

Université du Québec  
Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

**Planification intégrée du renouvellement des réseaux de  
drainage urbain considérant les aspects structural et hydraulique  
dans un contexte de changement climatique**

par

Hind El Housni

Thèse présentée pour l'obtention du grade de  
Philosophiae doctor (Ph.D.)  
en sciences de l'eau

**Jury d'évaluation**

|                          |                                           |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| Examineur interne        | Alain N. Rousseau<br>INRS-ETE             |
| Examineur externe        | Musandji Fuamba<br>Polytechnique Montréal |
| Examineur externe        | Balvant Rajani<br>Rajani Consultants      |
| Directrice de recherche  | Sophie Duchesne<br>INRS-ETE               |
| Codirecteur de recherche | Alain Mailhot<br>INRS-ETE                 |



## REMERCIEMENTS

Les raisons sont tellement nombreuses, qu'elles deviennent parfois difficiles à toutes nommer, pour remercier les personnes grâce à qui un projet de doctorat peut être réalisé. Ma première pensée s'adresse évidemment à ma directrice de thèse la professeure Sophie Duchesne. Je tiens à la remercier pour sa présence, sa proximité, sa disponibilité sans faille, ses conseils et son soutien moral et scientifique. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie durant cet, aussi long, projet. Je remercie également mon codirecteur de thèse le professeur Alain Mailhot pour ses conseils scientifiques et pour les données et le soutien matériel qu'il a mis à ma disposition. Je tiens aussi à remercier les stagiaires avec qui j'ai pu collaborer tout au long de mon projet de doctorat et le personnel du centre INRS-ETE qui a attribué de près ou de loin à mon épanouissement pendant cette période.

Mes sincères remerciements sont adressés aux professeurs Alain Rousseau et Musandji Fuamba et au docteur Balvant Rajani pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et l'appréciation de mon projet de recherche.

Je voudrais aussi remercier les municipalités qui nous ont fourni les données et les réponses à nos questions, sans quoi mon projet n'aurait pu être réalisé. J'adresse également mes remerciements à MITACS pour le soutien financier qu'ils m'ont fourni pendant une année complète de mon projet.

Mes dernières pensées et remerciements s'adressent à mon cher mari, ma famille et mes amis pour leur soutien moral et leur présence. Et finalement, avec un profond amour je remercie mon petit ange Maria pour être mon carburant et mon infailible remède depuis sa naissance.



## Résumé

Une mauvaise performance des réseaux d'égout peut entraîner des problèmes pouvant mettre en péril la sécurité des citoyens, la qualité des écosystèmes et le développement économique. Ces problèmes peuvent être liés à : i) la détérioration de la performance structurale des conduites, tels que les effondrements de chaussée, ii) une baisse de la performance hydraulique, comme des refoulements d'égout ou des inondations, et/ou iii) aux deux en même temps. La majorité de ces problèmes risquent de s'accroître compte tenu du vieillissement des composantes souterraines des réseaux et en raison de l'évolution des conditions climatiques, en particulier l'augmentation de l'intensité et/ou de la fréquence des événements de pluie intenses, prévue par les modèles climatiques. Une stratégie de renouvellement des réseaux basée sur une approche préventive, considérant simultanément les performances hydraulique et structurale des conduites et intégrant des pratiques permettant de mieux s'adapter aux changements climatiques (CC) projetés, pourrait limiter les problèmes cités précédemment et permettre de maintenir un niveau de performance acceptable à des coûts plus économiques. Sur la base de cette hypothèse et dans l'objectif de la vérifier, une méthode de planification intégrée des interventions de renouvellement des réseaux d'égout est proposée dans le cadre de ce projet de doctorat. Cette méthode se base sur la modélisation simultanée des performances structurale et hydraulique individuelles des conduites dans les conditions climatiques actuelles et futures en considérant un climat non stationnaire. Cette dernière vise à identifier et à planifier les meilleures options de renouvellement permettant de remettre à niveau les deux types de performance (structurale et hydraulique) au moindre coût possible. Dans cette méthode, diverses options d'adaptation aux CC sont considérées, soit le remplacement de conduites par des conduites de plus grande capacité hydraulique et l'adoption de mesures de contrôle à la source des eaux pluviales.

Pour modéliser la détérioration structurale des conduites d'égout, une méthodologie d'identification des facteurs d'impact (p.ex. âge, diamètre, etc.) significatifs est proposée. Cette méthodologie est basée sur le test du ratio de vraisemblance et le modèle de Cox, qui permet d'estimer la probabilité qu'une conduite soit dans un état structural donné en un temps donné en fonction de plusieurs variables. Appliquée aux conduites de deux réseaux d'égout québécois, cette méthodologie a démontré que, parmi les facteurs analysés, seul l'âge des conduites a un impact significatif sur la modélisation de la détérioration structurale de celles-ci. Pour les

conduites des réseaux évalués, l'ajout d'autres facteurs ne permet pas d'améliorer la prévision de leur état structural dans le temps.

La modélisation de la performance hydraulique est, quant à elle, basée sur des simulations hydrologiques/hydrauliques utilisant le modèle SWMM et des événements réels de récurrences allant de 2 à 5 ans. Pour cette partie, une seconde méthodologie est proposée pour : i) identifier les conduites hydrauliquement contraignantes et leur capacité hydraulique adéquate; et/ou ii) l'emplacement et la superficie nécessaire de pratiques de contrôle à la source (PCS) permettant d'éliminer les dysfonctionnements hydrauliques relevés dans un réseau donné. L'évolution de la performance hydraulique dans le temps est simulée en augmentant l'intensité des événements pluvieux d'un facteur issu des prévisions en termes de CC pour la zone d'étude. L'application de cette méthodologie à deux réseaux québécois : A et B, en considérant uniquement le remplacement des conduites, a permis d'identifier les tronçons de conduites ayant une capacité hydraulique actuelle ou future insuffisante. Selon cette méthode, 10 % de la longueur totale des conduites du réseau A est identifié contraignante (de capacité hydraulique insuffisante) à remplacer en conditions actuelles, contre 14 % pour le réseau B. La modélisation de la performance hydraulique incluant les pratiques de contrôle à la source a été appliquée au réseau A et a permis d'identifier les superficies et emplacements de pratiques de contrôle à la source permettant d'éliminer certains dysfonctionnements en conditions climatiques actuelles et futures, qui sont respectivement de 10 601 m<sup>2</sup> et 12 379 m<sup>2</sup>. Pour les deux réseaux, une augmentation de 15 % de l'intensité de l'événement pluvieux le plus problématique cause une augmentation significative des proportions de dysfonctionnements hydrauliques, de l'ordre de 28 % pour le réseau A et de 115 % pour le réseau B, et, par conséquent, des interventions de renouvellement nécessaires. Cela démontre l'importance de la prise en compte des CC dans la planification du renouvellement des conduites d'égout.

La planification intégrée du renouvellement des conduites a été appliquée au réseau A, pour qui la modélisation des deux performances structurale et hydraulique des conduites, compte tenu des CC, a été réalisée. Cette planification a permis de mieux choisir les options de renouvellement permettant de maintenir des performances structurale et hydraulique adéquates sur au moins 25 ans au moindre coût. Comparée à une approche de renouvellement classique, la planification intégrée offre une économie allant jusqu'à 33 % du budget nécessaire à

la remise du réseau A. Ces constats, en particulier concernant le gain économique, viennent confirmer et vérifier l'hypothèse de base du projet de doctorat.





## Abstract

A failing performance of sewer network components can result in a multitude of problems, such as roadway collapses, sewer back-ups, floods, and increasing volumes of untreated water discharged to receiving waters. All of these problems may represent a risk for public safety, economic development, and ecosystem quality. Due to climate change, particularly the expected increase in the frequency and/or intensity of intense rainfall events, the deterioration of hydraulic and environmental performances, and their consequences, are likely to further increase. The aforementioned problems could be alleviated by the adoption of a renewal strategy for sewer networks that is based on a preventive approach, including: i) the simultaneous consideration of hydraulic and structural performances of the pipes, and ii) the use of stormwater source control (SSC) practices. This could allow a better adaptation to the projected climate changes (CC) for maintaining at a more economical cost an acceptable level of overall sewer performance. An integrated sewer network renewal planning method is proposed in this thesis to verify this hypothesis. This planning method identifies the best interventions (type and moment of implementation) based on the simultaneous modeling of the structural and hydraulic performances of individual pipes. Two types of adaptations to CC are considered: pipe replacement with a larger hydraulic capacity and SSC practices.

The deterioration of the structural performance is modelled with a Cox model, which estimates the probability that a pipe is in a specific structural state at a given time, and depends on several factors or variables (e.g., age and diameter). Only factors which are considered influential on the sewer structural deterioration process, identified with a likelihood ratio test, are included in the model. The application of the structural performance model to two Canadian sewer networks demonstrated that the pipe age is the only influential factor for these two networks. Including the other factors in the model would not improve the estimation of the pipe structural performances over time.

The pipe hydraulic performance is modeled using hydrologic/hydraulic (SWMM) simulations with single observed rainfall events, of two to five year return periods as the input. For this performance model, a second methodology is proposed to identify: i) the hydraulically constraining pipes and their adequate hydraulic capacities; and/or ii) the best location and required area of the SSC practices to eliminate hydraulic dysfunctions. The evolution of the

hydraulic performance over time is simulated by increasing the intensity of the considered rainfall events by a factor depending on the CC predictions for the study area. The application of this methodology to two Canadian networks, A and B, only considering pipe replacement, lead to the identification of pipe sections with insufficient hydraulic capacity under current and future conditions. According to this method, under current conditions, 10% of the total length of the pipes in network A is identified as constraining, with replacement required, compared with 14% for network B. The hydraulic performance modeling, including SSC practices, was applied to network A. The model was used to determine the bioretention locations and areas needed to eliminate hydraulic dysfunctions under current and future conditions, which are about 10 601 and 12'379 m<sup>2</sup>, respectively. For both sewer networks, a 15% increase of the most problematic rain event intensity causes a significant increase in the proportion of hydraulic dysfunctions and therefore in the required upgrading interventions. The proportion of surcharged nodes increases by 28% for network A and 115% for Network B due to the increasing rainfall intensity. This demonstrates the importance of considering CC in sewer renewal planning.

