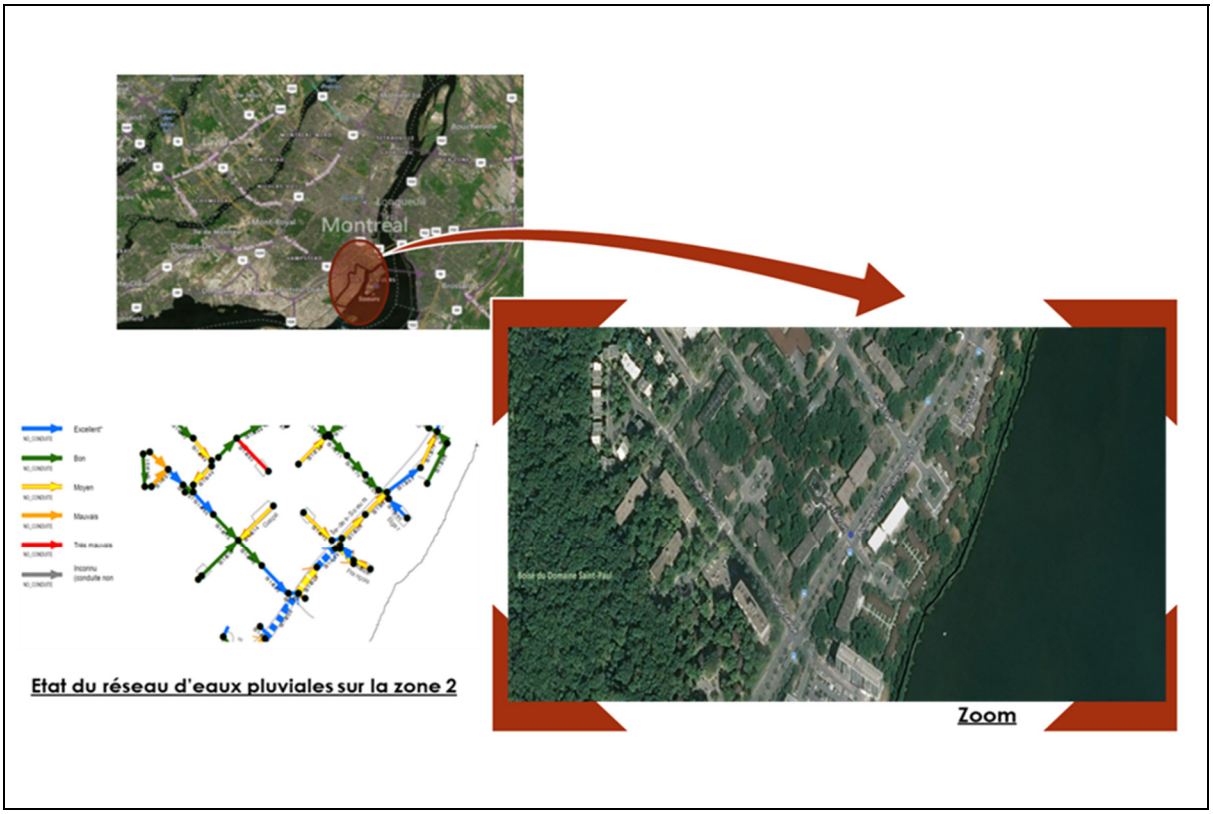


Figure 6.6 Emplacement du réseau d'égout pluvial de la zone 2

Tableau 6.10 Données d'état du réseau d'égout de la zone 2 selon la méthode du MAMH

Données physiques						**Indicateurs et cotes d'état selon la méthode du MAMH**				
Arrondis.	Conduite	Mat.	Date instal.	Type réseau	Année insp	EPL-1	EPL-3	EPL-4	Statut	Classe inter-vention
Verdun	5314188	B.A.	1969	Pluvial	2012	1	1	1	Excellent	A
Verdun	5314526	B.A.	1969	Pluvial	2012	1	3	1	Moyen	A
Verdun	5314504	B.A.	1969	Pluvial	2012	1	3	1	Moyen	A
Verdun	5314510	B.A.	1969	Pluvial	2012	3	2	1	Moyen	A
Verdun	5313987	B.A.	1969	Pluvial	2013	1	3	1	Moyen	A
Verdun	5314508	B.A.	1969	Pluvial	2013	1	3	1	Moyen	A
Verdun	5314169	B.A.	1968	Pluvial	2013	2	1	1	Bon	A
Verdun	5314170	B.A.	1968	Pluvial	2013	1	2	1	Bon	A
Verdun	5314171	B.A.	1968	Pluvial	2012	2	1	1	Bon	A

6.3.2 Présentation et analyse des résultats issus de l'application de l'approche proposée, soit la méthode combinée WRc/MAMH

Les résultats de validation de notre approche sont présentés ci-dessous dans les Tableaux 6.11 et 6.12. La cote structurale EPL1 ainsi que les cotes hydrauliques EPL3 et EPL4 sont utilisées pour calculer la cote combinée en tenant compte du niveau de la nappe et du type de sol. La cote hydraulique la plus sévère est considérée dans notre application.

Pour décider de la classe d'intervention, la hiérarchisation de la conduite est utilisée et appliquée selon l'arbre décisionnel (Figure 4.4) proposé par notre étude. Les résultats observés sont décrits dans les paragraphes suivants.

Réseau d'égout pluvial de la zone 1

Le résultat de l'application à la zone 1 est présenté dans le Tableau 6.11. Le type de sol est sableux limoneux avec la présence d'une nappe avec un niveau bas. La cote structurale des

tronçons choisis varie de 1 à 4 avec une majorité ayant une cote EPL1 = 3. L'état fonctionnel des tronçons est globalement excellent sauf pour un seul, où la cote hydraulique est de 3.

Tableau 6.11 Résultats obtenus pour le réseau d'égout de la zone 1 selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH

Données physiques				**Évaluation selon méthode combinée WRc/MAMH**					
Arrondis.	Conduite	Type de Sol	Niveau nappe	Cote Str. EPL-1	Cote hyd max (EP-2, EP-3, EP-4)	Cote combi-née	Statut	Hiérarchie	Classe inter-vention
Villeray	5275304	Sable-limon	Bas	1	1	1	Excellent	I	A
Villeray	5275305	Sable-limon	Bas	3	1	3	Moyen	I	C
Villeray	5275327	Sable-limon	Bas	4	1	4	Mauvais	I	C
Villeray	5275300	Sable-limon	Bas	1	1	1	Excellent	III	A
Villeray	5275314	Sable-limon	Bas	3	1	3	Moyen	III	B
Villeray	5271513	Sable-limon	Bas	3	1	3	Moyen	I	C
Villeray	5271515	Sable-limon	Bas	3	1	3	Moyen	I	C
Villeray	5363516	Sable-limon	Bas	3	1	3	Moyen	I	C
Villeray	5271521	Sable-limon	Bas	3	3	4	Mauvais	I	C

Relativement à ces conduites, le milieu de pose est considéré à risque géotechnique important, qui peut favoriser l'entrainement de particules fines et l'apparition des vides aux alentours de la périphérie des conduites dépendamment de la position de la nappe. Avec les résultats obtenus au Tableau 6.11, nous pouvons confirmer l'applicabilité de l'approche proposée dans cette thèse pour l'évaluation des conduites d'égout. En présence de sable et limon, la cote structurale est affectée par la cote hydraulique. La conduite peut passer d'un statut moyen à mauvais en cas d'une déficience hydraulique de cote 3 comme dans le cas du tronçon 5271521. Les autres tronçons gardent le même statut assigné à la cote structurale avant le calcul de la cote combinée. Notons que dans ce cas d'étude la classe d'intervention est majoritairement de classe C « attention souhaitable ». Les tronçons dont la classe d'intervention a été suggérée souhaitable indiquant une priorité de réhabilitation moyenne à élevée ont généralement une cote d'impact I avec un état moyen a mauvais. Ce qui signifie que le risque de défaillance de ces tronçons est élevé. Pour 77% des tronçons considérés, les

classes d'intervention EPL sont plus sévères que celles du PI de la Ville de Montréal. Dans ce cas d'application, l'état structural est mauvais et le défaut structural risque de s'aggraver sous l'effet de différents facteurs (type du sol et niveau de la nappe). Même si la conduite a écoulé un tiers de son cycle de vie, les facteurs environnants accélèrent son vieillissement et augmentent sa probabilité de défaillance.

Réseau d'égout pluvial de la zone 2

Le résultat de l'application pour la zone 2 est présenté dans le Tableau 6.12. Les conduites considérées sont placées dans un sol qui présente un risque géotechnique moyen avec une nappe haute. La cote structurale des tronçons choisis varie de 1 à 3 avec une majorité de tronçons avec la cote EPL1 = 1. La cote hydraulique varie de 1 à 3.

Tableau 6.12 Résultats obtenus pour le réseau d'égout de la zone 2 selon la combinaison des méthodologies du WRc et du MAMH

Données physiques				**Évaluation selon méthode combinée WRc/MAMH**					
Arrondis.	Conduite	Type de Sol	Niveau nappe	Cote Str. EPL-1	Cote hyd max (EP-2, EP-3, EP-4)	Cote combi-née	Statut	Hiérarchie	Classe inter-vention
Verdun	5314188	Argile ou gravier fin	haut	1	1	1	Excellent	I	A
Verdun	5314526	Argile ou gravier fin	haut	1	3	1	Moyen	I	A
Verdun	5314504	Argile ou gravier fin	haut	1	3	1	Moyen	II	A
Verdun	5314510	Argile ou gravier fin	haut	3	2	3	Moyen	III	B
Verdun	5313987	Argile ou gravier fin	haut	1	3	1	Moyen	II	A
Verdun	5314508	Argile ou gravier fin	haut	1	3	1	Moyen	II	A
Verdun	5314169	Argile ou gravier fin	haut	2	1	2	Bon	III	A
Verdun	5314170	Argile ou gravier fin	haut	1	2	1	Bon	III	A
Verdun	5314171	Argile ou gravier fin	haut	2	1	2	Bon	III	A

Les résultats de la cote combinée présentés dans le Tableau 6.12 montrent que pour un type de sol constitué d'argile ou de gravier fin, la cote structurale est peu affectée par l'état fonctionnel en présence de nappe haute.

6.4 Conclusions partielles

En définitive, la prise de décisions pour le renouvellement ou la réhabilitation des conduites d'égout est complexe en raison de la difficulté liée à la connaissance de l'état réel des canalisations et de l'impact des facteurs environnant sur la conduite. Ainsi, selon l'approche préconisée dans ce rapport, les réseaux d'égout pluvial dont les performances hydrauliques sont excellentes ou bonnes (EPL hyd = 1 ou 2), en présence d'un sol composé de sable ou limon et lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas, la cote de l'indicateur structural EPL1 n'est pas impactée par la détérioration des performances hydrauliques reliées aux mises en charge. En revanche, les performances structurales sont clairement impactées lorsque l'égout pluvial est dans un état hydraulique très mauvais (EPL hyd = 4 ou 5), en présence d'un sol composé de sable ou limon et lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas. Dans une telle situation, le niveau de la détérioration structurale passe d'un niveau moyen à un niveau élevé et les travaux de réhabilitation structurale passent d'une priorité moyenne à immédiate. Abstraction faite de la performance hydraulique, une nappe phréatique haute accélère la détérioration structurale des conduites d'égout qui sont détériorées à la base (WRc, 2001). L'impact des performances hydrauliques sur le niveau de détérioration structurale augmente avec le risque géotechnique : plus la conduite est placée dans un sol présentant des risques géotechniques élevés (sable, limon) plus l'effet des risques associés aux performances hydrauliques accélèrent la détérioration structurale (WRc, 2001).

Ces observations nous mènent vers une première réflexion qui remet en cause l'approche globale souvent adoptée pour planifier les travaux d'intervention. Un arbre décisionnel qui se base sur un seul indicateur est incohérent car la présence d'au moins un indicateur structural et un indicateur hydraulique est requise. En conséquence, dans la méthode du MAMH par exemple, il serait plus judicieux de modifier l'importance de l'indicateur EPL-4 d'un niveau

complémentaire à un niveau requis. La deuxième réflexion est centrée sur la notion de durée de vie utile de l'actif, qu'il est plus judicieux de mesurer en tenant compte de l'état de l'actif et des facteurs environnants.

Les résultats de l'application de la nouvelle approche proposée à un secteur du réseau d'égouts de la ville de Montréal semblent démontrer des interventions plus proactives qui anticipent une aggravation des défauts structuraux. On remarque aussi que l'impact de la concomitance des défaillances hydrauliques et structurales est plus important en présence de sols à risque géotechnique élevé (sable, limon) et en présence de nappe phréatique élevée. La durée de vie du réseau d'égout est donc étroitement liée à l'état de l'actif et aux facteurs environnants.

Finalement, il est recommandé, à la suite de nos analyses, de considérer l'indicateur EPL-4 comme un indicateur requis et non pas complémentaire, afin de mieux caractériser l'état des conduites et dans le but d'avoir une décision d'intervention plus pertinente. En second lieu, il est suggéré que tous les indicateurs hydrauliques disponibles soient utilisés pour déterminer la performance hydraulique d'une conduite basée sur la pire cote de EPL-2, EPL-3 et EPL-4. Une autre alternative consiste à pondérer les trois indicateurs hydrauliques selon leur degré de pertinence ou d'importance relative, pour obtenir une cote hydraulique représentative.