The integrated renewal planning method was applied to network A, including the structural and hydraulic performances of the pipes, and considering CC. The proposed method allowed a better choice of renewal options that are required to maintain an adequate performance for the next 25 years at minimal cost. Compared to a traditional renewal approach, the integrated renewal planning provides an economy of about 33% of the needed cost to upgrade the hydraulic and structural sewer network. These findings, particularly the economic gain, confirm and verify the governing at the heart of this thesis.

# Table des matières

|       |                                                                                           |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction .....                                                                        | 1  |
| 2     | Revue de littérature .....                                                                | 5  |
| 2.1   | Drainage en milieu urbain .....                                                           | 5  |
| 2.2   | Dimensionnement des conduites .....                                                       | 6  |
| 2.3   | Performance et dysfonctionnement .....                                                    | 7  |
| 2.3.1 | Dysfonctionnement structural .....                                                        | 8  |
| 2.3.2 | Dysfonctionnement hydraulique .....                                                       | 9  |
| 2.4   | Gestion des actifs urbains : infrastructures souterraines.....                            | 10 |
| 2.4.1 | Gestion réactive .....                                                                    | 10 |
| 2.4.2 | Gestion proactive .....                                                                   | 10 |
| 2.5   | Modélisation de la détérioration de la performance des conduites d'égout .....            | 15 |
| 2.5.1 | Modélisation de la détérioration de la performance structurale .....                      | 15 |
| 2.5.2 | Modélisation de la détérioration de la performance hydraulique des conduites d'égout..... | 22 |
| 2.6   | Gestion des eaux pluviales en milieu urbain .....                                         | 25 |
| 2.6.1 | Gestion conventionnelle .....                                                             | 25 |
| 2.6.2 | Gestion durable.....                                                                      | 25 |
| 2.7   | Changements Climatiques .....                                                             | 26 |
| 2.7.1 | Modélisation du climat futur .....                                                        | 26 |
| 2.7.2 | Impact des changements climatiques sur le régime des précipitations .....                 | 28 |

|       |                                                                                                                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8   | Impact des changements climatiques sur les infrastructures de drainage urbain.....                                                                 | 29 |
| 2.9   | Mesures d'adaptation aux changements climatiques.....                                                                                              | 32 |
| 2.10  | Résumé.....                                                                                                                                        | 34 |
| 3     | Hypothèse, objectifs et originalité.....                                                                                                           | 35 |
| 3.1   | Hypothèse et objectifs.....                                                                                                                        | 35 |
| 3.2   | Originalité .....                                                                                                                                  | 35 |
| 4     | Méthodologie.....                                                                                                                                  | 39 |
| 4.1   | Identification des facteurs ayant un impact significatif sur la modélisation de la<br>détérioration structurale des conduites d'égout.....         | 41 |
| 4.1.1 | Description des données.....                                                                                                                       | 41 |
| 4.1.2 | Méthode proposée .....                                                                                                                             | 43 |
| 4.2   | Méthode d'évaluation et de prédiction de la performance hydraulique individuelle des<br>conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de CC ..... | 46 |
| 4.2.1 | Description des données.....                                                                                                                       | 46 |
| 4.2.2 | Méthode proposée .....                                                                                                                             | 49 |
| 4.3   | Méthode de planification intégrée de renouvellement des conduites des réseaux de<br>drainage urbain.....                                           | 52 |
| 4.3.1 | Description des données et site d'étude .....                                                                                                      | 52 |
| 4.3.2 | Méthode proposée .....                                                                                                                             | 53 |
| 4.3.3 | Avantages de l'approche proactive par rapport à une approche réactive traditionnelle .....                                                         | 61 |
| 5     | Résultats et discussion.....                                                                                                                       | 63 |
| 5.1   | Identification des facteurs ayant un impact significatif sur la modélisation de la<br>détérioration structurale des conduites d'égout.....         | 63 |

|       |                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.1 | Signification statistique des facteurs d'impact .....                                                                                                                                                                         | 63  |
| 5.1.2 | Synthèse des résultats des trois méthodes d'évaluation .....                                                                                                                                                                  | 66  |
| 5.2   | Méthodologie d'évaluation et de prédiction de la performance hydraulique individuelle<br>des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de CC.....                                                                        | 67  |
| 5.2.1 | Performance hydraulique globale des réseaux A et B .....                                                                                                                                                                      | 67  |
| 5.2.2 | Identification des conduites contraignantes.....                                                                                                                                                                              | 69  |
| 5.2.3 | Impact des changements climatiques.....                                                                                                                                                                                       | 70  |
| 5.3   | Méthodologie de planification du renouvellement des réseaux de drainage<br>urbain intégrant à la fois les facteurs structuraux et hydrauliques dans un contexte de CC et<br>l'adoption de nouvelles pratiques de gestion..... | 73  |
| 5.3.1 | Performance hydraulique et structurale des conduites d'égout.....                                                                                                                                                             | 73  |
| 5.3.2 | Avantages de l'approche proactive par rapport à l'approche réactive traditionnelle.....                                                                                                                                       | 76  |
| 6     | CONCLUSION.....                                                                                                                                                                                                               | 81  |
| 7     | Article I: Identification of most significant factors for modeling deterioration of sewer pipes .....                                                                                                                         | 87  |
| 7.1   | Introduction .....                                                                                                                                                                                                            | 91  |
| 7.2   | Methodology .....                                                                                                                                                                                                             | 96  |
| 7.2.1 | Case studies.....                                                                                                                                                                                                             | 96  |
| 7.2.2 | Estimation of significant influential factors .....                                                                                                                                                                           | 100 |
| 7.2.3 | Proposition of the Cox method to identify the significant influential factors .....                                                                                                                                           | 101 |
| 7.2.4 | Choice of the covariates and verification of the absence of correlations between them.....                                                                                                                                    | 104 |
| 7.2.5 | Calibration of the Cox model parameters.....                                                                                                                                                                                  | 105 |
| 7.2.6 | Determination of significance of each covariate .....                                                                                                                                                                         | 105 |
| 7.2.7 | Comparison of results with those of two simpler common methods .....                                                                                                                                                          | 106 |
| 7.3   | Results and discussion .....                                                                                                                                                                                                  | 109 |

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.1 Statistical significance of factors according to the proposed method using the Cox model .....                           | 109 |
| 7.3.2 Statistical significance of factors in Cox model without consideration of correlations between covariates.....           | 111 |
| 7.3.3 Statistical significance of factors in Cox model with consideration of correlations between covariates.....              | 113 |
| 7.3.4 Comparison of structural deterioration of pipes separated according to evaluated factors .....                           | 116 |
| 7.3.5 Comparison of distributions of factors classified by structural state .....                                              | 117 |
| 7.3.6 Comparison of results obtained from three methods .....                                                                  | 118 |
| 7.4 Conclusion .....                                                                                                           | 119 |
| 8 Article II: Predicting the individual hydraulic performance of sewer pipes in the context of climate change .....            | 125 |
| 8.1 Introduction.....                                                                                                          | 129 |
| 8.2 Review of previous studies evaluating the impact of CC on the hydraulic performance of sewer networks using HH models..... | 131 |
| 8.3 Methodology .....                                                                                                          | 133 |
| 8.3.1 Case studies.....                                                                                                        | 133 |
| 8.3.2 Rain events.....                                                                                                         | 134 |
| 8.3.3 Climate change impact.....                                                                                               | 137 |
| 8.3.4 Proposed method to assess the current and future hydraulic performance of sewer pipes .....                              | 138 |
| 8.4 Results and discussion .....                                                                                               | 142 |
| 8.5 Conclusion .....                                                                                                           | 150 |
| 9 Article III: Integrated renewal planning for sewer networks in a climate change context.....                                 | 153 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1 Introduction .....                                                                   | 157 |
| 9.2 Materials and methods.....                                                           | 160 |
| 9.2.1 Integrated renewal planning method .....                                           | 160 |
| 9.2.2 Hydraulic performance modeling .....                                               | 161 |
| 9.2.3 Structural state modeling.....                                                     | 163 |
| 9.2.4 Renewal planning steps .....                                                       | 163 |
| 9.2.5 Renewal planning performance and usefulness evaluation .....                       | 167 |
| 9.2.6 Case study area .....                                                              | 169 |
| 9.2.7 Rainfall events .....                                                              | 170 |
| 9.2.8 Stormwater source control parametrization .....                                    | 171 |
| 9.2.9 Costs .....                                                                        | 172 |
| 9.3 Results and discussion .....                                                         | 172 |
| 9.3.1 Hydraulic and structural performance of the sewer pipes network.....               | 172 |
| 9.3.2 Proactive approach usefulness compared with the traditional reactive approach..... | 175 |
| 9.4 Conclusion .....                                                                     | 180 |
| Annexe A :.....                                                                          | 195 |
| Annexe B :.....                                                                          | 201 |





## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 5-1. Résultats du test du ratio de vraisemblance pour les facteurs considérés pour les réseaux A et B.....                                                                                                     | 64  |
| Tableau 5-2. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les facteurs évalués pour les conduites de chaque réseau .....                                                                                                   | 66  |
| Tableau 5-3. Options de renouvellement permettant une performance acceptable sur 25 ans et leurs coûts moyens totaux selon l’approche réactive traditionnelle et l’approche proactive .....                            | 79  |
| Table 7-1. Summary of studies that assessed the impacts of different variables on the sewer structural deterioration process.....                                                                                      | 93  |
| Table 7-2 Characteristics of sewer pipes in Networks A and B .....                                                                                                                                                     | 98  |
| Table 7-3. Proportion of pipes in each structural state in different age ranges for Networks A and B.....                                                                                                              | 99  |
| Table 8-1. Characteristics of the selected six rainfall events, with return periods of two to five years for durations ranging from 5 min to 24 h .....                                                                | 136 |
| Table 8-2. Proportion of surcharged nodes and nodes at risk of flooding in Networks A and B for the six selected rainfall events and the short-term (H1) and long-term (H6) horizons .....                             | 143 |
| Table 8-3. Partial list of constraining pipes with their current and upgraded diameters for the six horizons for Network A (Event 2) and for Network B (Event 3) (~ means that the current diameter is adequate) ..... | 147 |
| Table 9-1. Parameter values of the bioretention cell layers in the SWMM model.....                                                                                                                                     | 172 |
| Table 9-2. Bioretention areas and locations required to eliminate some perimeter of influence under current and future climate conditions.....                                                                         | 173 |
| Table 9-3. Renewal options, to maintain an acceptable level of overall sewer performance over 25 years, and their total costs according to the traditional reactive and IRPM proactive approaches .....                | 177 |



## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2-1. Réseaux d'égout sanitaire, pluvial et unitaire (Source : <a href="http://ville.montreal.qc.ca">http://ville.montreal.qc.ca</a> )....                                                                                                                                                                                                          | 6  |
| Figure 2-2. Inspection télévisuelle d'une conduite d'égout avec différentes formes de dégradation structurale (tiré de Aquadata, 2013) .....                                                                                                                                                                                                              | 9  |
| Figure 4-1. Schématisation des objectifs du projet de recherche.....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| Figure 4-2. Caractéristiques physiques des conduites du réseau A .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 41 |
| Figure 4-3. Caractéristiques physiques des conduites du réseau B .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 42 |
| Figure 4-4. Illustration des divers temps modélisés (cas d'une conduite dans l'état 4-5 lors de son inspection; t.s. = temps de séjour; tiré de Duchesne et al., 2011).....                                                                                                                                                                               | 45 |
| Figure 4-5. Modèles SWMM pour les réseaux A (droite) et B (gauche).....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 47 |
| Figure 4-6. Profil de l'intensité (en mm/ au 5 min) de pluie des six événements.....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48 |
| Figure 4-7. Exemple de délimitation d'un dysfonctionnement hydraulique; identification de son nœud de référence et des conduites possiblement contraignantes .....                                                                                                                                                                                        | 50 |
| Figure 4-8. Méthode d'identification des conduites contraignantes de chaque zone de surcharge .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 52 |
| Figure 4-9. Événement de pluie, représentant les conditions actuelles et futures, utilisé pour évaluer la performance hydraulique du réseau d'égout étudié .....                                                                                                                                                                                          | 55 |
| Figure 4-10. Méthodologie d'identification de la localisation et de la superficie de PCS nécessaire à l'élimination des dysfonctionnements hydrauliques .....                                                                                                                                                                                             | 57 |
| Figure 4-11. Options de renouvellement possible pour une conduite donnée et ses conduites adjacentes en cas de dysfonctionnement hydraulique, en fonction de ses performances hydraulique et structurale actuelles et futures.....                                                                                                                        | 60 |
| Figure 5-1. Probabilité que les conduites du réseau B soient à l'état 4-5 (mauvais état structural), classées par (a) diamètre, (b) longueur (les courbes de probabilité pour les deux cohortes se chevauchent), (c) matériau et (d) type de conduite (les courbes de probabilité pour les conduites de types sanitaire et unitaire se chevauchent) ..... | 65 |
| Figure 5-2. Proportion de nœuds en charges et de nœuds à risque d'inondation aux horizons actuel (H1; t = 0 années) et futur (H6; t = 25 ans) pour les réseaux A (en haut) et B (en bas). ....                                                                                                                                                            | 68 |
| Figure 5-3. Exemple d'identification des conduites contraignantes pour le réseau A et l'événement EO11 à l'horizon H1 .....                                                                                                                                                                                                                               | 70 |

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 5-4. Proportion de longueur totale de conduites contraignantes pour les six événements et les six horizons (de H1 à H6) pour le réseau A (a) et le réseau B (b) .....           | 72  |
| Figure 5-5. Performances structurale et hydraulique des conduites d'égout en conditions (a) futures et (b) actuelles .....                                                             | 75  |
| Figure 5-6. Emplacement et types d'options de renouvellement pour les conditions actuelles, tels qu'identifiés par la méthodologie de planification intégrée de renouvellement .....   | 80  |
| Figure 7-1. Illustration of methodology for the identification of the influential factors that should be taken into account for predicting the deterioration state of sewer pipes..... | 100 |
| Figure 7-2. Proportion of pipes assigned to structural states 0 (very good), 1 (good), 2-3 (fair), and 4-5 (poor) for Network A. ....                                                  | 115 |
| Figure 7-3. Probability that pipes of Network A will be in state 4-5 (poor structural state), classified by (a) diameter, (b) sewer type, (c) material and (d) length .....            | 116 |
| Figure 8-1. SWMM hydraulic models of Networks B (left) and A (right) .....                                                                                                             | 134 |
| Figure 8-2. Rainfall series (5-min time step) of the six rainfall events used in the analyses.....                                                                                     | 137 |
| Figure 8-3. Perimeter of influence of hydraulic dysfunctions .....                                                                                                                     | 139 |
| Figure 8-4. Method for identifying the pipes responsible for a hydraulic dysfunction (constraining pipes) .....                                                                        | 141 |
| Figure 8-5. Horizons for the evaluation of the hydraulic performance in the context of CC.....                                                                                         | 142 |
| Figure 8-6. Identified constraining pipes for HDsf caused by Event 1 at the first horizon (H1) in Network A.....                                                                       | 145 |
| Figure 8-7. Proportion of total length constraining pipes for the six events and over the six horizons for Networks A (a) and B (b) .....                                              | 148 |
| Figure 8-8. Identified constraining pipes (in red) for the first and the sixth horizons using Event 2 for Network A .....                                                              | 149 |
| Figure 8-9. Identified constraining pipes (in red) for the first and the sixth horizons using Event 3 for Network B .....                                                              | 150 |
| Figure 9-1. Horizons for the prediction of the structural and hydraulic performance and the planning of renewal interventions .....                                                    | 161 |
| Figure 9-2. Diagram showing the methodology used and the steps considered in the proposed integrated sewer renewal planning .....                                                      | 166 |
| Figure 9-3. Diagram of the steps to identify the best renewal option in Figure 9-2.....                                                                                                | 167 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 9-4. Cost calculation for the traditional reactive renewal approach .....                                                                      | 169 |
| Figure 9-5. SWMM model of the case study network.....                                                                                                 | 170 |
| Figure 9-6. Rain events representing current and future climate conditions .....                                                                      | 171 |
| Figure 9-7. Renewal options identified for hydraulic dysfunctions with or without SSCs for the studied network under current climatic conditions..... | 174 |
| Figure 9-8. Pipes of the studied network in structural state 4 in current and future conditions                                                       | 175 |
| Figure 9-9. Current renewal option locations according to the integrated renewal planning ...                                                         | 180 |



## Listes des abréviations

CC : changements climatiques

CC : climate change

CMT : coût moyen total

CPC : conduites possiblement contraignantes

CS : contrôle à la source

DC : delta change

DCFs : delta-change factors

EOI : événements observés isolés

EP: evaluated pipes

GES : gaz à effet de serre

GHG : greenhouse gas

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

HA : horizon actuel

HDsf : hydraulic dysfunction

HF : horizon futur

HH : hydrologique/hydraulique ; hydraulic/hydrological

HS : host subcatchments

HSP : hydraulic and structural performance

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

Imax\_5min : maximal intensity over 5 min

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IRPM : Integrated renewal planning method

M\_CPC : matrice de combinaisons des CPC

MCG : modèles de circulation générale

MOR : meilleures options de renouvellement

MPE : most problematic event

MRC : modèles régionaux du climat

MTCs : mean total costs

NRF : node at risk of flooding

$P_1$  : upstream-most pipe in the ensemble of potentially constraining pipes

PCC : pluie de conception Chicago

PCS : pratiques de contrôle à la source

PCP : potentially constraining pipe

PDF : probability density functions

$P_{DW}$  : vector of pipes downstream of  $P_n$  having the same diameter as  $P_n$

PI : perimeter of influence

PIR : planification intégrée de renouvellement

$P_n$  : downstream-most pipe in the ensemble of potentially constraining pipes

RCP : representative concentration pathways

RN : reference node

SIT : superficie imperméable totale

SN : surcharged node

SORE : single observed rainfall event

SPO : série de pluie observée

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

SSC : Stormwater source control

SWMM : Storm Water Management Model



SZ : surcharge zone

TLCP : total length of constraining pipes

ZS : zone de surcharge

## 1 Introduction

La gestion des infrastructures de drainage urbain représente un grand défi. Le vieillissement de ces infrastructures accroît les besoins financiers essentiels à leur renouvellement et nécessite un ajustement des outils de gestions disponibles. La mauvaise performance des réseaux d'égout peut entraîner une multitude de problèmes, tels que les effondrements de chaussée, les refoulements d'égout, les inondations et l'augmentation des volumes d'eau usée rejetés aux milieux récepteurs. Tous ces problèmes liés à l'intégrité structurale et/ou fonctionnelle des conduites d'égout risquent de s'accroître en raison de l'évolution des conditions climatiques, en particulier les événements pluvieux intenses. Ces problèmes représentent un risque pour la sécurité des citoyens, le développement économique et la qualité des écosystèmes.

Une gestion du renouvellement des réseaux d'égout basée sur une approche préventive et adoptant les nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales pourrait limiter les problèmes cités précédemment et pourrait permettre de maintenir un niveau de performance acceptable (capacité du réseau à acheminer les débits générés par un événement de pluie de conception donné sans surcharge ni inondation dans le réseau et sans défauts structuraux majeurs) de ces réseaux en s'adaptant au mieux aux changements climatiques (CC) projetés. C'est dans cette optique que nous proposons une planification intégrée du renouvellement des conduites des réseaux d'égout qui considère la prise en compte et la modélisation des processus de détérioration de l'état structural et de la performance hydraulique simultanément, dans un contexte de CC. Cette planification consiste à identifier les conduites nécessitant une intervention rapide et à programmer, à la lumière de la modélisation de la performance future, les meilleures interventions à mettre en œuvre en fonction de plusieurs critères.