CHAPITRE 7

GESTION INTÉGRÉE DES RÉSEAUX D'EAU ET DE VOIRIE

Ce chapitre présente les résultats obtenus à la suite des études effectuées dans le cadre de la démarche d'optimisation de la gestion coordonnée ou intégrée des interventions sur les conduites d'eau potable, d'égouts et les chaussées. Un bref rappel de la problématique et des objectifs ciblés y est aussi effectué. La méthodologie de recherche adoptée est celle décrite à la section 4.3.

7.1 Rappel de la problématique et des objectifs de recherche liés à la gestion intégrée des réseaux d'eau et de voirie

Les nombreuses lacunes associées à la gestion en silos des infrastructures d'eau et de voirie en termes de coûts de travaux et sociaux élevés, grande fréquence des interruptions de services et des perturbations sociales dues aux travaux, taux de renouvellement faibles, dommages accidentels ou non causés aux autres infrastructures se trouvant dans la zone de travaux, gestion peu efficace des infrastructures, perte de confiance des citoyens envers les gouvernants, usure et vieillissement prématuré, font en sorte que ces pratiques ne sont plus viables et doivent être repensées. La tendance actuelle est à la gestion intégrée des infrastructures, et plus précisément à la coordination des interventions sur l'aqueduc, l'égout et la chaussée. Cependant, la gestion intégrée des infrastructures est encore récente et les règles qui l'encadrent restent à consolider et à optimiser, afin de les rendre performantes, efficaces et moins subjectives.

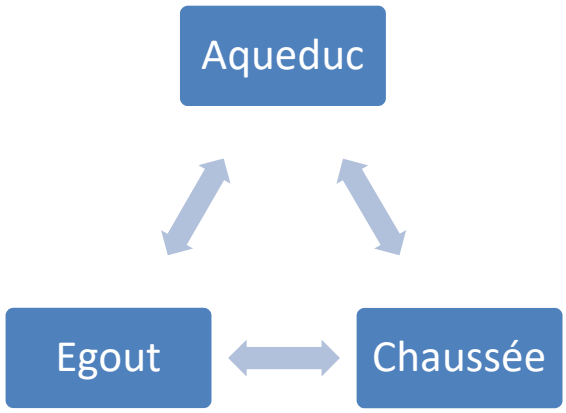
L'objectif ciblé dans ce volet de recherche est de proposer un meilleur encadrement des règles de coordination des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts, et de voirie, à travers des critères objectifs, clairs et précis, permettant de mieux encadrer la gestion intégrée de ces réseaux. Le cadre proposé pour la gestion intégrée de ces trois actifs doit particulièrement aider les gestionnaires de ces actifs dans la prise de deux types de décisions à savoir : (1) Quand est-il opportun de coordonner les interventions sur un tronçon donné, au

vu de l'état de chacun de ses différents actifs ? (2) Quelles interventions seraient les plus appropriées sur chacun des actifs en termes d'efficacité et de rentabilité à long terme ?

7.2 Présentation du plan directeur de la gestion intégrée des infrastructures

7.2.1 Évaluation des interactions dues à la proximité entre les différents actifs

Les interactions entre les différents actifs d'une même tranchée sont multiples. À titre d'exemple, les défaillances du réseau d'eau potable et en l'occurrence les fuites souterraines peuvent provoquer non seulement une surcharge du réseau d'égout à proximité, mais également peuvent occasionner une érosion du sol entourant la conduite d'eau potable. À long terme, le vide qui se créera autour des conduites d'eau potable, voire de l'égout proche, est susceptible de provoquer, sous l'effet du trafic, des déformations importantes, des ornières, des affaissements de la chaussée ainsi que des déformations importantes de l'égout, voire son effondrement. De même, un effondrement de l'égout, peu importe la cause, provoque l'effondrement des infrastructures au-dessus, en l'occurrence la chaussée et le réseau d'eau potable, et donc un arrêt complet du service sur les trois actifs. La figure 7.1 résume l'intensité de l'impact des interactions entre les différents actifs d'une même tranchée.



Interactions entre actifs	Impact
Aqueduc sur Égout	Fort
Égout sur Aqueduc	Fort
Aqueduc sur Chaussée	Fort
Chaussée sur Aqueduc	Moyen
Égout sur Chaussée	Fort
Chaussée sur Égout	Faible

Figure 7.1 Intensité des interactions entre les réseaux d'eau potable, d'égout et de chaussée

7.2.2 Prise en compte des meilleures pratiques d'intégration des actifs et identification des interventions requises

Pour notre étude, les actifs sont regroupés en 3 catégories et couleurs distinctes selon leur état : bon ou excellent (catégorie 1, couleur verte), passable ou moyen (catégorie 2, couleur jaune), mauvais ou très mauvais (catégorie 3, couleur rouge), menant à 27 combinaisons d'état possibles, pour les trois actifs distincts de la tranchée.

Tableau 7.1 Catégories d'états possibles pour chacun des trois actifs de la tranchée

AQ - Satisfaisant (Excellent ou Bon)	EG – Satisfaisant	CH – Satisfaisant
AQ – Moyen (passable)	EG – Moyen	CH – Moyen
AQ – Critique (Mauvais ou Très mauvais)	EG – Critique	CH – Critique

Selon les meilleures pratiques (CERIU, 2015; CNRC & FCM, 2003; IPWEA & asia, 2015), les opportunités de coordination efficace sont élevées dès que minimalement deux actifs de la même tranchée sont critiques. Elles sont probables lorsque minimalement un actif se trouvant dans un état critique requiert une intervention et un autre se trouve dans un état moyen. Dans les autres cas, la coordination des interventions est généralement inefficace et déconseillée (MAMROT & CERIU, 2013). En effet, le risque d'intervenir trop tôt sur un actif encore en bon état ou trop tard sur un actif requérant une intervention urgente est significatif. Finalement, la réhabilitation sans tranchée est l'option à privilégier autant que possible, pour des interventions sur un seul actif, alors que la reconstruction complète peut s'avérer plus rentable si au moins deux actifs sont critiques.

L'application de ces règles de coordination combinées aux recommandations d'Infraguide (NRC-CNRC et al., 2003) et à l'expérience des municipalités permet de suggérer des interventions efficaces pour chacun des actifs, et ceci pour les 27 combinaisons d'états possibles, précédemment discutées. On entend par intervention efficace, une intervention permettant de faire passer un actif initialement dans un état critique, à un état moyen ou satisfaisant. Les tableaux 7.2 et 7.3 résument les interventions proposées par tronçon, en adéquation avec l'état de chacune des infrastructures du tronçon, et selon les codes de

couleurs déjà énoncés. La rentabilité des interventions (préconisées versus alternatives) par tronçon sera évaluée et comparée dans une étape ultérieure.

Tableau 7.2 Combinaisons d'états entre les trois actifs d'une tranchée avec les interventions applicables selon les meilleures pratiques

État des actifs	**Interventions préconisées**	**Opportunités de coordination**	**Interventions alternatives**
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-Rh	Non	N-N-Rc*
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-Rh	probable	N-Rh-Rh / N-Rh-Rc*
AQ-EG-CH	N-Rh-N	Non	Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	N-Rh-N	probable	N-Rh-Rh / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	N-Rh-Rh	**Oui**	Rc-Rc-Rc / N-Rh-Rc*
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-Rh	probable	Rh-N-Rh / Rc-N-Rc*
AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
AQ-EG-CH	N-N-N	probable	Rh-Rh-Rh / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	N-N-Rh	probable	Rh-Rh-Rh / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	N-Rh-N	probable	Rh-Rh-N / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	N-Rh-N	probable	Rh-Rh-Rh / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc	**Oui**	Rh-Rh-Rh / N-Rh-Rh
AQ-EG-CH	Rh-N-N	Non	
AQ-EG-CH	Rh-N-N	probable	Rh-N-Rh
AQ-EG-CH	Rh-N-Rh	**Oui**	Rc-N-Rh / Rc-N-Rc
AQ-EG-CH	Rh-N-N	probable	Rh-Rh-N / Rc-Rh-Rh / Rc-Rc-Rc
AQ-EG-CH	Rh-Rh-Rh	probable	Rh-N-N / Rc-Rc-Rc

Tableau 7.3 Combinaisons d'états entre les trois actifs d'une tranchée avec les interventions applicables selon les meilleures pratiques (suite)

AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc	**Oui**	Rh-Rh-Rh / Rc-Rh-Rh
AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc	**Oui**	Rh-Rh-N
AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc	**Oui**	Rh-Rh-Rh
AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc	**Oui**	Rh-Rh-Rh

N : Aucune intervention

Rh : Réhabilitation structurale

Rc : Reconstruction

Rc* : Reconstruction à risque pour les autres actifs (non reconstruits)

: État excellent ou bon

: État moyen ou passable

: État mauvais ou très mauvais

La première ligne adresse le cas d'un tronçon où les trois actifs sont dans un état satisfaisant. Ainsi, la première colonne de cette ligne indique que la conduite d'eau potable, l'égout ainsi que la chaussée sont tous en excellent ou bon état, d'où la couleur verte des trois actifs. La seconde et la troisième colonne de cette ligne mentionnent respectivement qu'aucune intervention n'est requise sur aucun des 3 actifs, et qu'aucune opportunité de coordination de travaux n'est à envisager dans un tel cas. La troisième ligne adresse le cas d'un tronçon où deux actifs sont dans un état satisfaisant, et le troisième est dans un état critique. Ainsi, la première colonne de cette ligne indique que les conduites d'eau potable et d'égout sont dans un état satisfaisant alors que la chaussée est en mauvais ou très mauvais état. La seconde colonne de cette ligne mentionne que l'intervention à privilégier serait une réhabilitation de la chaussée uniquement alors que la troisième colonne indique qu'aucune opportunité de coordination de travaux n'est offerte. La quatrième colonne propose comme intervention alternative une reconstruction exclusive de la chaussée. En effet, une réhabilitation serait moins couteuse qu'une reconstruction complète de la chaussée car cette dernière intervention touche des couches plus profondes, nécessite des engins plus lourds, des délais de travaux plus longs et est plus à risque de créer des dommages accidentels aux réseaux enterrés

(conduites d'eau et d'égouts). Ainsi, si elle est applicable et efficace, une réhabilitation majeure ou mineure de la chaussée serait dans le cas présent préférable à une reconstruction. Cette dernière pourrait toutefois s'avérer la seule option efficace compte tenu de l'état de dégradation avancée de la chaussée et des types de défauts observés. Par ailleurs, une reconstruction de la chaussée est généralement plus rentable en termes de coût lorsqu'elle est synchronisée avec la reconstruction des conduites d'eau potable et/ou d'égouts. La sixième ligne adresse le cas d'un tronçon où la conduite d'eau est dans un état satisfaisant, l'égout se trouve dans un état passable et la chaussée est dans un état critique. L'intervention préconisée à la deuxième colonne de cette ligne est une réhabilitation de la chaussée uniquement. La troisième colonne indique qu'une opportunité de coordination efficace est probable. En effet, l'état passable de la conduite d'égout permet d'anticiper sa dégradation à moyen terme, et donc une autre intervention sur ce tronçon (en l'occurrence l'égout) après une première intervention sur la chaussée. De plus les interactions entre les différents actifs font craindre un risque de détérioration prématurée de la nouvelle chaussée si l'égout en dessous n'est pas en bonne ou excellente condition. Ces raisons génèrent une opportunité de coordination potentiellement intéressante et qualifiée de probable, entre les travaux de renouvellement de chaussée et le devancement de la réhabilitation de l'égout. Il en résulte à la colonne 4 des propositions d'interventions alternatives telles que la réhabilitation synchronisée de l'égout et de la chaussée, ou encore la réhabilitation de l'égout combinée à une reconstruction de la chaussée. Évidemment, une réhabilitation de la chaussée serait dans la mesure du possible, préférable à une reconstruction de cette dernière. L'avant-dernière et la dernière ligne du tableau 7.3 adressent les cas de tronçons où respectivement deux et trois actifs sont critiques à la fois. Des opportunités de coordination (des travaux sur les différents actifs) s'imposent, d'où l'information oui indiquée à la troisième colonne de ces lignes. L'intervention préconisée pour ces deux cas de tronçons est la reconstruction complète des trois actifs. Toutefois, la réhabilitation complète des 3 actifs est proposée comme intervention alternative, et sa comparaison avec l'intervention préconisée sera discutée dans l'étude de rentabilité.

On peut remarquer que sur les vingt-sept (27) combinaisons d'états possibles, seulement sept (7) présentent une opportunité certaine de coordination, dix (10) présentent une opportunité potentielle et dix (10) ne présentent aucune opportunité. En rapport avec les alternatives d'intervention, une étude de rentabilité qui tient compte du coût de l'intervention et de la durée de vie additionnelle générée par cette dernière permettra de déterminer, au paragraphe suivant, si les interventions préconisées à la colonne 2 des tableaux 7.2 et 7.3 sont bien les plus rentables.