Ce manuscrit s'articule autour de deux parties distinctes. La **première partie** dresse une synthèse du projet de recherche. Cette synthèse est scindée en plusieurs sections : i) le Chapitre 2 présente une revue de littérature portant sur deux volets distincts. Un volet concernant les outils de gestion des actifs urbains et les modèles de détérioration de l'état structural et de la performance hydraulique. L'autre volet présente un bref aperçu des techniques de gestion des eaux pluviales en milieu urbain, des changements prévus dans les conditions climatiques, en particulier les précipitations, de l'impact de ces changements sur la performance des réseaux de drainage urbains et des différents moyens de s'y adapter; ii) le Chapitre 3 expose l'hypothèse de

base, les objectifs et les éléments originaux du projet de recherche; iii) le Chapitre 4 décrit la méthodologie proposée pour la réalisation de chaque objectif et présente les données qui seront utilisées; iv) le Chapitre 5 résume les résultats obtenus pour chaque objectif; et, finalement, v) le Chapitre 6 correspond à la conclusion. La **deuxième partie** du document présente, quant à elle, les articles publiés ou soumis à des revues avec comité de lecture par les pairs. Elle reprend les points méthodologiques détaillés et l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce projet de thèse.

## **PARTIE I : SYNTHÈSE**



## 2 Revue de littérature

### 2.1. Drainage en milieu urbain

Le drainage en milieu urbain a pour fonction de recueillir les eaux pluviales et usées et de les acheminer vers un milieu récepteur, après traitement ou non, afin d'assurer la sécurité civile, l'hygiène et la protection de l'environnement. Ces objectifs se réalisent essentiellement par : 1) la réduction des risques d'inondation en milieu urbain; 2) l'élimination du contact entre les eaux usées et les citoyens; et 3) la gestion et l'évacuation de ces eaux dans l'environnement. Pour ce faire, il existe trois principaux types de réseaux de drainage urbain, soit les types : pluvial, sanitaire et unitaire (Figure 2-1). Le premier permet de drainer uniquement les eaux pluviales, le second transporte les eaux sanitaires d'origines domestiques, industrielles et/ou en provenance des commerces (Brière, 2006), tandis que le troisième combine à la fois les eaux usées et pluviales. La construction de réseaux unitaires n'est plus autorisée, du moins pour les nouveaux développements urbains au Québec (Mailhot et Duchesne, 2005). Lorsqu'il s'agit des eaux du réseau pluvial, on les a longtemps acheminées directement vers le milieu récepteur sans suivre aucun processus de traitement. Elles devenaient ainsi une source potentielle de pollution dans les plans d'eau récepteurs en raison de leur teneur parfois élevée en polluants (Walsh *et al.*, 2005). Cependant, les eaux des réseaux sanitaires passent obligatoirement, au Canada, par des stations d'épuration pour atteindre un niveau de qualité acceptable avant d'être rejetées dans le milieu récepteur. C'est aussi le cas pour les eaux des réseaux unitaires. Toutefois, en temps de pluie, la capacité de transport des conduites d'égout unitaires ainsi que la capacité de l'usine de traitement sont parfois dépassées, ce qui donne lieu à des déversements d'eau non traitée vers les milieux récepteurs.

Les réseaux de drainage se composent principalement de conduites souterraines, de rues, de bassins de rétention et de fossés de drainage. En plus de ces principales composantes, on retrouve d'autres ouvrages jouant le rôle d'interface entre elles, telles que les grilles de rue et les puisards (MDDEP et MAMROT, 2011). Ces réseaux comportent aussi des regards d'accès, des stations de pompage et différents autres ouvrages de contrôle (Bengassem, 2001). Dans ce document, les infrastructures souterraines sont le principal sujet d'étude; les autres types

d'infrastructure de drainage ne sont considérés qu'en fonction de leur lien étroit avec les infrastructures souterraines.



Figure 2-1. Réseaux d'égout sanitaire, pluvial et unitaire (Source : <http://ville.montreal.qc.ca>)

Les conduites souterraines faisant partie des trois types de réseau de drainage sont généralement conçues pour une durée de vie de 50 à 100 ans et même plus (Zhou *et al.*, 2012; Zhao, 1998). On retrouve des conduites de divers matériaux et diamètres. Selon une étude réalisée par l'Institut de recherche en construction (IRC) (McDonald, 1998), couvrant 38 municipalités canadiennes, le matériau le plus utilisé dans les conduites souterraines de drainage est le béton (armé ou non armé). En général, le choix du type de matériau dépend de l'usage de la conduite, de la nature du sol, de l'année d'installation, de la profondeur d'enfouissement de la conduite et du niveau de la nappe phréatique. McDonald (1998) a montré que 43 % des conduites d'égout pluvial ont un diamètre compris entre 450 et 900 mm. Tel que détaillé ici-bas, le choix du diamètre repose essentiellement sur la capacité hydraulique requise pour le transport des débits de conception.

## 2.2. Dimensionnement des conduites

Les conduites, ainsi que toutes les autres composantes des réseaux pluviaux et unitaires, sont généralement conçues en fonction des caractéristiques physiques des sols, de l'emplacement géographique, de l'usage prévu de la conduite (nature d'eau acheminée), de considérations économiques (McDonald, 1998) et des volumes et débits qu'elles devront acheminer (Mailhot et Duchesne, 2010; Rosenberg *et al.*, 2010; Mailhot *et al.*, 2007b). Plus précisément, pour les conduites pluviales et unitaires, le diamètre des conduites est déterminé afin qu'elles puissent

acheminer un débit critique correspondant à une pluie de récurrence donnée (concept de la période de retour). L'intensité de pluie correspondant à cette fréquence, et par conséquent les débits à transiter, est déterminée sur la base d'analyses statistiques des précipitations enregistrées à une station donnée au cours d'une longue période. Les résultats de ces analyses sont résumés sous forme de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Même si ces courbes sont construites à partir des événements passés, on fait la plupart du temps l'hypothèse qu'elles demeurent valides pour l'estimation de la relation entre l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux qui surviendront durant la période où l'installation sera fonctionnelle. On considère donc généralement que les courbes IDF restent inchangées dans le temps, c'est-à-dire que le climat est stationnaire (Mailhot et Duchesne, 2010; Mailhot *et al.*, 2007a). Historiquement, cette hypothèse a été retenue puisque rien n'indiquait qu'elle puisse être remise en question et aussi en raison de la simplicité de son application (Mailhot et Duchesne, 2010). Cependant, tel que discuté plus en détail à la section 2.7.1, plusieurs chercheurs (dont Mailhot *et al.*, 2007a; Grum *et al.*, 2006) ont montré que la période de retour pour une intensité donnée diminuera considérablement au cours des prochaines décennies à cause des CC et certains auteurs (dont Arnbjerg-Nielsen, 2011 et Mailhot et Duchesne, 2010) ont suggéré que la non-stationnarité dans les données climatiques soit prise en compte dans le dimensionnement des conduites de drainage en milieu urbain.

### **2.3. Performance et dysfonctionnement**

Le remplacement ou la réhabilitation d'une conduite souterraine de drainage devient nécessaire lorsque celle-ci ne satisfait plus les critères de performance attendus. Les dysfonctionnements des conduites de drainage peuvent être de natures hydraulique, structurale ou environnementale. Ces dysfonctionnements sont quantifiés à partir de l'écart entre l'état réel (performance actuelle) et l'état prévu (performance optimale) (Bengassem, 2001; Ennaouri, 2010). Seuls les dysfonctionnements structural et hydraulique sont considérés et décrits dans la suite de ce document.

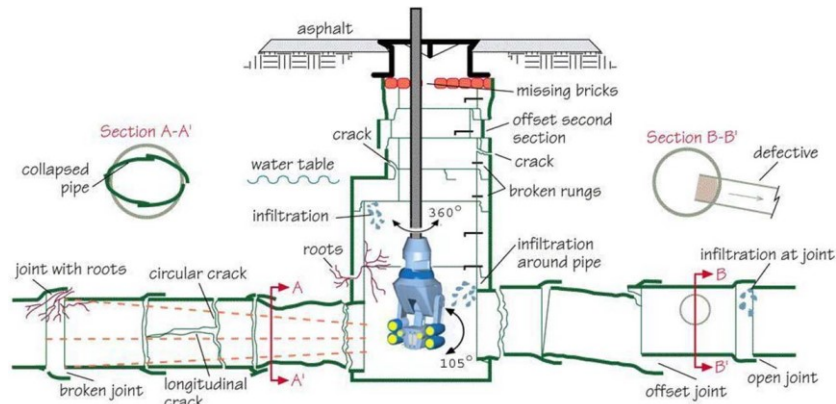


### 2.3.1 Dysfonctionnement structural

Généralement, les dégradations structurales sont en relation directe avec l'état physique d'une conduite. Elles peuvent résulter d'un ou de la combinaison de plusieurs facteurs tels que : le vieillissement de la conduite, les attaques chimiques, les défauts de conception, la mauvaise manipulation lors de l'installation, une surcharge excessive, la nature du sol entourant la conduite ou encore les activités tectoniques ou sismiques (Lubini, 2010). Le *Water Research Center* (WRc) propose de séparer le processus de détérioration structurale en trois étapes (Serpente, 1994) :

- 1- Apparition d'un défaut initial (fissure causée par une charge verticale excessive, mauvaises pratiques de construction, dommages causés lors des connexions, etc.);
- 2- Début de la détérioration du matériau suite à l'apparition du défaut initial ;
- 3- Rupture de la conduite, la phase finale, qui survient généralement suite à un événement aléatoire (imprévu).