7.2.3 Évaluation des coûts des différentes interventions

L'étape actuelle de notre démarche analytique consiste à établir les coûts et durées de vie des principales interventions d'entretien ou de renouvellement effectuées sur le cycle de vie des infrastructures. Ceci permettra, à l'étape suivante, de comparer la rentabilité des différentes interventions suggérées aux tableaux 7.2 et 7.3 afin de confirmer le caractère optimal de celles préconisées. À cet effet, différentes données ont été recueillies auprès des municipalités de l'Agglomération de Montréal et ont permis d'établir les informations figurant au tableau 7.4. Les coûts et la durée de vie sont des données moyennes collectées relativement aux projets d'infrastructures et interventions réalisés entre 2019 et 2020 à Montréal, Dorval, Pointe-Claire, Montréal-Est, Kirkland, Côte-Saint-Luc, Montréal-Ouest et Senneville. La durée de vie est le nombre moyen d'années séparant la date d'installation d'une infrastructure et le moment où elle passe à un état critique jugé inadéquat pour une utilisation régulière. Il est toutefois constaté que plusieurs municipalités questionnées, utilisent les valeurs suggérées par le MAMH (2013). Le coût effectif est calculé en faisant le rapport du coût global de l'intervention par sa durée de vie utile projetée. Il permet d'apprécier la rentabilité à long-terme d'une intervention par rapport à une autre. La coordination de certaines interventions occasionne des économies de masse qui sont indiquées dans la dernière colonne du tableau 7.4, pour chacun des actifs intégrés dans la même intervention globale de renouvellement du tronçon. Les données reliées à l'impact de la coordination ont été déduites en comparant plusieurs interventions semblables réalisées en silos d'une part, puis de façon intégrée d'autre part.

Tableau 7.4 Caractéristiques des différentes interventions possibles sur chacun des actifs en termes de coût et durée de vie

Actif	Intervention	Coût unitaire	Durée de vie utile	Coût effectif ($/an)	Impact de la coordination (en $) sur les actifs
Conduite d'eau de 300 mm de diamètre	Reconstruction	1500 $/m	75 ans	20 $/m/an	-20% EG ou CH
	Réhabilitation	950 $/m	50 ans	19 $/m/an	
	Entretien préventif	5 $/m	-	5 $/m/an	
	Entretien curatif	30 $/m	-	30 $/m/an	
Conduite d'égout de dimensions 600 mm par 900 mm	Reconstruction	2000 $/m	100 ans	20 $/m/an	-10 % AQ, -20% CH
	Réhabilitation	700 $/m	50 ans	14 $/m/an	
	Entretien préventif	5 $/m	-	5 $/m/an	
	Entretien curatif	40 $/m	-	40 $/m/an	
Chaussée de 4 voies	Reconstruction	1300 $/m	25 ans	52 $/m/an	-10 % AQ ou EG
	Réhabilitation	900 $/m	15 ans	60 $/m/an	
	Entretien préventif	50 $/m	-	50 $/m/an	
	Entretien curatif	250 $/m	2 ans	125 $/m/an	

7.2.4 Analyse comparative des interventions par la méthode coût-bénéfice

L 'analyse coût-bénéfice (ACB) ou analyse coût-avantage (ACA) est une méthode d'analyse économique qui consiste à comparer l'ensemble des coûts et avantages d'un projet donné à un autre (Boardman, 1996; UNFPA, 2004). À travers cette analyse, il sera possible de déterminer si les interventions préconisées à la deuxième colonne des tableaux 7.2 et 7.3 sont effectivement les plus rentables, comparativement aux interventions alternatives proposées. Les paramètres utilisés dans les calculs de rentabilité sont ceux établis au tableau 7.4. On fait l'hypothèse qu'une intervention est efficace lorsqu'elle améliore l'état des actifs et prolonge la durée de vie utile de ces derniers. L'intervention optimale est celle qui offre le meilleur résultat en termes d'efficacité et de rentabilité économique. Elle est donc celle qui possède le cout effectif le plus bas pour un même niveau d'efficacité. Notons que l'état des actifs d'eau

et leur besoin d'intervention sont déterminés par les règles préconisées aux chapitres 5 et 6 respectivement pour les conduites d'eau potable et celles d'égouts. Quant aux chaussées, la caractérisation de leur état est basée sur les critères du MAMH. L'analyse économique nécessite toutefois la prise en compte de la valeur résiduelle des différents actifs en place au moment de l'intervention. Cette valeur résiduelle est évaluée par rapport au cycle de vie de chacun des actifs. On assume qu'un actif en excellent ou bon état vaut 60 % de sa valeur de remplacement à neuf (VR), qu'un actif se trouvant dans un état moyen vaut 30 % de sa VR et qu'un actif se trouvant dans un état critique vaut 0 % de sa VR. Les formules utilisées pour évaluer la performance des interventions par tronçon et par actif sont une adaptation simplifiée des outils du guide de gestion des actifs en immobilisations à l'intention des élus municipaux (CERIU, 2015) dans le contexte de l'ACA. Elles sont énumérées dans les lignes d'équations suivantes.

$$\text{DVA générée par l'intervention} = \frac{\text{DVA aq} + \text{DVA eg} + \text{DVA ch}}{\text{n}} \tag{7.1}$$

$$\text{DVR perdue par l'intervention} = \frac{\text{DVR aq} + \text{DVR eg} + \text{DVR ch}}{\text{n}} \tag{7.2}$$

$$\text{DVE} = \text{DVA} - \text{DVE} \tag{7.3}$$

$$\text{Coût d'intervention} = \frac{\text{Coût aq} + \text{Coût eg} + \text{Coût ch}}{\text{n}} \tag{7.4}$$

$$\text{Coût effectif} = \frac{\text{Coût d'intervention}}{\text{DVE}} \tag{7.5}$$

Description des paramètres utilisées dans les équations :

DVA : durée de vie additionnelle moyenne générée par l'intervention

DVR : durée de vie résiduelle moyenne perdue en devançant l'intervention

DVE : durée de vie effective

n : nombre d'actifs ciblés par l'intervention de renouvellement, soit 1, 2 ou 3

aq : aqueduc
Eg : égout
Ch : chaussée

Les résultats issus de l'évaluation de rentabilité des interventions préconisées par tronçon sont résumés aux tableaux 7.5 et 7.6.

Tableau 7.5 Combinaisons d'états possibles entre les trois actifs de la tranchée, avec les interventions applicables et leur rentabilité respective

No	État des actifs	Intervention préconisée avec coût effectif ($/an)	Opportunité de coordination	Interventions alternatives avec coûts effectifs associés ($/m/an)
1	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
2	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
3	AQ-EG-CH	N-N-Rh (60$/m/an)	Non	N-N-Rc* (52$/m/an)
4	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
5	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
6	AQ-EG-CH	N-N-Rh (60$/m/an)	Probable	N-Rh-Rh (50$/m/an) N-Rh-Rc* (44$/m/an)
7	AQ-EG-CH	N-Rh-N (14$/m/an)	Non	Rc-Rc-Rc (32$/m/an)
8	AQ-EG-CH	N-Rh-N (14$/m/an)	Probable	N-Rh-Rh (29$/m/an) Rc-Rc-Rc (28$/m/an)
9	AQ-EG-CH	N-Rh-Rh (25$/m/an)	Oui	Rc-Rc-Rc (26$/m/an) N-Rh-Rc*(27$/m/an)
10	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
11	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	
12	AQ-EG-CH	N-N-Rh (60$/m/an)	Probable	Rh-N-Rh (44$/m/an) Rc-N-Rc* (31$/m/an)
13	AQ-EG-CH	N-N-N	Non	

Tableau 7.6 Combinaisons d'états possibles entre les trois actifs de la tranchée, avec les interventions applicables et leur rentabilité respective (suite)

14	AQ-EG-CH	N-N-N (0$/m/an)	Probable	Rh-Rh-Rh (46$/m/an) Rc-Rc-Rc (29$/m/an)
15	AQ-EG-CH	N-N-Rh (60$/m/an)	Probable	Rh-Rh-Rh (41$/m/an) Rc-Rc-Rc (28$/m/an)
16	AQ-EG-CH	N-Rh-N (14$/m/an)	Probable	Rh-Rh-N (21$/m/an) Rc-Rc-Rc (31$/m/an)
17	AQ-EG-CH	N-Rh-N (14$/m/an)	Probable	Rh-Rh-Rh (30$/m/an) Rc-Rc-Rc (29$/m/an)
18	AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc (23$/m/an)	Oui	Rh-Rh-Rh (28$/m/an) N-Rh-Rh (25$/m/an)
19	AQ-EG-CH	Rh-N-N (19$/m/an)	Non	
20	AQ-EG-CH	Rh-N-N (19$/m/an)	Probable	Rh-N-Rh (32$/m/an)
21	AQ-EG-CH	Rh-N-Rh (28$/m/an)	Oui	Rc-Rc-Rc (34$/m/an) Rc-N-Rc* (26$/m/an)
22	AQ-EG-CH	Rh-N-N (19$/m/an)	Probable	Rh-Rh-N (24$/m/an) Rc-Rc-Rc (26$/m/an)
23	AQ-EG-CH	Rh-N-N (19$/m/an)	Probable	Rh-Rh-Rh (33$/m/an) Rc-Rc-Rc (24$/m/an)
24	AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc (23$/m/an)	Oui	Rh-Rh-Rh (30$/m/an) Rh-N-Rh (28$/m/an)
25	AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc (21$/m/an)	Oui	Rh-Rh-N (17$/m/an)
26	AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc (21$/m/an)	Oui	Rh-Rh-Rh (24$/m/an) Rh-Rh-N (17$/m/an)
27	AQ-EG-CH	Rc-Rc-Rc (20$/m/an)	Oui	Rh-Rh-Rh (22$/m/an)

La ligne No 1 du tableau 7.5 montre un tronçon pour lequel chacun des trois actifs se trouve soit en bon état, soit en excellent état. Ce tronçon ne requiert donc aucune intervention (d'où l'inscription N-N-N à la deuxième colonne de cette ligne). Par conséquent, aucune opportunité de coordination n'est envisageable à l'état présent (d'où l'inscription non à la troisième colonne de cette ligne).

La ligne No 2 du tableau 7.5 présente également un tronçon où aucun actif n'est critique. En effet, deux actifs se trouvent en bon ou excellent état alors que le troisième se trouve dans un état passable. Toutefois, ce tronçon ne requiert aucune intervention à l'état présent, et aucune opportunité de coordination n'y est non plus envisageable.

La ligne No 3 du tableau 7.5 indique un tronçon où seule la chaussée est critique, alors que les deux autres actifs se trouvent en bon ou excellent état. L'intervention préconisée est une réhabilitation structurale de la chaussée à un coût effectif revenant à 60$/m/an. En effet, une réhabilitation structurale de la chaussée permettrait de restaurer le bon état de la chaussée et de prolonger sa vie utile pour une quinzaine d'années de plus à un coût moyen de 900$/m pour une chaussée d'environ 4 voies. Cette option a été priorisée ici à une reconstruction complète de la chaussée, qui mettrait davantage à risque les réseaux d'eau et d'égouts enterrés sous la chaussée. En effet, la reconstruction complète de la chaussée nécessite une profondeur de fouille et de terrassement plus grande, ainsi que des engins plus lourds opérant à proximité des conduites. Ceci accroit les charges, les vibrations et sollicitations de façon globale sur les réseaux enterrés et par conséquent les risques de défaillances prématurées ou accidentelles des conduites qui étaient initialement en bon ou excellent état. Toutefois, la reconstruction complète de cette chaussée parait plus rentable en se basant sur son coût effectif qui revient à 52 $/m/an du fait de sa durée de vie plus longue, soit 25 ans. Puisque l'option la moins chère présente des risques de fragilisation pour certains actifs du tronçon, notamment ceux qui ne subiront pas de reconstruction, la meilleure option est celle la moins chère qui ne présente aucun risque de fragilisation pour aucun des actifs du tronçon.

La ligne No 6 du tableau 7.5 présente un tronçon où seule la chaussée est critique, alors que l'égout est dans un état passable et la conduite d'eau potable se trouvent en bon ou excellent état. L'intervention préconisée est une réhabilitation structurale de la chaussée à un coût effectif revenant à 60$/m/an. Toutefois, l'option de réhabiliter simultanément l'égout et la chaussée serait très bénéfique. Ceci, d'une part, compte tenu de l'impact significatif qu'un égout en mauvaise condition pourrait avoir sur une dégradation prématurée de la chaussée au-dessus, et d'autre part compte tenu du coût final des deux interventions combinées, soit

50$/m/an par actif renouvelé. Une réhabilitation de l'égout, combinée à une reconstruction de la chaussée serait davantage rentable (44$/m/an), mais très à risque pour les conduites enterrées. Il y a donc une opportunité de coordination potentiellement intéressante dans le cas de ce tronçon (d'où l'inscription probable à la troisième colonne de cette ligne). Cette opportunité de coordination probable est observée pour 9 autres lignes du tableau (lignes No 8, 12, 14-17, 20, 22 et 23), notamment des tronçons ayant un actif critique et un autre se trouvant dans un état passable**. Dans ces cas, la coordination peut s'avérer une option intéressante, mais qui mérite d'être toujours analysée au cas par cas.**

Les prochaines analyses porteront sur les lignes indiquant des opportunités de coordination certaines, soient les lignes No 9, 21, 25, ainsi que 18, 24, 25, 26 et 27, afin d'identifier les tendances qui se dégagent en termes d'interventions optimales, relativement à ces cas particulièrement intéressants.