Les sous-performances structurales se manifestent par : 1) une fissure voire une cassure souvent accompagnée d'infiltration; 2) une déformation ou une réduction de la section d'écoulement de la conduite, qui entraîne une réduction de la capacité hydraulique et une surcharge en certains tronçons; 3) un effondrement ou un bris de conduite dû à une cassure multiple, etc. (Lubini, 2010; Zhao *et al.*, 2001). La plupart des dommages structuraux (voir Figure 2-2) peuvent être observés lors des inspections des conduites souterraines. Ces inspections sont généralement faites de manière visuelle, soit directe ou à l'aide de caméras tractées ou immobiles (Figure 2-2). Les observations enregistrées lors de l'auscultation sont ensuite traduites par des cotes d'état. Ces cotes sont standardisées par des systèmes de pointage. Ainsi, selon les systèmes du WRc (1994; 2004) et du CERIU (2004) une conduite à l'état 1 est une conduite en bon état, une conduite à l'état 2 ou 3 est une conduite dans un état intermédiaire, tandis qu'une conduite à l'état 4 ou 5 devient une conduite en mauvais à très mauvais état, qui nécessite une réparation ou un remplacement.



Traduction en français :

asphalt : asphalte ; broken joint : joint défectueux ; broken rungs : échelons cassés ; circular crack : fissure circulaire ; collapsed pipe : conduite effondrée ; crack : fissure ; defective : défectueux ; infiltration : infiltration ; infiltration around pipe : infiltration autour de la conduite ; infiltration at joint : infiltration au niveau du joint ; joint with root : intrusion racinaire au niveau du joint ; longitudinal crack : fissure longitudinale ; missing bricks : briques manquantes ; offset joint : joint décalé ; offset section : section décalée ; open joint : joint ouvert ; roots : racines ; section : section ; water

**Figure 2-2. Inspection télévisuelle d'une conduite d'égout avec différentes formes de dégradation structurale (tiré de Aquadata, 2013)**

### 2.3.2 Dysfonctionnement hydraulique

Le premier type de cause des dysfonctionnements hydrauliques des réseaux de drainage urbains est associé à des éléments structuraux pouvant causer une diminution du rayon hydraulique et/ou une augmentation du coefficient de rugosité (Tran *et al.*, 2010), ce qui peut générer des inondations, des fuites et des refoulements d'égout. Les principaux défauts ou causes de ce type de dysfonctionnement sont : 1) l'intrusion racinaire dans les collecteurs; 2) le dépôt de débris, de calcaire et de sédiments; 3) l'infiltration d'eau souterraine par les défauts structuraux et les joints défectueux lors de la montée du niveau de la nappe; et 4) bien d'autres raisons liées aux raccordements et aux produits d'étanchéité qui entraînent une réduction de l'aire transversale et donc une diminution de la capacité d'écoulement et une augmentation des risques de surcharge (Lubini, 2010; Tran *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2001).

Une sous-performance hydraulique peut également être due à des débits d'eau de ruissellement supérieurs à ceux prévus lors de la conception des conduites souterraines des réseaux pluviaux et unitaires. L'augmentation des débits est généralement causée par une imperméabilisation des surfaces plus importantes que celle initialement prévue ou encore par une augmentation de l'intensité des événements pluvieux correspondant à la période de retour de conception. En

effet, tel que discuté en détail à la section 2.7.1, nous assistons depuis les dernières décennies à un net CC accompagné par une croissance de la fréquence des événements pluviométriques intenses dans plusieurs régions de la planète (Min *et al.*, 2011; Madsen *et al.*, 2009; GIEC, 2007; Denault *et al.*, 2006; Groisman *et al.*, 2005). L'augmentation des volumes et des débits de ruissellement résultant de l'augmentation de l'intensité des événements pluvieux et de l'augmentation des surfaces imperméabilisées peut entraîner : 1) une surcharge hydraulique des conduites causant des dommages structuraux (exfiltration qui conduit à l'instabilité de l'assise de la conduite), des dommages fonctionnels (débordements ou refoulements et inondations) et des dommages environnementaux (érosion aux sites de rejets); 2) une élévation du niveau de la nappe phréatique pouvant provoquer une augmentation des risques d'infiltration; et 3) l'apport de grandes quantités de débris (sédiments, déchets, etc.) qui favorisent l'obstruction des conduites. Toutes ces conséquences représentent des risques pour l'environnement, pour la sécurité des citoyens et pour le développement économique et nécessitent l'élaboration d'un plan de gestion et de renouvellement qui considère à la fois les critères structuraux et hydrauliques dans un contexte de CC.

## **2.4. Gestion des actifs urbains : infrastructures souterraines**

Les réseaux de drainage urbains, en particulier les conduites souterraines, peuvent être gérés de manière réactive ou proactive.

### **2.4.1 Gestion réactive**

Selon ce type de gestion, utilisé surtout par le passé, les réparations ou les remplacements ne sont en général effectués qu'en cas de détérioration sévère et souvent réalisés en urgence. Tel que démontré par plusieurs auteurs, cette approche s'avère à la fois non optimale d'un point de vue économique et non sécuritaire (Ana et Bauwens, 2010 ; Wirahadikusumah, 2001).

### **2.4.2 Gestion proactive**

La gestion proactive est de plus en plus adoptée par les gestionnaires pour éviter les détériorations structurales majeures, les défaillances prématurées et imprévues, et les conséquences qui leur sont associées (Ana et Bauwens, 2010). Cette approche vise à prévoir les

besoins de dépenses futures et à établir un plan de gestion préventif pour maintenir un niveau de service acceptable des réseaux d'égout (Baik et al., 2006). Certains chercheurs ont soulevé le bénéfice que peuvent tirer les municipalités de l'adoption de l'approche proactive ne serait-ce que pour planifier les futures inspections des conduites souterraine (Ahmadi *et al.* 2015; Fuchs-Hanusch *et al.*, 2015). Ce type de gestion a donné naissance à plusieurs outils, classés par Ana et Bauwens (2007) en trois groupes selon les étapes de gestion qu'ils contiennent.

- **Groupe 1**

Les outils de gestion du groupe 1 couvrent l'ensemble des étapes de gestion définies par Lemer (2000), soient : 1) la collecte et l'analyse des données; 2) la modélisation de la performance; 3) la génération de scénarios et d'alternatives de gestion; 4) l'analyse décisionnelle; et 5) la gestion de l'information et des rapports. Les principaux outils de ce groupe actuellement disponibles sont CARE-S (*Computer-Aided Rehabilitation of Sewer Networks*) (Saegrov, 2006), AWARE-P (AWARE-P, 2009), CapPlan Sewer (capital planning tool for sewer system) (Innovyze, 2018) et Hydroplan (De Gueldre *et al.*, 2007). Les systèmes européens de soutien décisionnel et de gestion proactive CARE-S, AWARE-P et Hydroplan sont très peu utilisés à cause du volume important de données que leur mise en place requiert et de leur architecture complexe (Ana et Bawens, 2007). L'objectif du CARE-S est d'assurer qu'une conduite critique est réhabilitée au moment optimal en utilisant la technologie la plus appropriée (Saegrov, 2006). CARE-S a été utilisé par Hlavinek *et al.* (2006) dans le cadre de la gestion du réseau d'égout d'une municipalité située en République Tchèque. Les auteurs ont souligné les différents atouts de cet outil, à savoir : le stockage des informations concernant les conduites d'égout dans une seule base de données, sa richesse par rapport aux nombreuses technologies de réhabilitation proposées, la diversité des aspects utilisés pour l'évaluation des performances du réseau, la simplicité et la convivialité de son interface, la possibilité de visualiser des résultats avec un système d'information géographique (SIG) et son utilité dans l'aide à la prise de décision, qui revient au final à l'utilisateur.

L'autre outil de gestion mentionné plus haut, Hydroplan, permet de dresser une liste de mesures à court terme et une stratégie de maintenance à court et long termes en vue d'améliorer le niveau de performance du réseau (De Gueldre *et al.*, 2007). Il comporte trois principales étapes. La première permet d'actualiser ou de constituer une base de données de l'état physique actuel

et historique du réseau d'égout et l'inventaire des problèmes signalés par le passé de ce réseau. La seconde étape consiste à estimer les probabilités d'apparition de défaillances structurales, hydrauliques et environnementales, auxquelles sont attribuées des scores selon la nature de ces impacts. Ces scores sont combinés en un score de risque global à la troisième et dernière étape. Lors de cette même étape, les égouts les plus critiques sont identifiés et des solutions appropriées sont proposées pour diminuer le risque de défaillance associé (De Gueldre *et al.*, 2007).

AWARE-P (AWARE-P, 2009) est basé sur : i) l'analyse des défaillances à l'aide du processus d'extension linéaire de Yule, ii) l'analyse du risque pour des composantes individuels d'un réseau ou d'un réseau entier (conduites d'eau ou d'eaux usées) et iii) la modélisation de la performance hydraulique utilisant le modèle SWMM et la comparaison des coûts des options de renouvellement (Vladeanu et Matthews, 2018).

CapPlan, développé par MWHSoft en 2007, prend en compte les informations issues du système d'information géographique, d'inspections télévisuelles et PACP (Pipeline Assessment and Certification Program) pour estimer le score de risque des conduites en fonction des probabilités et des conséquences des dysfonctionnements. Il intègre également la modélisation de la performance hydraulique afin de prioriser la réhabilitation et le remplacement des conduites d'égout, sur la base d'algorithmes d'arbre décisionnel (Vladeanu et Matthews, 2018; Innovyze, 2018).

- **Groupe 2**

Les outils de gestion du groupe 2 comportent seulement les quatre premières étapes de gestion du groupe 1 (Ana et Bauwens, 2007), c'est-à-dire qu'ils ne s'attardent pas à la gestion de l'information et des rapports. Les principaux outils appartenant à ce groupe sont décrits dans les paragraphes suivants.

Le premier exemple d'outil appartenant à ce groupe, appelé PRISM (*Proactive Rehabilitative Infrastructure Sewer Management*), a été développé par Ariaratnam et McLeod (2002) pour planifier et optimiser l'allocation des dépenses financières pour la réhabilitation des conduites d'égout de la ville d'Edmonton au Canada. Il a pour objectif de minimiser les dépenses en priorisant les investissements de réhabilitation des conduites d'égout.

Le second exemple d'outil appartenant à ce groupe est AQUA-WertMin de Baur et Herz (2002), qui est un outil de planification des auscultations télévisuelles, des réhabilitations et des nouvelles constructions de réseau d'égout. Il se base sur un modèle de survie pour le calcul de la transition d'une classe d'état structural à une autre en fonction du temps afin de prévoir l'évolution dans le temps de la détérioration des conduites et les besoins futurs de réhabilitation. De plus, basé sur une analyse économique, ce dernier permet à l'utilisateur de comparer les coûts des stratégies de réadaptation (Ana et Bawens, 2007; Baur et Herz, 2002).

Finalement, on retrouve dans ce groupe le système APOGEE (Rommel *et al.*, 1989), qui est un outil d'optimisation de la planification annuelle des opérations et de réhabilitation des réseaux d'égout, développé en France. Comparable aux précédents, ce dernier comporte : une base de données résumant les informations recueillies pendant les campagnes d'inspections; un système de diagnostic et de modélisation de l'état des conduites basé sur les données incluses dans la base de données et sur les mécanismes affectant le processus de défaillance des conduites (hydrologie et hydrogéologie du bassin drainé, excès de charge sur le réseau, agressivité de l'effluent, écoulement sous pression dans le collecteur et historique des modes de construction); et un module de planification basé sur une approche multicritère pour le choix et l'évaluation de la technique de réhabilitation (Ana et Bauwens, 2007; Rommel *et al.*, 1989).

- **Groupe 3**

Le groupe 3 inclut les outils qui n'intègrent que les deux premières étapes de gestion du groupe 1, à savoir la collecte et l'analyse des données et la modélisation de la performance (Ana et Bauwens, 2007). Hasegawa *et al.* (1999; cité dans Ana et Bauwens, 2007), Bengassem (2001) et Baik *et al.* (2006) ont proposé des outils de ce type. Le modèle d'Hasegawa *et al.* (1999) permet de prioriser les réparations des conduites d'égout existantes, en se basant sur : 1) la diminution de la capacité d'écoulement; 2) la possibilité d'effondrement; 3) les risques de débordement des égouts et d'inondations; et 4) l'augmentation du coût de traitement en raison des apports externes et de l'infiltration. Le modèle de Bengassem (2001) évalue pour sa part le niveau de performance globale d'un système d'égout en se basant sur le calcul d'indices de performances structurale, hydraulique et globale (combinaison des critères structuraux et hydrauliques) des conduites d'égout. Cette évaluation est réalisée à l'aide d'un système expert basé sur une approche de logique floue. Le calcul des indices de performance structurale intègre des facteurs extrinsèques (facteurs géotechniques et hydrogéologiques, charges statiques et

dynamiques, risques sismiques, etc.), des facteurs intrinsèques (défauts structuraux apparents) et la localisation spatiale de la conduite.

Certains outils, non classés par Ana et Bauwens (2007), peuvent être considérés comme faisant partie du groupe 3. Par exemple, RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains; Le Gauffre *et al.*, 2004) et INDIGAU (Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains; Le Gauffre *et al.*, 2010), sont des outils qui visent à définir des priorités d'inspection et de réhabilitation des tronçons de conduites en se basant sur plusieurs indicateurs de performance (Ibrahim, 2008). Des outils équivalents ont été proposés par Ben Tagherouit *et al.* (2011), qui propose une version améliorée du modèle de Bengassem (2001) par la révision du calcul de la performance hydraulique, et par Ennaouri et Fuamba (2013).

D'autres outils, dont certains très récents, basés sur des approches d'optimisation ont été proposés et peuvent aussi être considérés du groupe 3 (Halfawy *et al.*, 2008 et 2009; Vojinovic *et al.*, 2014; Baah *et al.*, 2015; Van Riel, 2017; Yazdi *et al.*, 2017a/2017b; Yazdi, 2018; Diogo, 2018; Mohammadiun *et al.*, 2018). Prenons l'exemple de l'outil proposé par Baah *et al.* (2015), dans l'optique d'une meilleure gestion et allocation des ressources de réhabilitation et de réparation des conduites d'égout. Ces auteurs ont développé une méthodologie basée sur l'évaluation du risque de dysfonctionnement pour produire une cartographie du risque pour un réseau donné. Dans cet outil, le risque de dysfonctionnement des conduites sanitaires est calculé en fonction de la probabilité du dysfonctionnement d'une conduite et des conséquences du dysfonctionnement. Ce risque est estimé à l'aide d'un modèle de logique floue. Récemment, Anbari *et al.* (2017) ont développé un modèle d'évaluation du risque de dysfonctionnements structural et hydraulique, basée sur les probabilités de ceux-ci et les conséquences qui leur sont associées, permettant de mieux planifier les futures inspections. Le calcul des probabilités de dysfonctionnement, dans ce modèle, est fait à l'aide d'un modèle graphique probabiliste (réseau bayésien : ensemble de nœuds ou variables reliées entre elles par des relations de causalité) construit, entre autres, sur la base de l'opinion d'experts. Dans les deux études citées ci-dessus, les modèles de prévision de l'état structural sont calibrés à l'aide des données observées résultantes d'inspections télévisuelles.

Afin de réaliser une gestion proactive, la plupart de ces outils nécessitent de prévoir la performance structurale et hydraulique future des conduites souterraines. Ils ont donc recours à

des modèles spécifiques de prévision de la détérioration structurale et à des modèles de prévision ou d'évaluation de la performance hydraulique des composantes souterraines des réseaux de drainage urbain. Ces modèles sont présentés plus en détail à la section suivante.

## **2.5. Modélisation de la détérioration de la performance des conduites d'égout**

### **2.5.1 Modélisation de la détérioration de la performance structurale**

Ana et Bauwens (2010) ont classé les modèles mathématiques concernant l'évolution de la détérioration de la performance structurale en trois catégories : 1) les modèles physiques, basés sur la compréhension des mécanismes physiques régissant la détérioration des conduites, tel que ExtCorr de Konig (2005); 2) les modèles d'intelligence artificielle, parmi lesquels on peut citer le réseau de neurones de Tran *et al.* (2006) et les modèles basés sur les forêts d'arbres décisionnels de Baah *et al.* (2015) et de Caradot *et al.* (2018); et 3) les modèles statistiques, qui présentent une affinité avec les données disponibles pour décrire l'état des conduites. Ces modèles sont moins coûteux en termes de quantités de données par rapport aux modèles physiques et d'intelligence artificielle. Ils nécessitent moins de calcul comparativement aux modèles physiques. De plus, les modèles statistiques sont plus robustes pour traiter des données ordinales et tiennent compte de la nature probabiliste du processus de détérioration sous-jacent (Tran, 2006). Dans le présent document, seuls les modèles statistiques seront abordés plus en détail.

#### *Les modèles statistiques*

Les modèles statistiques sont les modèles les plus utilisés pour prédire l'état structural des conduites d'égout et d'autres infrastructures telles que les ponts et les chaussées (Duchesne *et al.*, 2011; Madanat *et al.*, 1995). Certains de ces modèles prévoient l'état futur d'un groupe de conduites ayant des caractéristiques physiques et fonctionnelles communes (cohortes) ou d'un réseau entier. Il s'agit alors de modèles de groupe, qui sont particulièrement utiles dans l'évaluation du budget futur de réhabilitation et d'entretien. D'autres prévoient l'état futur d'une seule conduite et sont ainsi souvent appelés « les modèles individuels ». Ces derniers sont mieux adaptés à l'optimisation de l'entretien et de la réhabilitation du réseau, car ils permettent le classement des conduites en fonction des priorités d'intervention (Ana et Bauwens, 2010).



La majorité des modèles statistiques sont probabilistes et fondés sur la notion de gestion de risque (Ana et Bauwens, 2010). Parmi ceux-là, on trouve : 1) les modèles de survie, tel celui de Baur et al. (2004), celui de Duchesne et al. (2013) et celui de Ugarelli et al. (2013); 2) les modèles de Markov, par exemple ceux de Caradot et al. (2017), Rokstad and Ugarelli (2015), Le Gat (2008), Baik et al (2006), Wirahadikusumah et al. (2001) et Ross (2000); 3) les modèles semi-Markoviens, tel que le modèle de Kleiner (2001); 4) les modèles basés sur la régression logistique, multiple ou ordinale, parmi lesquels on peut citer les modèles de Elmasry et al. (2017), Fuchs-Hanusch et al. (2015), Tscheikner-Gratl et al. (2014), Salman and Salem (2012), Lubini et Fuamba (2011), Younis and Knight (2010), Ana et al. (2009), Chughtai and Zayed (2008), Baik et al. (2006), Tran et al. (2006), et Ariaratnam et al. (2001); et 5) les modèles de classification, tel que celui de Harvey and McBean (2014).

Tous ces modèles statistiques utilisent les données sur l'état des conduites recueillies lors de programmes d'inspections (p. ex. conduite dans l'état structural 1, 2, 3, 4 ou 5) en parallèle avec des critères physiques (p. ex. âge, diamètre, longueur, type de matériaux, etc.), environnementaux (p. ex. nature du sol, niveau de trafic à proximité) et fonctionnels (p. ex., type de conduite) pour décrire leur processus de détérioration structurale. Ces modèles utilisent parfois des informations sur l'état du fonctionnement hydraulique des conduites (Wirahadikusumah *et al.*, 2001). Leur performance est fortement dépendante de la disponibilité quantitative et qualitative des données (Ana et Bauwens, 2010). Seule la modélisation statistique basée sur les modèles de survie est considérée dans le cadre de ce projet. Ce type de modèles s'ajuste facilement à la nature des données disponibles relevées lors des campagnes d'inspections télévisuelles et peuvent intégrer des données de nature à la fois qualitative et quantitative. Des détails et des exemples d'applications de ce type de modèles sont donnés dans la section suivante.

- **Les modèles de survie**

Les modèles de survie donnent la proportion de conduites dans un état structural donné en fonction de leur âge (Duchesne *et al.*, 2013). Dans ce type de modèle, les conduites demeurent dans un état structural donné pendant une période de temps considérée comme aléatoire (Ana et Bauwens, 2010). Ainsi, le processus de détérioration de l'état des conduites est représenté par la transition successive d'une classe d'état à une autre, depuis un premier état associé à un très bon état structural (comme neuve) à un ultime état associé à un très mauvais état structural

(nécessitant une intervention) (Ana et Bauwens, 2010; Baur *et al.*, 2004). Ces modèles se basent sur des fonctions de distribution (ex. : Weibull, exponentielle, Hertz, Gompertz, etc.) pour représenter les temps de séjour dans chaque état et ainsi définir le processus de détérioration des conduites d'égout en fonction du temps (Duchesne *et al.*, 2013; Baur *et al.*, 2004; Mailhot *et al.*, 2000; Horold et Baur, 1999).