La ligne No 9 où la conduite d'eau est en bon ou excellent état alors que la chaussée et l'égout sont critiques, affiche la meilleure performance pour une intervention composée de réhabilitations simultanées sur les deux actifs critiques. La ligne No 21 montre un cas semblable au précédent, où deux actifs sont critiques et le troisième se trouve en bon ou excellent état. L'option la plus rentable est composée d'une reconstruction simultanée des deux actifs critiques. Cependant elle est très à risque pour l'actif d'égout qui ne nécessite aucune intervention. En conséquence, l'intervention finalement préconisée demeure une combinaison de réhabilitations sur les deux actifs critiques. La ligne No 25 montre un cas semblable aux deux précédents, où deux actifs sont critiques et le troisième se trouve en bon ou excellent état. La réhabilitation des deux actifs critiques, soient les conduites d'eau et d'égouts, est l'intervention la plus rentable.

On déduit à partir de l'analyse des lignes No 9, 21 et 25, basée sur les coûts effectifs et la priorisation de l'option la moins chère ne présentant aucun risque de fragilisation pour aucun actif du tronçon, qu'une combinaison de réhabilitations simultanées semble être

la meilleure option pour les tronçons affichant deux actifs critiques et un troisième en bon ou excellent état.

La ligne No 18 montre un tronçon où deux actifs (la chaussée et l'égout) sont critiques alors que la conduite d'eau est dans un état passable. L'intervention la plus rentable est la reconstruction des trois actifs.

La ligne No 24 montre un cas semblable au précédent, soit un tronçon où deux actifs (la chaussée et la conduite d'eau) sont critiques alors que l'égout est dans un état passable. L'intervention la plus rentable y est également la reconstruction des trois actifs.

La ligne No 26 montre un cas semblable aux deux précédents, soit un tronçon où deux actifs (l'égout et la conduite d'eau) sont critiques alors que la chaussée est dans un état passable. L'intervention la plus rentable est la réhabilitation exclusive des conduites d'eau potable et d'égouts. Toutefois, l'impact significatif qu'une chaussée en mauvais état pourrait avoir sur les conduites enterrées, combinée au fait que la chaussée en état passable se retrouvera à moyen terme dans un état critique, amène à reconsidérer la décision. De plus, le fait qu'une intervention sur les réseaux enterrées d'une rue sans renouveler la chaussée qui n'est plus dans un état satisfaisant et qui demeure la partie visible des infrastructures de la rue, pourrait mal passer en termes d'acceptabilité sociale. En conséquence, la reconstruction des trois actifs demeure la meilleure option pour ce tronçon.

On déduit, à partir de l'analyse des lignes No 18, 24 et 26 qu'une reconstruction complète des trois actifs est la meilleure option pour les tronçons affichant deux actifs critiques et un troisième qui se trouve dans un état passable. La meilleure option est la combinaison d'interventions associée aux coûts effectifs les plus bas ne présentant aucun risque de fragilisation pour aucun actif du tronçon.

Pour le tronçon No 27, composé de trois actifs tous critiques, la reconstruction complète et simultanée des trois actifs est évidemment l'option la plus intéressante en termes de

rentabilité, versus une réhabilitation des trois actifs. **Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle la reconstruction complète du tronçon au complet est la meilleure option lorsque les trois actifs sont tous critiques.**

7.2.5 Cadre procédural pour l'intégration optimale des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie

La synthèse des conclusions partielles issues de l'analyse des résultats des tableaux 7.5 et 7.6 permet de dégager cinq (5) règles globales permettant d'encadrer l'intégration des conduites d'eau, d'égout et des chaussées, puis d'optimiser la coordination des interventions sur ces actifs. Ces règles sont énumérées au tableau 7.7 et adressent les cas de tronçons avec 0, 1, 2 ou 3 actifs critiques.

Tableau 7.7 Règles de coordination issues des résultats de la simulation coût-bénéfice

Combinaisons d'actifs selon leur état respectif	**Règles de coordination**
Tronçon avec 3 actifs critiques	La reconstruction des trois réseaux est la meilleure option dans 100% des cas observés.
Tronçon avec 2 actifs critiques et 1 actif en état passable	La reconstruction des trois réseaux est la meilleure option dans 100% des cas observés.
Tronçon avec 2 actifs critiques et 1 actif en bon ou excellent état	Des interventions uniquement sur les deux actifs critiques, en privilégiant des stratégies de réhabilitations sans tranchée, contrairement à la reconstruction complète, sont les meilleures options dans 100% des cas observés.
Tronçon avec 1 seul actif critique et au moins un actif en état passable (nombre = 3)	Une intervention sur l'actif critique, en privilégiant une technique de réhabilitation sans tranchée, est suggérée. Toutefois, il peut être opportun et rentable de réhabiliter simultanément les actifs affichant un état passable. Des analyses exhaustives doivent être faites au cas par cas.
Autres cas de tronçon	Une intervention sur l'actif critique, s'il y a lieu, est suggérée en privilégiant une technique de réhabilitation sans tranchée. Aucune intervention n'est requise sinon.

Ainsi, selon la première ligne du tableau 7.7, pour un tronçon ayant les trois actifs critiques, soient la chaussée, la conduite d'eau et celle d'égout, la meilleure option en termes d'efficacité et de rentabilité à long terme est la reconstruction complète du tronçon. Les deux lignes successives présentent les règles suggérées pour des tronçons avec deux actifs critiques. L'avant-dernière ligne du tableau est relative aux tronçons ayant un seul actif critique tandis que la dernière ligne du tableau concerne tous les autres cas de tronçons n'ayant pas été ciblés dans les lignes précédentes. Notons que par technique de réhabilitation sans tranchée, on désigne toute technique de réhabilitation ne nécessitant pas des excavations sur toute la longueur des conduites, ni sur la profondeur complète des couches de chaussée.

Les règles de coordination proposées sont des règles générales permettant de guider les gestionnaires d'infrastructures dans la prise de décisions stratégiques à l'échelle globale du réseau, quant au choix des interventions et à l'utilisation optimale des opportunités de coordination sur les différents tronçons. Toutefois, certains paramètres propres aux actifs du tronçon (ampleur des déformations, diamètre de la conduite, historique de réhabilitation), à la configuration du tronçon (profondeur des conduites par rapport à la chaussée, présence d'autres infrastructures enterrées) ou à d'autres considérations (environnementales, économiques, sociales ou politiques) peuvent grandement influencer les choix d'interventions. D'où l'importance d'effectuer des analyses approfondies de niveau projet à l'échelle de chaque tronçon, pour confirmer que la solution choisie demeure l'optimale. Cette étape est requise avant de poursuivre avec les phases de planification détaillée et de réalisation des interventions ciblées.

7.3 Application du modèle proposé aux tronçons de la Ville de Montréal

7.3.1 Description des données utilisées

Les données utilisées pour valider la pertinence de l'approche proposée sont celles de la Ville de Montréal, et plus particulièrement une partie des données du plan d'intervention de 2013 et de sa mise à jour en 2018. En effet, nous avons choisi sur le territoire de la Ville de Montréal, une dizaine de tronçons parmi ceux possédant chacun les trois actifs, soit l'égout,

la chaussée et la conduite d'eau. Les dix tronçons ont été choisies aléatoirement parmi ceux possédant au moins un actif critique au moment de l'élaboration du plan d'intervention de 2013 par la municipalité, selon les critères du MAMH. Les tronçons choisis pour l'étude sont répertoriés au tableau 7.8 et sont identifiés par un numéro de tronçon unifié, attribué par la Ville de Montréal dans ses dossiers internes, le nom de la rue abritant le tronçon, le nom des deux rues intersectant le tronçon et finalement la longueur du tronçon.

Tableau 7.8 Description des données utilisées pour la validation de l'approche

Désignation du tronçon unifié				
Tronçon unifié	**Rue**	**De**	**À**	**Longueur (m)**
13167	Gouin	52e	55e	216,9
5360	3e	Édouard	Centrale	266,2
19126	Pasteur	Charles-Gill	Victor-Doré	314,4
16963	3e	Laurier	Masson	282,5
6483	3e	#30 3e	#58 3e	220,7
17005	3e	Masson	Dandurand	265,6
17051	3e	Dandurand	Holt	202,9
18813	Beauséjour	De Villebon	Béique	154,0
18940	Dudemaine	#3425	#3425	202,7
18858	Gouin	Crevier	Cossette	156,9

L'état des actifs de ces différents tronçons a ensuite été analysé sur plusieurs années de même que les interventions qui y ont été réalisées. Finalement, une comparaison de la performance des interventions réalisées conformément aux recommandations du MAMH sera établie avec les résultats qu'engendrerait la nouvelle approche proposée.

7.3.2 Présentation des résultats

7.3.2.1 Approche traditionnelle du MAMH

Les résultats de la planification des interventions de la Ville de Montréal à partir des recommandations du MAMH sont présentés aux tableaux 7.9 et 7.10 qui exposent respectivement les résultats de la planification des interventions sur les différents tronçons en 2013 puis en 2018, soit à 5 années d'intervalle. On y voit, pour chaque tronçon, les actifs qui

étaient critiques (mauvais ou très mauvais), ainsi que les interventions qui ont été réalisées sur chacun des actifs de même que leurs coûts. Ce qui permettra d'apprécier de façon objective l'efficacité, la rentabilité et le caractère proactif des décisions prises en 2013.

Tableau 7.9 Résultats du PI 2013 de la Ville de Montréal basé sur les règles du MAMH

État des actifs en 2013				**Actifs critiques en 2013**			**Travaux requis en 2013**			
Tronçon	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Coût total**
13167	Très Mauvais	Mauvais	Très Mauvais	Oui	Oui	Oui	Rehab	Rehab	Rehab	552 428 $
5360	Bon	Mauvais	Mauvais		Oui	Oui	Recons	Recons	Recons	1 944 513 $
19126	Moyen	Bon	Mauvais			Oui			Recons	521 449 $
16963	Moyen	Mauvais	Très mauvais		Oui	Oui		Rehab	Recons	699 129 $
6483	Mauvais	Très mauvais	Moyen	Oui	Oui		Rehab	Rehab		304 199 $
17005	Moyen	Mauvais	Mauvais		Oui	Oui		Rehab	Recons	700 787 $
17051	Moyen	Très mauvais	Tres mauvais		Oui	Oui		Rehab	Recons	565 569 $
18813	Très mauvais	Bon	Mauvais	Oui		Oui	Rehab		Rehab	415 604 $
18940	Moyen	Très mauvais	Moyen		Oui			Rehab		148 405 $
18858	Moyen	Très mauvais	Moyen		Oui			Rehab		115 082 $
Total										*5 967 166 $*

Tableau 7.10 Résultats du PI 2018 de la Ville de Montréal basé sur les règles du MAMH

État des actifs en 2018				**Actifs critiques en 2018**			**Travaux requis en 2018**			
Tronçon	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Coût total**
13167	Excellent	Excellent	Excellent							
5360	Excellent	Excellent	Excellent							
19126	Moyen	Bon	Excellent							
16963	Moyen	Excellent	Excellent							
6483	Excellent	Excellent	Mauvais			Oui			Rehab	196 500 $
17005	Mauvais	Excellent	Excellent	Oui			Rehab			315 625 $
17051	Mauvais	Excellent	Excellent	Oui			Rehab			278 085 $
18813	Excellent	Bon	Excellent							
18940	Mauvais	Excellent	Mauvais	Oui		Oui	Rehab		Rehab	421 950 $
18858	Très mauvais	Excellent	Très mauvais	Oui		Oui	Recons		Recons	492 510 $
Total										*1 704 670 $*

On y constate pour plusieurs tronçons, soit cinq (5), que des actifs qui n'étaient pas critiques en 2013 sont devenus mauvais ou très mauvais cinq (5) années plus tard, forçant de nouvelles interventions sur ces tronçons avec d'éventuelles opportunités de coordination perdues. Dans d'autres cas, notamment celui du tronçon No 5380 par exemple, la reconstruction forcée de la conduite d'eau potable initialement en bon état et probablement causée par celle de l'égout est très discutable. Elle pourrait ne pas être la meilleure option s'il est possible de réhabiliter l'égout au moyen de technique de réhabilitation sans tranchée. Pour plusieurs autres tronçons ayant deux actifs critiques et le troisième se trouvant dans un état moyen, on constate que les interventions en 2013 ont porté uniquement sur les deux (2) actifs critiques, laissant celui qui se trouve dans un état passable. Ces décisions sont également très discutables compte tenu du fait que le passage de l'état passable à un état critique est très prévisible à court ou moyen termes, surtout lorsque les infrastructures adjacentes sont toutes critiques, et que des travaux sont déjà prévus sur ce tronçon. Finalement, pour ces dix (10) tronçons ayant tous subi des travaux à la suite du PI de 2013, cinq (5) ont encore de nouveaux actifs critiques en 2018 et devront à nouveau subir des travaux.

7.3.2.2 Nouvelle approche proposée

Les résultats de la planification des interventions pour les mêmes tronçons, et ce à partir de la nouvelle approche proposée, sont présentés aux tableaux 7.11 et 7.12. Ces 2 tableaux exposent respectivement les résultats de la planification des interventions sur les différents tronçons en 2013 puis en 2018, soit toujours à 5 années d'intervalle.

Tableau 7.11 Planification des travaux en 2013 basée sur la nouvelle approche proposée

État des actifs en 2013				**Actifs critiques en 2013**			**Travaux requis en 2013**			
Tronçon	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Coût total**
13167	Très Mauvais	Mauvais	Très Mauvais	Oui	Oui	Oui	Recons	Recons	Recons	837 215 $
5360	Bon	Mauvais	Mauvais		Oui	Oui		Rehab	Rehab	546 783 $
19126	Moyen	Bon	Mauvais			Oui			Rehab	347 633 $
16963	Moyen	Mauvais	Très mauvais		Oui	Oui	Recons	Recons	Recons	1 248 337 $
6483	Mauvais	Très mauvais	Moyen	Oui	Oui		Recons	Recons	Recons	794 870 $
17005	Moyen	Mauvais	Mauvais		Oui	Oui	Recons	Recons	Recons	1 198 422 $
17051	Moyen	Très mauvais	Tres mauvais		Oui	Oui	Recons	Recons	Recons	1 071 664 $
18813	Très mauvais	Bon	Mauvais	Oui		Oui	Rehab		Rehab	415 604 $
18940	Moyen	Très mauvais	Moyen		Oui			Rehab		148 405 $
18858	Moyen	Très mauvais	Moyen		Oui			Rehab		115 082 $
Total										*6 724 015 $*

Note : Dans les colonnes « Travaux requis en 2013 », la couleur rouge a été utilisée pour les tronçons présentant des différences majeures entre les deux approches, la couleur noire pour les tronçons avec des différences mineures dans la planification des travaux issus des deux approches, et la couleur verte lorsqu'aucune différence n'est observée.

Tableau 7.12 Planification des travaux en 2018 basée sur la nouvelle approche proposée

État des actifs en 2018				**Actifs critiques en 2018**			**Travaux requis en 2018**			
Tronçon	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Eau Potable**	**Égout**	**Voirie**	**Coût total**
13167	Excellent	Excellent	Excellent							
5360	Excellent	Excellent	Excellent							
19126	Moyen	Bon	Excellent							
16963	Moyen	Excellent	Excellent							
6483	Excellent	Excellent	Mauvais							
17005	Mauvais	Excellent	Excellent							
17051	Mauvais	Excellent	Excellent							
18813	Excellent	Bon	Excellent							
18940	Mauvais	Excellent	Mauvais	Oui		Oui	Rehab		Rehab	421 950 $
18858	Très mauvais	Excellent	Très mauvais	Oui		Oui	Recons		Recons	492 510 $
Total										*914 460 $*

On constate que les interventions préconisées par le nouveau modèle proposé, sont très efficaces et beaucoup plus rentables que celles provenant de l'approche du MAMH. En effet, la ville dépenserait en coût global direct pour les interventions requises entre 2013 et 2018, un montant semblable, peu importe l'approche choisie. La différence se fait à moyen et long termes, où les coûts effectifs associés aux interventions recommandées par la nouvelle approche sont beaucoup moins élevés que ceux provenant de l'approche du MAMH.

En effet, la nouvelle approche a permis (ou proposé) d'inclure dans la synchronisation des interventions, des actifs qui étaient dans un état passable quelques années auparavant et qui sont devenus critiques à court ou moyen termes selon les observations réelles faites sur le terrain. Ceci a permis, moyennant le même coût global d'intervention, de renouveler près de 10 % d'infrastructures de plus, en termes de linéaire, comparativement à l'approche

traditionnelle du MAMH. Plusieurs actifs se trouvant dans un état passable en 2013 ont ainsi pu profiter de la gestion intégrée du tronçon pour être renouvelés à moindre coût.
De plus, on obtient pour les actifs, une durée de vie additionnelle 20 % plus longue pour chaque dollar investi, comparativement aux résultats de l'approche du MAMH. Ceci est dû au fait que la coordination efficace des interventions a permis d'opter pour des solutions plus durables notamment des reconstructions synchronisées (ayant une plus longue durée de vie que des réhabilitations) sans en augmenter les coûts d'intervention. En outre, en synchronisant les interventions selon les règles proposées, on réduit les couts sociaux induits par les mises en chantiers et leurs impacts négatifs sur les citoyens. On fait également des économies sur les coûts de réparations et de maintien des actifs en état passable ou mauvais. Ces économies, ainsi que les économies de masse réalisées lors de la coordination des travaux, peuvent permettre de réaliser des interventions plus performantes à moindre coût. Finalement, on anticipe aussi la dégradation prochaine des actifs en condition passable et les futures interventions qui seront requises sur ces tronçons. Il en est ainsi pour les tronçons No 6483, 17005 et 17051 pour lesquels le modèle proposé a permis d'anticiper le vieillissement de la chaussée dans le premier cas, puis de l'aqueduc dans les deux suivants, et de les inclure dans les décisions d'interventions. Celui du MAMH au contraire, n'a pu anticiper ces défaillances, ni les prendre en compte dans les plans d'interventions. En conséquence, ces tronçons ont dû subir des travaux autant à la suite du PI de 2013 que du PI de 2018. Le modèle permet aussi de baliser la coordination des interventions et l'usage de la reconstruction complète afin de ne pas devancer à l'excès des interventions lorsque cela n'est ni justifié ni rentable.

Toutefois, le modèle ne prédit pas la dégradation des actifs, même s'il peut dans certains cas proposer la reconstruction d'un actif qui est dans un état passable, en raison de l'état dégradé d'un ou des deux autres actifs du même tronçon. Il arrive donc que le modèle ne propose aucune intervention sur certains actifs se trouvant dans un état moyen, bien qu'il y ait des interventions sur d'autres actifs du même tronçon, de sorte que les actifs en état moyen deviennent critiques à court ou moyen termes. C'est le cas des tronçons No 18940 et 18858 où l'aqueduc et la chaussée sont devenus critiques cinq (5) ans après des interventions de

réhabilitation prescrites uniquement sur l'égout qui était le seul actif critique en ce moment et nécessitant une intervention. Tout autre intervention à l'époque n'aurait pu être justifiée et ne serait pas forcément rentable. Ce changement d'état des autres actifs du tronçon fait partie du risque qu'il est raisonnable de prendre ou de tolérer, pour ne pas intervenir de façon abusive et trop prématurée sur des actifs qui ne sont pas encore critiques. Dans le contexte, intervenir uniquement sur l'actif critique (l'égout) demeure la décision la plus rentable sur ces tronçons.

L'analyse comparative tronçon par tronçon des résultats issus des deux approches est détaillée dans les paragraphes suivants.

Tronçon unifié 13167 : Puisque les 3 actifs sont critiques et nécessitent tous une intervention, une reconstruction complète du tronçon est préconisée par notre approche comme étant l'option la plus rentable (20$/m/an pour une reconstruction complète contre 22$/m/an pour une réhabilitation des 3 actifs). La municipalité a plutôt choisi de réhabiliter chacun des actifs. Ce qui est efficace techniquement et moins chère en investissement initial mais pas forcément plus rentable à long-terme car la durée de vie additionnelle engendrée par cette intervention est plus faible.

Tronçon unifié 5360 : Compte tenu du fait que seule la chaussée est critique, notre approche préconise une réhabilitation de la chaussée. Une reconstruction complète de la chaussée a plutôt été effectuée. Cette intervention bien qu'efficace n'est pas la méthode optimale selon notre modèle. En effet, la reconstruction de la chaussée est plus rentable lorsqu'elle est synchronisée avec l'aqueduc et/ou l'égout, et est moins à risque de causer des dommages aux actifs voisins ou adjacents situés dans la même tranchée.

Tronçon unifié 16963 : Selon notre approche, une reconstruction complète des trois actifs serait la solution la plus rentable. La solution adoptée par la municipalité (reconstruire la chaussée et réhabiliter l'égout) est efficace, mais pas la plus rentable à long-terme. Dû à l'état de l'aqueduc qui est passable avec une date d'installation de 1909 (âge supérieur à 100 ans), il est préférable d'intervenir en même temps sur l'aqueduc pour anticiper sa détérioration

prochaine et protéger la chaussée et l'égout qui viennent d'être remis à neuf. De plus la reconstruction synchronisée des 3 actifs permettrait des économies qui font de cette intervention intégrée, la plus rentable à long-terme.

Tronçon unifié 6483 : Puisque deux actifs sont critiques et le troisième se trouve dans un état passable, un remplacement complet des trois actifs est suggéré par notre approche. Cette option s'est avérée être meilleure que celle réalisée par la municipalité car permettrait d'anticiper la dégradation de la chaussée qui passe d'un état passable en 2013 à mauvais en 2018, requérant à nouveau une intervention sur le tronçon ainsi que des coûts additionnels. Au contraire d'une telle décision proactive, la municipalité était intervenue uniquement sur les deux actifs critiques. Elle se retrouve obligé d'intervenir à nouveau sur le troisième à peine 5 années plus tard. Le total des coûts d'intervention est de loin moins rentable que la reconstruction synchronisée préconisée par notre méthode.

Tronçon unifié 17005 : Compte tenu du fait que deux actifs (égout et chaussée) sont critiques et le troisième se trouve dans un état moyen avec un âge avancé (date d'installation de l'aqueduc : 1909), un remplacement complet des trois actifs est recommandé par notre approche. Ce qui s'est avéré être la meilleure option puisqu'elle aurait permis d'anticiper la dégradation de l'aqueduc qui passe d'un état passable en 2013 à mauvais en 2018, requérant à nouveau une intervention sur le tronçon ainsi que des coûts additionnels. La ville était simplement intervenue sur les deux actifs critiques. Elle va devoir intervenir à nouveau sur ce tronçon à peine 5 années plus tard. Le total des coûts d'intervention est moins rentable que la reconstruction synchronisée préconisée par notre approche pour les interventions de 2013.

Tronçon unifié 17051 : Puisque deux actifs (égout et chaussée) sont critiques et le troisième (aqueduc) se trouve dans un état passable avec un âge avancé (date d'installation : 1909), un remplacement complet des trois actifs est recommandé par notre approche. Cette option est meilleure que celle adoptée par la municipalité car elle permet d'anticiper la dégradation de l'aqueduc qui passe d'un état passable en 2013 à mauvais en 2018 nécessitant à nouveau une intervention sur le tronçon. La ville était simplement intervenue sur les deux actifs critiques.

Elle se retrouve obligée d'intervenir à nouveau sur le troisième à peine 5 années plus tard. Le total des coûts d'intervention est moins rentable que la reconstruction synchronisée préconisée par notre approche pour les interventions de 2013.

Tronçon unifié 18813 : Les interventions prescrites par notre modèle sont les mêmes que celles réalisées par la ville, soit la réhabilitation des deux actifs critiques (aqueduc et chaussée). Selon notre modèle, elles sont les plus rentables en plus d'être efficaces. Rappelons qu'une intervention est efficace lorsqu'elle permet à chacun des actifs du tronçon de se retrouver dans un état excellent, bon ou moyen au terme de son application.

Tronçon unifié 18940 : L'intervention suggérée par notre modèle est la même que celle réalisée par la ville : réhabilitation de l'égout. Selon notre modèle, cette intervention est la plus rentable dans le contexte, en plus d'être efficace. Elle n'a toutefois pas permis d'anticiper la dégradation de l'aqueduc et de la chaussée, devenus critiques 5 années après.

Tronçon unifié 18858 : L'intervention prescrite par notre modèle est la même que celle réalisée par la ville : réhabilitation de l'égout. Selon notre modèle, cette intervention est la plus rentable dans le contexte, en plus d'être efficace. Elle n'a toutefois pas permis d'anticiper la dégradation de l'aqueduc et de la chaussée, tous devenus critiques en 2018.

7.4 Conclusions partielles

L'approche proposée s'articule autour des cinq (5) règles qui sont exposées au tableau 7.7 et vise à implanter et renforcer les bases d'une coordination efficace des interventions sur les trois actifs d'une même tranchée. Elle se fonde sur une analyse cout-bénéfice des principaux scénarios d'interventions disponibles sur un tronçon abritant une conduite d'eau, l'égout et la chaussée. L'analyse cout-bénéfice a montré qu'il n'est pas toujours rentable, ni opportun, de coordonner les interventions ou de devancer les projets de renouvellement dans le but de les coordonner avec les interventions sur des actifs voisins. La rentabilité de la coordination des interventions est étroitement liée à l'état de chacun des trois actifs au moment de

l'évaluation. Ainsi la coordination peut être très efficace et très rentable lorsque deux ou trois actifs nécessitent des besoins d'interventions à court-terme, ce qui n'est pas le cas lorsque seulement un des actifs requiert des travaux. Le tableau 7.7 présente en détails les principales règles préconisées ainsi que leur condition d'application. Ainsi lorsque les trois actifs du tronçon sont critiques, la reconstruction complète du tronçon s'impose. Il en est de même lorsque deux actifs sont critiques et le troisième se trouve dans un état passable. Lorsque deux actifs sont critiques mais le troisième se trouve en bon ou excellent état, des interventions synchronisées de réhabilitations sans tranchée sont à privilégier sur les actifs critiques. Il en est de même pour les autres cas de tronçons notamment ceux avec un seul actif critique. Toutefois dans ce dernier cas, il peut être opportun de réhabiliter du même coup les actifs qui se trouvent dans un état passable. En conséquence, il est conseillé, selon les meilleures pratiques en vigueur et selon nos résultats d'analyses, de toujours évaluer systématiquement l'état de tous les actifs d'une même emprise (gestion intégrée) afin de ne pas manquer les opportunités de coordination. Les règles proposées au tableau 7.7 sont intéressantes car elles ont permis à coût d'intervention égal ou moindre, de prolonger davantage la durée de vie des actifs, d'anticiper certaines défaillances futures, et de réduire les impacts et coûts sociaux reliés à ces défaillances. Ces défaillances auraient entrainé des interventions d'urgence généralement plus couteuses et contraignantes pour les utilisateurs et la société que des interventions réalisées en mode planifié.