Toutes les distributions statistiques des études évoquées précédemment considèrent seulement l'âge comme facteur de détérioration des conduites. Les facteurs propres à la conduite (p. ex. diamètre, longueur, type de conduite, type de matériaux, etc.) ou externes (p. ex. type de sol, niveau de trafic, etc.) sont considérés dans les modèles de survie en définissant des fonctions de survie par cohorte (p. ex., groupe de conduites de même type).

Mailhot *et al.* (2000) ont utilisé la distribution de Weibull, considérant l'âge des conduites uniquement comme facteur de risque, pour représenter le processus de détérioration des conduites d'égout. Plus tard, Duchesne *et al.* (2013) ont comparé l'utilisation de cette distribution à la distribution exponentielle pour représenter les temps de séjour dans chaque classe d'état structural et pour élaborer un modèle de prévision de l'état structural global d'un réseau d'égout basé sur l'analyse de survie. Dans cette étude, les auteurs ont considéré quatre classes d'état structural allant de 0 à 3 (0 : aucun défaut observé; 3 : état nécessitant une intervention). Pour pallier le manque d'information concernant le temps passé dans chacun des états de détérioration possibles pour chaque conduite, puisque seul l'âge et l'état structural de la conduite au moment de l'inspection sont disponibles pour construire le modèle, les auteurs ont développé une méthode de calage des fonctions de survie basée sur les temps de séjour cumulés dans les différentes classes d'état possibles. Les fonctions de survie du modèle en question permettent d'estimer la probabilité qu'une conduite soit dans une classe d'état donnée en fonction de son âge. Pour fins d'application et pour évaluer l'impact d'autres facteurs, tels le type de conduite et de matériau, les auteurs ont subdivisé un réseau de la ville de Québec en plusieurs cohortes. Duchesne *et al.* (2013) ont démontré que l'utilisation de la distribution exponentielle offrait plusieurs avantages. Ils ont mentionné, notamment, que le modèle basé sur la distribution exponentielle entraîne moins d'incertitude dans les résultats et des temps de calcul plus courts. Ils ont aussi montré que le modèle exponentiel est plus robuste lorsqu'il est calé sur un petit échantillon, échantillon qui doit toutefois être représentatif de l'ensemble du réseau d'égout sous étude (Duchesne *et al.*, 2013). La distribution de Herz a, quant à elle, été

utilisée par Baur et Herz (2002) pour élaborer des courbes de transition des conduites d'un état structural à un autre (bon à moins bon). Ils ont par la suite appliqué ce modèle à un échantillon de 37,8 km de conduites du réseau de la ville de Dresde en Allemagne, ce qui leur a permis d'estimer le pourcentage de conduites dans chacune des classes d'état considérées. D'autres chercheurs ont utilisé un modèle de survie basé sur la distribution de Herz pour prévoir le vieillissement des conduites d'égout (voir p. ex. Horold et Baur, 1999).

Comme il a été mentionné précédemment, la prévision de la détérioration de l'état structural, peu importe le type du modèle, se fait en fonction d'une ou de plusieurs variables, nommés facteurs d'impact dans la suite du document. La prise en compte et l'évaluation du niveau de signification de leur impact dans le processus de la détérioration structurale des conduites sont décrites plus en détail dans la section suivante.

### Facteurs d'impact

Les facteurs d'impact peuvent être propres à la conduite même, tels que : l'âge, la période d'installation, la taille, la longueur, la forme, le matériau, le type de réseau, la pente, la profondeur d'enfouissement et la performance hydraulique. Ceux-ci peuvent aussi être liés à l'environnement dans lequel évoluent ces conduites, par exemple : le type de sol, l'emplacement par rapport aux autres infrastructures et à la côte, le niveau de la nappe, l'humidité du sol, le niveau du trafic routier à proximité, le type d'assise de la conduite, la température, le gel et d'autres facteurs encore. Plusieurs études ont été réalisées au cours des quinze dernières années pour déterminer quels facteurs d'influence (ou variables indépendantes) devraient être pris en compte dans les modèles de détérioration structurale des conduites d'égout. Un tableau récapitulatif des résultats d'un bon nombre de ces études est donné à l'annexe 1 (Tableau A-1). Certains chercheurs ont évalué l'impact de ces facteurs de façon individuelle, soit en établissant des modèles de prévision de la détérioration structurale pour différentes cohortes ou groupes de conduites classées selon les facteurs à évaluer (Ana *et al.*, 2008; Baur et Herz, 2002; Micevski *et al.*, 2002; Tran *et al.*, 2006). À partir de ces modèles, les vitesses de vieillissement des conduites d'égout des différentes cohortes sont comparées, ce qui permet de conclure sur l'impact de chaque facteur ou d'une combinaison de ces derniers. De plus, des tests statistiques, comme le test du Khi-deux (Micevski *et al.*, 2002; Tran *et al.*, 2006), peuvent être utilisés pour vérifier la qualité de l'ajustement du modèle par rapport aux observations et, du même coup, vérifier

l'intérêt de considérer le facteur en question. L'impact de certains facteurs, évalués individuellement, s'est révélé différent d'une étude à l'autre (voir Tableau A-1 de l'annexe A). Dans d'autres études, les facteurs d'intérêt sont considérés conjointement dans les modèles de prévision de la détérioration structurale des conduites et leur impact est évalué à l'aide de différents tests statistiques. Parmi ces tests on retrouve : le test de Wald (Tscheikner-Gratl *et al.*, 2014; Salman and Salem, 2012; Ana *et al.*, 2009; Ariaratnam *et al.*, 2001), le test du ratio de vraisemblance (Fuchs-Hanusch *et al.*, 2015; Ugarelli *et al.*, 2013; Ana *et al.*, 2009; Ariaratnam *et al.*, 2001), le test de mesure d'ajustement statistique  $\rho^2$  (Baik *et al.*, 2006), la méthode pas à pas (Tran *et al.*, 2006), le test F (Baik *et al.*, 2006), le test t (Chughtai *et al.*, 2008) et l'analyse de variance (Tran *et al.*, 2006).

Le facteur le plus fréquemment identifié comme ayant un impact significatif sur la détérioration structurale des conduites d'égout est l'âge des conduites (Salman and Salem, 2012; Younis et Knigh, 2010; Ana *et al.*, 2009; Chughtai *et al.*, 2008; Baik *et al.*, 2006; Ariaratnam *et al.*, 2001). Ce facteur est suivi du diamètre (Carador *et al.*, 2017; Ugarelli *et al.*, 2013; Salman and Salem, 2012; Chughtai *et al.*, 2008; Baik *et al.*, 2006 et Ariaratnam *et al.*, 2001), de la longueur (Salman and Salem, 2012; Ana *et al.*, 2009; Chughtai *et al.*, 2008 et Baik *et al.*, 2006), du matériau (Carador *et al.*, 2018; Salman and Salem, 2012; Ana *et al.*, 2009 et Chughtai *et al.*, 2008), du type de réseau (Carador *et al.*, 2017; Ugarelli *et al.*, 2013; Salman and Salem, 2012 et Ariaratnam *et al.*, 2001) et de la pente (Salman and Salem, 2012; Baik *et al.*, 2006 et Tran *et al.*, 2006). Les autres facteurs jugés significatifs dans certaines de ces études sont la profondeur d'enfouissement (Carador *et al.*, 2017; Chughtai *et al.*, 2008 et Tran *et al.*, 2006), le type d'assise (Chughtai *et al.*, 2008), le trafic routier (Salman and Salem, 2012; Chughtai *et al.*, 2008), la performance hydraulique (Tran *et al.*, 2006), la forme et le district (Carador *et al.*, 2018), le type de sol, la présence d'arbres à proximité et l'année d'installation. Les trois derniers facteurs ont été identifiés par Ugarelli *et al.* (2013). Des interactions entre les facteurs considérés conjointement ont aussi été évaluées (Ugarelli *et al.*, 2013; Salman and Salem, 2012; Younis et Knigh, 2010; Chughtai *et al.*, 2008 et Ariaratnam *et al.*, 2001).

Malgré les différences notées dans l'influence ou non des facteurs évalués d'une étude à l'autre, le sens de l'impact de ces derniers sur le processus de la détérioration structurale, une fois prouvé, reste dans la plupart des cas le même. Ainsi, les études ayant retenu l'âge comme facteur explicatif de la détérioration ont toutes démontré que plus les conduites sont vieilles, plus