Toutefois, les règles préconisées n'ont pas permis d'anticiper toutes les futures dégradations à moyen terme. Ceci faisant partie du risque acceptable ou tolérable en contrepartie de maintenir les coûts d'intervention bas, de sorte à ne pas devancer de façon abusive les interventions sur des actifs se trouvant dans un état encore tolérable. Par ailleurs, notons qu'il s'agit des règles générales permettant une analyse stratégique et une planification préliminaire des interventions par tronçon, à l'échelle globale du réseau. Et ceci, dans un souci d'optimisation des opportunités de coordination sur les différents tronçons. Cependant, certains paramètres spécifiques aux actifs (ampleur des déformations, diamètre de conduite, historique de réhabilitation, profondeur des conduites par rapport à la chaussée, présence d'autres infrastructures) ou d'autres considérations d'ordre environnemental, économique,

social ou politique, peuvent significativement influencer les choix d'interventions. D'où l'importance d'effectuer, dans une étape suivante, des analyses exhaustives pour chaque tronçon, afin de confirmer que la solution choisie demeure l'optimale.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette thèse a permis d'élaborer et de déployer de nouvelles méthodes d'identification et de planification des besoins de renouvellement (réhabilitation et reconstruction) des infrastructures linéaires d'eau et de voirie, en l'occurrence les conduites d'eau potable, les conduites d'égouts et les chaussées. Face aux nombreux défis qui s'opposent encore à une gestion pérenne, optimale et intégrée de ces infrastructures si essentielles au fonctionnement des villes et municipalités, cette thèse apporte une solution concrète, rigoureuse et objective et propose une alternative intéressante aux façons traditionnelles de procéder dans l'élaboration des plans d'interventions relativement à la gestion et au renouvellement des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie.

La problématique ciblée dans cette recherche est la faible performance des méthodes et approches traditionnelles utilisées dans ce domaine en l'occurrence :

a) le manque de pertinence de certains indicateurs d'état utilisés pour diagnostiquer les interventions requises sur les infrastructures;
b) la mauvaise utilisation et le mauvais encadrement de certains indicateurs d'état;
c) l'inefficacité de certains processus de combinaison des indicateurs d'état conduisant aux décisions d'interventions;
d) l'inexistence de règles et critères précis et prouvés, encadrant l'intégration et la coordination efficaces, rentables et optimales des interventions sur les trois types d'infrastructures partageant la même tranchée de voirie;
e) la difficulté des gestionnaires d'infrastructures à optimiser les investissements et les interventions en intégrant tous les critères, défis et contraintes de gestion (coût, efficacité, rentabilité à long terme, durabilité, niveau de service, changements climatiques, impacts sociaux des défaillances et des travaux, acceptabilité sociale).

Pour atteindre l'objectif visé, soit contribuer efficacement et significativement à l'amélioration et à l'optimisation de la gestion intégrée de ces trois types d'infrastructures, les travaux de cette thèse ont été orientés suivant trois axes de recherche : (a) l'optimisation

de la gestion et de la planification des interventions sur les réseaux d'eau potable; (b) l'optimisation de la gestion et de la planification des interventions sur les réseaux égouts; (c) l'optimisation de la gestion intégrée ou coordonnée des interventions sur les conduites d'eau potable, les conduites d'égouts et les chaussées partageant une même tranchée. Les règles d'identification et de diagnostic d'état des chaussées sont maintenues, dans notre étude, telles qu'elles sont retrouvées dans l'état de l'art et dans la pratique courante.

La méthodologie utilisée pour optimiser la gestion des réseaux d'eau potable s'appuie sur une base analytique et statistique qui a conduit à réévaluer la performance des indicateurs usuels et des processus traditionnels d'établissement des besoins d'interventions. Par la suite, de nouveaux paramètres en lien avec la détérioration des conduites d'eau ont été explorés et analysés, puis leur pertinence et importance ont été évaluées. Les résultats ont été très concluants, permettant entre autres d'intégrer l'impact spatial et temporel du dernier bris, et implicitement le coefficient de risque relatif, dans les processus d'établissement des classes et priorités d'interventions des diverses conduites. En outre, une nouvelle méthode plus juste et plus dynamique d'établissement des durées de vie des conduites d'eau potable a été développée. Finalement un nouveau processus amélioré et plus performant d'aide à la décision d'intervention a été mis en place. Ce processus encadre davantage les indicateurs les moins performants et ceux trop théoriques, et renforce le poids des indicateurs reliés à des défaillances visibles observables comparativement aux défaillances présumées. Une étude de cas, réalisée avec la nouvelle méthode et comparée avec les résultats issus de la méthodologie préconisée par le MAMH, a montré que les décisions issues de cette nouvelle approche sont beaucoup plus efficaces. Les interventions sont plus pertinentes, mieux justifiées, plus rentables et davantage réalisées au bon endroit, au bon moment et avec un maximum d'impacts positifs sur l'amélioration des niveaux de service.

Pour optimiser les interventions sur les réseaux d'égouts, nous avons combiné deux méthodes intéressantes et populaires, mais imparfaites compte tenu de leurs lacunes respectives. La première est la méthodologie du MAMH qui préconise l'utilisation de 4 indicateurs d'état, tous quantitatifs dont certains sont structuraux et d'autres fonctionnels,

mais qui ne tient pas compte de l'impact de la concomitance des défauts structuraux, fonctionnels et de certains facteurs aggravant sur la vulnérabilité et la vitesse de dégradation des conduites. La seconde méthode est celle du WRc qui ne propose qu'un seul indicateur d'état, soit l'indicateur d'état structural, ce dernier étant progressivement corrigé, en prenant en compte l'impact de divers facteurs aggravants. Les faiblesses de cette dernière méthode sont (1) le fait qu'elle soit assujettie à l'indicateur d'état structural, sans lequel il est impossible d'aller plus loin dans l'établissement de l'état de la conduite, et (2) le fait que plusieurs, sinon la plupart des facteurs aggravants soient de nature qualitative et donc difficile à estimer, à évaluer et à utiliser en pratique courante. La combinaison des deux méthodes nous a permis d'établir une nouvelle méthode plus robuste, plus efficace, plus représentative des conditions réelles in situ des conduites, et qui profite des atouts des deux précédemment décrites. La nouvelle méthode est basée sur un indicateur global d'état structural et un indicateur global d'état fonctionnel et hydraulique, dont l'impact de la concomitance des défauts, des déficiences et des facteurs aggravants est pris en compte dans l'évaluation des conduites, et ce, de façon la plus quantitative possible. L'application de la méthode proposée à un secteur d'égouts de la Ville de Montréal a prouvé son applicabilité et le fort potentiel de cette méthodologie qui propose une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles tout en apportant des solutions concrètes aux lacunes de ces dernières.

Finalement, le troisième volet de cette recherche qui est consacré à l'élaboration de règles pour l'optimisation de la gestion intégrée des interventions sur les réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie a été réalisé au moyen d'une méthodologie d'analyse comparative des coûts et bénéfices générés par divers scénarios d'interventions coordonnées ou non, sur tous les actifs d'une même tranchée. Les règles de décision issues de cette analyse ont été validées à travers une étude de cas appliquée à divers tronçons abritant les trois réseaux, sur le territoire de la Ville de Montréal. Les résultats sont très concluants, et permettent une avancée significative quant à l'encadrement des critères permettant une coordination efficace et rentable des interventions sur les trois types d'infrastructures. Les résultats issus de cette recherche permettent de combler une partie du manque de références pertinentes et de règles d'intégration efficaces et performantes dans ce domaine.

RECOMMANDATIONS

Le modèle proposé pour optimiser la gestion des interventions sur les réseaux d'eau potable, en l'occurrence les interventions de renouvellement, repose significativement sur l'utilisation de trois indicateurs principaux faciles à obtenir et ceci sans coût supplémentaire lié à une quelconque inspection diagnostique, à une mesure in situ ou à une étude hydraulique à base de logiciel spécialisé. Les trois indicateurs priorisés dans le modèle proposé, tout comme dans celui du MAMH, soient le nombre de bris, le taux de bris et la durée de vie écoulée, s'appuient simplement sur les registres de bris et les informations physiques de chacune des conduites du réseau, garantissant une certaine facilité d'obtention des données à traiter afin d'aboutir à moindre coût à l'état de chaque conduite et aux interventions requises. Toutefois, d'autres indicateurs tels que la perte d'épaisseur relative de la paroi par exemple, pourraient légitimement déclencher des interventions immédiates, à condition que l'incertitude associée au résultat de la mesure de l'épaisseur résiduelle de la paroi des conduites soit très minime voire sans impact sur la décision d'intervention. Pour l'instant cette information ou donnée n'est généralement pas disponible (car très couteuse à obtenir), puis se retrouve généralement associée à une incertitude assez significative. Le degré de certitude et/ou la pertinence d'encadrer ce type d'indicateur par des défaillances visibles observables, telles qu'au moins un bris dans les derniers 10 ans, pourrait faire l'objet d'études plus approfondies afin que cet indicateur puisse déclencher des interventions souhaitables ou même immédiates. Par ailleurs, l'intégration de combinaisons de facteurs aggravant la détérioration des conduites d'eau à l'arbre de décision proposé pour en maximiser l'efficacité pourrait également faire l'objet de futures recherches. À titre d'exemple, les combinaisons « Sol agressif + matériau de conduite corrosif + pourcentage élevé de vie écoulée » ou encore « Pression sectorielle élevée + pourcentage élevé de vie écoulée » semblent présenter un potentiel intérêt qui mérite d'être analysé plus en détails.

Concernant l'optimisation des interventions sur les conduites d'égouts, de nouveaux indicateurs peu utilisés jusqu'ici pourraient également être testés et intégrés au processus de décisions en cas de résultats intéressants. À titre d'exemple, l'historique des réparations et

des colmatages des conduites d'égouts ainsi que leur durée de vie écoulée ou restante pourraient ainsi être analysés. Ces deux indicateurs sont moins couteux que des inspections télévisées et des études ou simulations hydrauliques alors qu'ils peuvent fournir une information importante sur la vulnérabilité, le niveau de service et les coûts d'entretien associés à cette conduite; et ceci sans coût supplémentaire pour une quelconque activité diagnostic.

Dans cette thèse, l'optimisation de la planification des interventions sur les réseaux de voirie n'a pas été analysée. Toutefois il serait intéressant dans une future recherche d'étudier certaines problématiques spécifiques à ces actifs en vue d'y apporter des propositions de solutions. En l'occurrence l'apport de précisions quant aux types d'interventions requises ou appropriées lorsque l'état de la surface est excellent ou très bon alors que la chaussée est défaillante selon son IRI ou selon sa capacité structurale. De même, il serait intéressant d'approfondir et de proposer des règles efficaces encadrant les interventions adéquates selon (1) les types de défauts observés sur la chaussée et (2) le type de chaussée et de fondation.

Quant à la gestion intégrée des conduites d'eau potable, des conduites d'égouts et des chaussées partageant la même emprise, les règles d'encadrement proposées pour coordonner les interventions sont surtout basées sur l'efficacité, le coût, la durée de vie de l'intervention retenue et donc sa rentabilité. Les coûts d'entretien futurs liés à chaque type d'intervention ainsi que les coûts sociaux et les impacts environnementaux associés aux différents scénarios d'intervention n'ont pas été pris en compte de façon directe, explicite et quantitative dans l'analyse. Ceci, pour maintenir la simplicité de la méthode d'optimisation utilisée. Toutefois, ils pourraient l'être dans de futures analyses ou travaux de recherches. Il en est de même pour les coûts d'entretien et d'exploitation qui sont associés à chaque intervention, et ce sur le cycle de vie de la conduite ou de l'intervention choisie. Ceci permettrait d'avoir un meilleur portrait du coût de revient effectif et de la rentabilité de chacun des choix d'interventions. Toutefois il y a un risque de complexification du modèle d'optimisation utilisé.

ANNEXE I

GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CONDUITES D'EAU POTABLE

Tableau-A I-1 Grille d'évaluation du nombre de réparations EP-1
selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
Conduite PI < 150 m				
Excellent	1	0	0	0
Bon	2	1	1	1-2
Moyen	3	2	2-3	3-4
Mauvais	4	3	4	5
Très mauvais	5	4 et +	5 et +	6 et +
150 m ≤ Conduite PI ≤ 300 m				
Excellent	1	0	0	0
Bon	2	1	1	1-2
Moyen	3	2	2-3	3-4
Mauvais	4	3-4	4-5	5-6
Très mauvais	5	5 et +	6 et +	7 et +
Conduite PI > 300 m				
Excellent	1	0	0	0
Bon	2	1	1-2	1-3
Moyen	3	2-3	3-4	4-6
Mauvais	4	4-5	5-7	7-9
Très mauvais	5	6 et +	8 et +	10 et +

Tableau-A I-2 Grille d'évaluation du taux de réparations EP-2
selon la méthodologie du MAMH (en nombre de réparations/km/an)

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
Excellent	1	0	0	<1
Bon	2	s.o.	<1	1 à <2
Moyen	3	<1	1 à <2	2 à <3
Mauvais	4	1 à <2	2 à <3	3 à <4
Très mauvais	5	2 et +	3 et +	4 et +

Tableau-A I-3 Grille d'évaluation de la durée de vie écoulée EP-3 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Pourcentage de durée de vie écoulée**
Excellent	1	20 % et moins
Bon	2	> 20 à 50 %
Moyen	3	>50 à 90 %
Mauvais	4	>90 %
Très mauvais	5	s.o.

Tableau-A I-4 Durées de vie proposées par le MAMH pour les conduites d'eau potable

Matériau de la conduite	**Durée de vie utile à utiliser pour EP-3 (en années)**
Béton acier (précontraint)	120
Ciment-amiante	75
Chlorure de polyvinyle (CPV)	100
Fonte ductile 1979 et avant	60
Fonte ductile après 1979	80
Acier	100
Fonte grise 1940-1965	90
Fonte grise avant 1940 et après 1965	120
Polyéthylène de base	60
Polyéthylène PEHD	100
Fer, cuivre	70

Tableau-A I-5 Grille d'évaluation de la qualité et pression d'eau par les plaintes et constats d'évènements EP-4 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Problématique**
Excellent	1	Aucune
Bon	2	Sans objet
Moyen	3	Tolérable
Mauvais	4	Préoccupante
Très mauvais	5	Importante ou intolérable

Tableau-A I-6 Grille d'évaluation de la perte d'épaisseur relative de la paroi EP-5 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Perte d'épaisseur relative de la paroi**
Excellent	1	0
Bon	2	> 0 à 10 %
Moyen	3	> 10 à 40 %
Mauvais	4	> 40% à 70 %
Très mauvais	5	>70 %

Tableau-A I-7 Grille d'évaluation de la susceptibilité au gel EP-6 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Historique de gel**
Excellent	1	Aucun historique de gel
Bon	2	Sans objet
Moyen	3	Historique de branchements de service gelés
Mauvais	4	Conduite au-dessus de la ligne de gel avec écoulement
Très mauvais	5	Historique de conduite principale gelée.

Tableau-A I-8 Grille d'évaluation de la pression statique EP-7 obtenue par mesures ou simulations selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Pression statique mesurée sur le terrain**	**Pression statique mesurée en simulation de pointe horaire**	**Pression statique mesurée en simulation de pointe horaire pour un horizon de 10 ans**
Excellent	1	> 65 à 110lb/po^2 > 448 à 758 kPa	> 60 à 110lb/po^2 > 414 à 758 kPa	Sans objet
Bon	2	> 50 à 65lb/po^2 > 345 à 448 kPa	> 40 à 60lb/po^2 > 276 à 414 kPa	> 30 à 40lb/po^2 > 207 à 276 kPa
Moyen	3	> 40 à 50 ou >110lb/po^2 > 276 à 345 ou > 758 kPa	> 30 à 40 ou >110lb/po^2 > 207 à 276 ou > 758 kPa	> 20 à 30lb/po^2 > 138 à 207 kPa
Mauvais	4	30 à 40 lb/po^2 207 à 276 kPa	20 à 30 lb/po^2 138 à 207 kPa	≤ 20 lb/po^2 ≤ 138 kPa
Très mauvais	5	< 30 lb/po^2 < 207 kPa	≤ 20 lb/po^2 ≤ 138 kPa	Sans objet

Tableau-A I-9 Grille d'évaluation de la protection contre l'incendie EP-8 obtenue par mesures ou simulations selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Protection contre l'incendie État actuel ($Q_{disponible}/Q_{requis}$)**	**Protection contre l'incendie sur un horizon futur de 10 ans ($Q_{disponible}/Q_{requis}$)**
Excellent	1	Plus de 100%	Sans objet
Bon	2	> 80 à 100 %	> 70 à 100 %
Moyen	3	> 70 à 80 %	≥ 50 à 70 %
Mauvais	4	≥ 50 à 70 %	Moins de 50 %
Très mauvais	5	Moins de 50 %	Sans objet

Tableau-A I-10 Grille d'évaluation de la pression statique obtenue par des études EP-9 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Pression statique mesurée sur le terrain**	**Pression statique mesurée en simulation de pointe horaire**	**Pression statique mesurée en simulation de pointe horaire pour un horizon de 10 ans**
Excellent	1	> 65 à 110lb/po^2 > 448 à 758 kPa	> 60 à 110lb/po^2 > 414 à 758 kPa	Sans objet
Bon	2	> 50 à 65lb/po^2 > 345 à 448 kPa	> 40 à 60lb/po^2 > 276 à 414 kPa	> 30 à 40lb/po^2 > 207 à 276 kPa
Moyen	3	> 40 à 50 ou >110lb/po^2 > 276 à 345 ou > 758 kPa	> 30 à 40 ou >110lb/po^2 > 207 à 276 ou > 758 kPa	> 20 à 30lb/po^2 > 138 à 207 kPa
Mauvais	4	30 à 40 lb/po^2 207 à 276 kPa	20 à 30 lb/po^2 138 à 207 kPa	≤ 20 lb/po^2 ≤ 138 kPa
Très mauvais	5	< 30 lb/po^2 < 207 kPa	≤ 20 lb/po^2 ≤ 138 kPa	Sans objet

Tableau-A I-11 Grille d'évaluation de la protection contre l'incendie obtenue par des études EP-10 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Protection contre l'incendie État actuel ($Q_{disponible}/Q_{requis}$)**	**Protection contre l'incendie sur un horizon futur de 10 ans ($Q_{disponible}/Q_{requis}$)**
Excellent	1	Plus de 100%	Sans objet
Bon	2	> 80 à 100 %	> 70 à 100 %
Moyen	3	> 70 à 80 %	≥ 50 à 70 %
Mauvais	4	≥ 50 à 70 %	Moins de 50 %
Très mauvais	5	Moins de 50 %	Sans objet

Tableau-A I-12 Grille d'évaluation de la qualité de l'eau obtenue par des études EP-11 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Problématique**
Excellent	1	Aucune
Bon	2	Sans objet
Moyen	3	Tolérable
Mauvais	4	Préoccupante
Très mauvais	5	Importante ou intolérable

ANNEXE II

GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CONDUITES D'ÉGOUTS

Tableau-A II-1 Grille d'évaluation de l'état structural EU-1/EPL-1 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation PACP**		
		I	**II**	**III**
Excellent	1	1	1	1
Bon	2	s.o.	s.o.	2
Moyen	3	2	2	3
Mauvais	4	3	3	4
Très mauvais	5	4-5	4-5	5

Tableau-A II-2 Grille d'évaluation des problèmes hydrauliques EU-2/EPL-2 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Problème hydraulique**
Excellent	1	Aucun
Bon	2	1 nettoyage / an
Moyen	3	2 nettoyages / an
Mauvais	4	1 refoulement ou 3 nettoyages / an ou au moins 1 mise en charge
Très mauvais	5	2 refoulements ou + de 3 nettoyages / an

Tableau-A II-3 Grille d'évaluation des déficiences fonctionnelles EU-3/EPL-3 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation PACP**		
		I	**II**	**III**
Excellent	1	1	1	1
Bon	2	s.o.	s.o.	2
Moyen	3	2	2	3
Mauvais	4	3	3	4
Très mauvais	5	4-5	4-5	5

Tableau-A II-4 Grille d'évaluation des problèmes hydrauliques basés sur des études EU-4/EPL-4 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Nettoyage**	**Problème de capacité actuelle (sanitaire)**	**Problème de capacité actuelle (unitaire ou pluvial)**	**Problème de capacité future sur 10 ans**
Excellent	1	Aucun	$Q_{th} \leq$ Capacité	Pluie récurrente > 25 ans	Pluie récurrente > 10 ans
Bon	2	1 nettoyage/an	$Q_{th} \leq$ Capacité < 120 % de Q_{th}	Pluie récurrente > 10 à 25 ans	Pluie récurrente > 5 à 10 ans
Moyen	3	2 nettoyages/an	Capacité < Q_{th}	Pluie récurrente > 2 à 10 ans	Pluie récurrente > 2 à 5 ans
Mauvais	4	3 nettoyages/an	Capacité < Q_{th} avec trace de refoulement	Mise en charge lors d'une pluie récurrente ≤ 2 ans (sans refoulement)	Pluie récurrente ≤ 2 ans
Très mauvais	5	+ de 3 nettoyages/an	Capacité < Q_{th} avec refoulement	Refoulement lors d'une pluie récurrente ≤ 2 ans	Sans objet

ANNEXE III

GRILLE D'ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS INDICATEURS PRÉCONISÉS PAR LE MAMH POUR LES CHAUSSÉES

Tableau-A III-1 Grille d'évaluation de l'état de la surface des chaussées CH-1 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
		Indice du PCI		
Excellent	1	90-100	85-100	80-100
Bon	2	80-90	70-85	60-80
Moyen	3	60-80	50-70	40-60
Mauvais	4	40-60	30-50	20-40
Très mauvais	5	0-40	0-30	0-20

Note : La valeur minimale est exclue de l'intervalle.

Tableau-A III-2 Grille d'évaluation du confort au roulement des chaussées CH-2 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Hiérarchisation**		
		I	**II**	**III**
		Indice de l'IRI (m/km)		
Excellent	1	≤ 1,5	≤ 2,0	≤ 2,5
Bon	2	> 1,5 à 2,5	> 2,0 à 3,5	> 2,5 à 4,0
Moyen	3	> 2,5 à 4,5	> 3,5 à 5,5	> 4,0 à 6,0
Mauvais	4	> 4,5 à 6,0	> 5,5 à 7,0	> 6,0 à 8,0
Très mauvais	5	> 6,0	> 7,0	> 8,0

Note : La valeur minimale est exclue de l'intervalle.

Tableau-A III-3 Grille d'évaluation de la susceptibilité au gel des chaussées CH-3 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Gélivité**	**Cote**	**ΔIRI (m/km)**
Excellent	Non gélif	1	≤ 0,75
Bon	Faible	2	> 0,75 à 1,50
Moyen	Moyenne	3	> 1,50 à 2,25
Mauvais	Élevée	4	> 2,25 à 3
Très mauvais	Très-élevée	5	> 3,0

Tableau-A III-4 Grille d'évaluation de la capacité portante des chaussées CH-4 selon la méthodologie du MAMH

Statut	**Cote**	**Durée de vie résiduelle**
Excellent	1	> 25 ans
Bon	2	> 15 à 25 ans
Moyen	3	> 5 à 15 ans
Mauvais	4	> 0 à 5 ans
Très mauvais	5	Sans objet

ANNEXE IV

QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX MUNICIPALITÉS SONDÉES

Le sondage a été réalisé en 2019 dans le cadre des travaux rapportés au chapitre 5 de cette thèse. Il est composé des questions listées ci-dessous.

Question 1 :
Possédez-vous un plan d'intervention pour vos réseaux d'eau potable ?

Question 2 :
Si oui, quel est la fréquence de mise-à jour de ce plan d'intervention ?

Question 3 :
Pouvez-vous partager avec nous ce plan dans l'optique d'établir (1) un benchmarking de l'état des réseaux et (2) de participer à des études et recherches universitaires ?

Question 4 :
Quels sont les indicateurs d'état que vous utilisez pour évaluer vos conduites d'eau et quel est votre degré de confiance envers chacun d'eux sur une échelle de 100 % ?

Question 5 :
Seriez-vous disponible à répondre à des questions supplémentaires au besoin ?

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abaza, K. A., Ashur, S. A., & Al-Khatib, I. A. (2004). Integrated pavement management system with a Markovian prediction model. *Journal of Transportation Engineering, 130*(1), 24-33.

Abu Samra, S., Ahmed, M., Hammad, A., & Zayed, T. (2018). Multiobjective framework for managing municipal integrated infrastructure. *Journal of Construction Engineering and Management, 144*(1), 04017091.

Al-Barqawi, H., & Zayed, T. (2006). Condition rating model for underground infrastructure sustainable water mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 20*(2), 126-135.

Al-Barqawi, H., & Zayed, T. (2008). Infrastructure management: integrated AHP/ANN model to evaluate municipal water mains' performance. *Journal of Infrastructure Systems, 14*(4), 305-318.

Alinizzi, M. F. (2013). A framework for coordinating water distribution system and pavement infrastructure M&R based on LCCA.

Allouche, E., Alam, R., Condit, W., & Matthews, J. (2014). National Database Structure for Life Cycle Performance Assessment of Water and Wastewater Rehabilitation Technologies (Retrospective Evaluation).

Ana, E. V., & Bauwens, W. (2010). Modeling the structural deterioration of urbandrainage pipes : the state-of-the-art in statistical methods. *Urban Water Journal, 7:1, 47-59*.

ASCE. (2013). 2013 ASCE's Report Card for America's Infrastructure (pp. p. 1-74): American Society of Civil Engineering.

AWWA. (2011). *Benchmarking Performance Indicators for Water and Wastewater Utilities : Survey Data and Analyses Report*. USA.

Badham, J., Elsawah, S., Guillaume, J. H., Hamilton, S. H., Hunt, R. J., Jakeman, A. J., . . . Fu, B. (2019). Effective modeling for Integrated Water Resource Management: A guide to contextual practices by phases and steps and future opportunities. *Environmental Modelling & Software, 116*, 40-56.

Ben Tagherouit, W., & Bennis, S. (2012). Le «goal programming» pour l'optimisation de la planification de la réhabilitation des réseaux d'égout. *Canadian Journal of Civil Engineering, 39*(2), 223-236.

Boardman, A. E. (1996). Cost-benefit Analysis : Concepts and Practice. Chap. Introduction to Cost-Benefit Analysis. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 493 p.

Boucher, I. (2010). La gestion durable des eaux pluviales - Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable.

Bruxelle, C. (2005). Élaboration d'un cadre de système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles.

Campbell, C. (2020). From Data to Information to Decision-Making.

CERIU, (2015). Guide de gestion des actifs en immobilisations à l'intention des élus municipaux.

Chartrand, L., Cazavant, A., & Cinq-Mars, C. (1999). Developpement d'un cadre de reference pour l'implantation de la gestion integree des infrastructures urbaines au quebec. *Revue generale des routes (RGRA),* (HS2).

Chen, L., & Bai, Q. (2019). Optimization in decision making in infrastructure asset management: A review. *Applied Sciences, 9*(7), 1380.

Chen, T. Y.-J., & Guikema, S. D. (2020). Prediction of water main failures with the spatial clustering of breaks. *Reliability Engineering & System Safety, 203*, 107108.

Chocat, B. (1997). Encyclopédie d'hydrologie urbaine, Lavoisier, Paris.

Chughtai, F., & Zayed, T. (2008). Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 22*(5), 333-341.

CNRC, & FCM. (2003). InfraGuide: Developing indicators and benchmarks - A best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure. *National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure (INFRAGUIDE),* (Issue No. 1.1), P. 1-34.

Davenport, A. J., Dong, W. S., Fenhagen IV, F. D., Hampapur, A., Jiang, Z. B., Kalagnanam, J. R., Xie, L. (2011). Analytics-driven asset management. *IBM Journal of Research and Development, 55*(1.2), 13-1

Desbiens, M.-É. (2016). Cours de Gestion d'Actifs - GIU804 - Hiver 2016.

Di Sivo, M., & Ladiana, D. (2010). Decision-support tools for municipal infrastructure maintenance management. *Procedia Computer Science, 3,* 36-41.

Duchesne, S., Toumbou, B., & Villeneuve, J.-P. (2016). Validation and Comparison of Different Statistical Models for the Prediction of Water Main Pipe Breaks in a Municipal Network in Québec, Canada. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 29*(1), 11-24.

Eisenbeis, P., Rostum, J., & Le Gat, Y. (1999). *Statistical models for assessing the technical state of water networks : some european experiences* présentée à Annual conference American water works association, Chicago, USA, 20-24 juin 1999, United States. Repéré à https://hal.inrae.fr/hal-02578846

El-Housni, H., Duchesne, S., & Mailhot, A. (2019). Predicting Individual Hydraulic Performance of Sewer Pipes in Context of Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management, 145*(11), 04019051.

El Chanati, H., El-Abbasy, M. S., Mosleh, F., Senouci, A., Abouhamad, M., Gkountis, I., Al-Derham, H. (2015). Multi-Criteria Decision Making Models for Water Pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *30*(4), 04015090.

Elsawah, H., Bakry, I., & Moselhi, O. (2016). Decision Support Model for Integrated Risk Assessment and Prioritization of Intervention Plans of Municipal Infrastructure. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *7*(4), 04016010.

Elsawah, H., Guerrero, M., & Moselhi, O. (2014). Decision support model for integrated intervention plans of municipal infrastructure. Dans *Proc., 2014 Int. Conf. on Sustainable Infrastructure Creating Infrastructure for a Sustainable World, ASCE, Reston, VA* (pp. 1039-1050).

FCM, SCGC, ACC, & ACTP. (2012). *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes*. Canada.

FCM, SCGC, ACC, & ACTP. (2016). *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes*. Canada.

Fox, J. (2002). Cox proportional-hazards regression for survival data. *An R and S-PLUS companion to applied regression*.

Giacomella, L. (2021). Techno-economic assessment (TEA) and life cycle costing analysis (LCCA): Discussing methodological steps and integrability. *Insights into Regional Development, 3*(2), 176-197.

Guzmán-Fierro, J., Charry, S., González, I., Peña-Heredia, F., Hernández, N., Luna-Acosta, A., & Torres, A. (2020). Bayesian network-based methodology for selecting a cost-effective sewer asset management model. *Water Science and Technology, 81*(11), 2422-2431.

Hamilton. (2014). Public Works Asset Management Plan, Version 1.0.

Harvey, R., McBean, E. A., & Gharabaghi, B. (2013). Predicting the timing of water main failure using artificial neural networks. *Journal of Water Resources Planning and Management, 140*(4), 425-434.

IPWEA, & asia, I. o. p. w. e. a. (2015). *International Infrastructure Management Manual - International Edition 2015*. Australia.

Jenkins, L. M. (2014). Optimizing Maintenance and Replacement Activities for Water Distribution Pipelines.

Kabir, G., Tesfamariam, S., Loeppky, J., & Sadiq, R. (2015). Integrating Bayesian Linear Regression with Ordered Weighted Averaging: Uncertainty Analysis for Predicting Water Main Failures. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 1*(3), 04015007.

Kabir, G., Tesfamariam, S., & Sadiq, R. (2015). Predicting water main failures using Bayesian model averaging and survival modelling approach. *Reliability Engineering & System Safety, 142*, 498-514.

Kaddoura, K., & Zayed, T. (2021). Intelligent Optimized Decision-Support System for Sewer Network Assets Improvement. *Journal of Infrastructure Systems, 27*(4), 04021045.

Knost, B. R., & Mishalani, R. G. (2021). Modeling the Systematic Error in Pavement Deterioration Forecasts: Empirical Results and Interpretations Using Airfield PCI Data. *Journal of Infrastructure Systems, 27*(4), 04021046.

Lalonde, É. (2005). Approche informatisée de l'aide à la décision pour la gestion intégrée des infrastructures urbaines.

Le Gat, Y., & Eisenbeis, P. (2000). Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban water, 2*(3), 173-181.

MAMR. (2005). *Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égouts*. Québec: 2005.

MAMROT, & CERIU. (2012). *Réseaux d'égouts - Pathologies, diagnostics et interventions*. Québec: Bibliothèques et Archives nationales du Québec.

MAMROT, & CERIU. (2013). *Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égouts et des chaussées*. Québec: Publications du Québec.

Matthews, J. C., Selvakumar, A., Sterling, R., & Condit, W. (2012). Analysis of wastewater and water system renewal decision-making tools and approaches. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 3*(4), 99-105.

MDDELCC, & MAMROT. (2011). Guide de gestion durable des eaux pluviales - Stratégie d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain.

Mohamed, E., & Zayed, T. (2013). Modeling fund allocation to water main rehabilitation projects. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 27*(5), 646-655.

Mohammadi, A., Jalili-Ghazizadeh, M., Moslehi, I., & Yousefi-Khoshqalb, E. (2020). Survival analysis of water distribution network under intermittent water supply conditions. *Water Supply, 20*(8), 3531-3541.

Mokhbi, S., & Assaf, G. (2015). Cours de CTN772 - Entretien, Réhabilitation et Gestion des routes

Montréal, V. d. (2013). Bilan d'état des actifs des réseaux secondaires d'eau potable et d'égouts de la Ville de Montréal.

Montréal, V. d. (2014). *Plan d'intervention des réseaux d'eau potable, d'égouts et de voirie de la Ville de Pointe-Claire* (Rapport Technique).

Montréal, V. d., & CGT, G. (2011). Plan d'intervention pour les réseaux d'aqueduc et d'égouts - Bilan d'état global des réseaux secondaires de la Ville de Montréal - Cahier I.

Nafi, A. H. A. (2006). La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable.

Najafi, M., & Perez, M. (2016). Renewal of Potable Water Pipes.

NAMS, & IPWEA. (2006). International Infrastructure Management Manual.

NRC-CNRC, FCM & Canada, G. d. (2003). Guide national pour des infrastructures municipales durables. Innovations et règles de l'art. Eau potable. Élaboration d'un plan de renouvellement des réseaux de distribution d'eau. *Infraguide*.

Oreto, C., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., Viscione, N., Russo, F., & Dell'Acqua, G. (2022). BIM–LCCA Integration for Road Pavement Maintenance. *Transportation Research Record*, 03611981221074368.

Parlikad, A. K., & Jafari, M. (2016). Challenges in infrastructure asset management. *IFAC-PapersOnLine, 49*(28), 185-190.

Québec, V. d. (2013). *État des infrastructures* présentée à Conférence de Presse.

Renaud, E., Bremond, B., & Le Gat, Y. (2011). La durée de vie des canalisations, une notion insuffisante pour conduire une politique de renouvellement. Dans *ASTEE : Les outils de la gouvernance locale des services d'eau et d'assainissement* (pp. 10 p.). Repéré à https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00779405

Réseau-Environnement. (1999). La gestion de l'eau au Québec - Chapitre sur les réseaux, la gestion et le financement des services d'eau. Québec: Réseau Environnement

Rutsch, M., Rieckermann, J., & Krebs, P. (2006). Quantification of sewer leakage: a review. *Water Science and Technology, 54*(6-7), 135-144.

Sadek, A. W., Kvasnak, A., & Segale, J. (2003). Integrated infrastructure management systems: Small urban area's experience. *Journal of infrastructure systems, 9*(3), 98-106.

Santos, P., Amado, C., Coelho, S. T., & Leitão, J. P. (2016). Stochastic data mining tools for pipe blockage failure prediction. *Urban Water Journal*, 1-11.

Selvakumar, A., Matthews, J. C., Condit, W., & Sterling, R. (2015). Innovative research program on the renewal of aging water infrastructure systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 64*(2), 117-129.

Shahata, K., & Zayed, T. (2016). Integrated Risk-Assessment Framework for Municipal infrastructure. *Journal of Construction Engineering and Management, 142*(1), 04015052.

St. Clair, A. M., & Sinha, S. (2012). State-of-the-technology review on water pipe condition, deterioration and failure rate prediction models! *Urban Water Journal, 9*(2), 85-112.

Su, X., Liu, T., Beheshti, M., & Prigiobbe, V. (2020). Relationship between infiltration, sewer rehabilitation, and groundwater flooding in coastal urban areas. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(13), 14288-14298.

Tetra-Tech. (2015, 18-21 May 2015). *Ensuring Roadway and Utility Financial Sustainability Through Right-of-Way Capital Planning & Optimization* présentée à 9th International Conference on Managing Pavement assets ICMPA9, Washington DC.

Thomas, S., Gray, G., Woodfin, M., Mizell, W., & Thomas, B. (2012). Integrated asset management.

Toumbou, B., Villeneuve, J.-P., Beardsell, G., & Duchesne, S. (2012). General model for water-distribution pipe breaks: Development, methodology, and application to a small city in Quebec, Canada. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 5*(1), 04013006.

Uddin, W., Hudson, W., & Haas, R. (2013). Public infrastructure asset management.

UNFPA, (2004). Fond des Nations Unies pour la paix. Trousse d'outils de l'Administrateur de programme pour la planification, le suivi et l'évaluation. Outil no 1 : Glossaire des termes de planification, de suivi et d'évaluation. Repéré à https://www.eval.fr/wp-content/uploads/2018/02/UNFPAoutil2.doc

Walters, R., & Lees, S. (2013). Pilot Application of the Infrastructure Sustainability Rating Tool to Council Road Management.

Wang, H., & Wang, Z. (2019). Deterministic and probabilistic life-cycle cost analysis of pavement overlays with different pre-overlay conditions. *Road Materials and Pavement Design, 20*(1), 58-73.

Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Dimitriu, D., Clarke, G., & Bowden, D. (2019). How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate adaptation framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 77*, 403-424.

Wang, Y., Zayed, T., & Moselhi, O. (2009). Prediction models for annual break rates of water mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 23*(1), 47-54.

Werey, C. (2000). Politiques de renouvellement des réseaux d'eau potable.

Werey, C., Rozan, A., Wittner, Y., & Le Gat, Y. (2012). Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : de l'état des réseaux à la planification de leur réhabilitation - Outils, méthodes et perspectives. *Sciences Eaux et Territoires*, 44-53.

WRc, (2001). *Sewerage Rehabilitation Manual*. United Kingdom: WRc Publications. Repéré à https://books.google.ca/books?id=LS6VAAAACAAJ

Yong Kim, S., & Thuc, L. D. (2021). Life Cycle Performance Measurement in Public–Private Partnership Infrastructure Projects. *Journal of Infrastructure Systems, 27*(4), 06021001.

Zangenehmadar, Z., & Moselhi, O. (2016). Assessment of Remaining Useful Life of Pipelines Using Different Artificial Neural Networks Models. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 04016032.

Zayed, T., & Mohamed, E. (2013). Budget allocation and rehabilitation plans for water systems using simulation approach. *Tunnelling and Underground Space Technology, 36*, 34-45.

Zeb, J. (2021). A level of service framework for service-centric asset management planning. *Built Environment Project and Asset Management*.