elles ont de chance d'être en mauvais état structural (Salman and Salem, 2012; Younis et Knigh, 2010; Ana et al., 2009; Chughtai et al., 2008; Baik et al., 2006 et Ariaratnam et al., 2001). Certaines de ces études s'accordent sur le fait que la vitesse de détérioration est plus rapide dans le cas des conduites longues (Salman and Salem, 2012; Ana et al., 2009; Ana et al., 2008; Chughtai et al., 2008), en raison de la façon dont les classes d'état structural sont attribuées ou encore d'une plus grande sensibilité au tassement du sol (Ana et al., 2008). Les conduites de petit diamètre se détérioreraient aussi plus rapidement selon Ugarelli et al. (2013), Salman and Salem (2012), Micevski et al. (2002) et Ariaratnam et al. (2001), car elles sont soumises à des contraintes externes plus élevées (Micevski et al., 2002). Seuls Baik et al. (2006) ont démontré le contraire des autres auteurs en ce qui concerne le sens de l'impact de la longueur et du diamètre. La détérioration structurale a été montrée, également, plus rapide pour les conduites en forte pente (Salman and Salem, 2012; Baik et al., 2006, Tran et al., 2006), en raison de leur plus faible stabilité et des débits plus élevés qui y sont associés (Baik et al., 2006). Même chose pour les conduites moins profondes, subissant plus de charges que les conduites plus profondes, selon Chughtai et al. (2008) et Tran et al. (2006). Les conduites moins profondes sont souvent des conduites de petit diamètre, ont soutenu Tran et al. (2006), ce qui peut rejoindre les conclusions concernant l'impact du diamètre. Pour ce qui est du matériau, le béton reste le plus robuste d'après plusieurs auteurs (Salman and Salem, 2012; Ana et al., 2009; Ana et al., 2008). Ugarelli et al., (2013). Salman and Salem (2012) soutiennent que les conduites des réseaux unitaires sont susceptibles de se détériorer plus rapidement que celles des réseaux sanitaires. Ils (2012) expliquent ce fait par les pertes de sol dues aux infiltrations/exfiltrations lors d'événements pluvieux importants. En revanche, Ariaratnam et al. (2001) avancent que ce sont plutôt les conduites des réseaux sanitaires qui se détériorent plus vite à cause de la corrosion chimique. L'impact de l'emplacement, quant à lui, réside dans la proximité des conduites avec des sites construits, comme les routes et les rues. Dans ces endroits, les conduites se détérioreraient moins vite, selon Salman and Salem (2012), parce qu'elles sont mieux protégées par les installations en place. Un autre point soulevé par Micevski et al. (2002) est la proximité du littoral, qui peut augmenter, selon eux, le risque de corrosion. L'assise de type remblai compacté peut également participer à l'augmentation de la vitesse de détérioration structurale des conduites d'égout comparée au gravier compacté, selon Chughtai et al. (2008). Tout comme le sol de type alluvial et la présence d'arbres à proximité des conduites augmenteraient également

la vitesse de détérioration selon Ugarelli et al. (2013); le premier en raison de sa forte teneur en sel, élément corrosif, et le deuxième parce qu'il accentue le risque d'intrusions racinaires.

Les différences enregistrées dans l'influence ou non des facteurs physiques, fonctionnels et externes sur la détérioration structurale des conduites d'égout dépendent essentiellement des réseaux sur lesquels les études ont été réalisées. En effet, l'ensemble des études mentionnées auparavant représente des études ponctuelles utilisant des démarches différentes et évaluant des combinaisons de facteurs différentes sur des réseaux différents. De plus, l'interaction entre les facteurs évalués n'est analysée que dans quelques études seulement. La corrélation entre les facteurs évalués, quant à elle, est très rarement mise en évidence ou prise en compte (sauf dans le cas des études menées par Chughtai et al., 2008 et Ariaratnam et al., 2001).

#### Estimation des paramètres des modèles statistiques

Chaque modèle statistique exige l'estimation de paramètres qui lui sont propres : 1) l'estimation des paramètres des distributions de densité de probabilité des temps de séjour dans chaque état pour les modèles de survie (Duchesne *et al.* 2013); 2) l'estimation des probabilités de transition d'un état à l'autre pour les modèles de Markov et semi-Markoviens (Duchesne *et al.*, 2013; Ana et Bauwens, 2010; Baik *et al.*, 2006); 3) l'estimation des coefficients de régression pour les modèles de régression (Ana et Bauwens, 2010). Plusieurs méthodes d'estimation ont été utilisées pour caler les modèles de prévision de la détérioration structurale, telles que : 1) la méthode du maximum de vraisemblance, utilisée dans le modèle de survie (Duchesne *et al.*, 2013), le modèle de Markov (LeGat, 2008; Baik *et al.*, 2006) et les modèles de régression (Salman et Salem, 2012; Ariaratnam *et al.*, 2001); 2) la méthode d'optimisation non linéaire, qui cherche à minimiser la somme des différences absolues entre la courbe de régression (qui établit le lien entre l'âge de la conduite et l'état observé) et l'état prédit par le modèle de Markov, pour tous les âges (Baik *et al.*, 2006; Wirahadikusumah *et al.*, 2001); 3) la méthode des moindres carrés, minimisant la somme des écarts au carré entre les valeurs observées et simulées par le modèle, comme dans le cas des modèles de survie de Baur et Herz (2002) et de Mailhot *et al.* (2000); et 4) l'approche bayésienne utilisée dans le modèle de Markov de Micevski *et al.* (2002).

### **2.5.2 Modélisation de la détérioration de la performance hydraulique des conduites d'égout**

Contrairement à la détérioration structurale, très peu de modèles permettent de prévoir la détérioration de la performance hydraulique des conduites d'égout dans le temps. Parmi ces modèles, on retrouve celui de Babani *et al.* (2008), qui proposent une méthodologie de modélisation statistique de la détérioration de la performance hydraulique des conduites d'égout sanitaire sur la base des résultats d'inspections télévisuelles. Les caractéristiques des défauts structuraux récoltées lors de l'inspection, à savoir la taille, l'emplacement longitudinal et le pourcentage de la superficie touchée par le défaut structural, sont utilisées pour estimer les valeurs de rugosité de la surface de la conduite au niveau de chacun de ces défauts. Ces estimations sont réalisées sur la base des recommandations du WRc (WRc, 2004) et en se basant sur le principe de la logique floue. Ces valeurs de rugosité sont ensuite utilisées dans le calcul des capacités hydrauliques de chaque conduite en supposant un écoulement en charge. Babani *et al.* (2008) simulent ensuite l'hydraulique d'un réseau d'égout canadien avec le modèle hydrologique/hydraulique (HH) SWMM (Rossman, 2008), selon les capacités hydrauliques actuelles et celles projetées dans le futur, pour détecter les tronçons de conduites susceptibles d'entrer en charge ou de causer des inondations.

Deux autres modèles de prévision de la détérioration hydraulique ont été proposés par Tran *et al.* (2010). L'un d'eux, qui est un modèle statistique « probit ordonné », détermine la probabilité qu'une conduite soit dans une condition hydraulique donnée après une certaine période de temps. Il exprime cette probabilité en fonction de plusieurs facteurs d'influence liés à la conduite, tels la condition structurale au moment de l'inspection, l'âge, la dimension, la profondeur d'enfouissement, la pente et le type de sol. Dans ce modèle, trois catégories de condition hydraulique sont considérées (1 : bon, 2 : moyen et 3 : mauvais). Les paramètres du modèle ont été estimés pour le réseau d'égout pluvial de la ville du grand Dandenong (Australie), en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Sur la base du test de Wald (Klein et Moeschberger, 2003), les auteurs ont démontré que la condition structurale, l'âge, la dimension, la pente et l'emplacement de la conduite sont des facteurs influents dans le processus de la détérioration hydraulique des conduites d'égout du réseau étudié. L'autre modèle proposé par Tran *et al.* (2010) est un modèle d'intelligence artificielle (réseau de neurones probabiliste), lequel a démontré une meilleure performance dans la prévision de la condition hydraulique du

réseau de la ville en question que le modèle probit ordonné. En plus de ces deux derniers modèles, Tran (2007) a testé trois autres modèles de détérioration de la performance hydraulique. Il s'agit d'un modèle de Markov, d'un modèle d'analyse discriminante multiple et d'un modèle de réseau de neurones. Ces derniers identifient les mêmes facteurs d'influence que ceux identifiés par le modèle probit ordonné, cités précédemment. Tran (2007) a qualifié ces modèles de génériques, car ils peuvent être utilisés à la fois pour prévoir la détérioration de l'état structural et la détérioration de la performance hydraulique des conduites d'égout. Un autre modèle basé sur la logique floue a été proposé par Hosseini et Ghasemi (2012) pour estimer le coefficient de rugosité de Manning utilisé par la suite pour prévoir la performance hydraulique des conduites individuelles d'un réseau sanitaire.

Par ailleurs, dans les modèles cités ci-dessus, seul l'âge des conduites est modifié pour évaluer les performances hydrauliques futures des conduites d'égout, et non la possible variation des conditions climatiques. La modélisation HH peut toutefois pallier ce problème.

En effet, la modélisation HH peut simuler les principaux processus impliqués dans l'hydrologie urbaine en tenant compte des conditions climatiques et du développement urbain (Berggren et al., 2012; Kleidorfer et al., 2009; Olsson et al., 2009; Niemczynowicz, 1989). Les modèles HH peuvent être utilisés pour représenter les conditions passées, actuelles ou futures. Les plus souvent utilisés parmi ces derniers sont : 1) Le modèle SWMM (*Storm Water Management Model*; Rossman, 2008), développé par l'Agence américaine de Protection de l'environnement (EPA), qui est le plus utilisé en Amérique du Nord. Il s'agit d'un modèle dynamique de transformation pluie-débit, utilisé pour simuler l'hydrologie, l'hydraulique et la qualité de l'eau en milieux urbains (Telliez, 2010; Rossman, 2008). Ce modèle est décrit plus en détail à l'annexe B; 2) Le modèle MOUSE (*MOdel of Urban SEwer*) développé par le Danish Hydraulic Institute (DHI). Il est basé sur deux modules. Un premier module, hydrologique, transforme la pluie en débit de ruissellement, et le second module, hydraulique, transforme le débit de ruissellement en débit d'écoulement en conduite et canaux (SIARA, 2008); et 3) Le modèle Mike-Urban développé aussi par DHI (2013). Ce dernier comprend le modèle MOUSE et a le même mode de fonctionnement, mais intègre un système d'Information géographique. Les modèles MOUSE et Mike-Urban sont utilisés surtout en Europe.



Comme la détérioration de la performance structurale, la détérioration de la performance hydraulique dépend à la fois de facteurs liés aux conduites d'égout (voir Tran *et al.*, 2010, Babani *et al.*, 2008; Tran, 2007) et de facteurs externes liés à leur environnement. Les facteurs externes en question sont les changements dans l'occupation du territoire et dans les régimes pluviométriques (Berggren *et al.*, 2012; Kleidorfer *et al.*, 2009; Olsson *et al.*, 2009; Mailhot *et al.*, 2008; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Niemczynowicz, 1982). Ces facteurs externes influencent particulièrement la performance des conduites d'égout pluvial et unitaire et doivent, par conséquent, être intégrés dans les prévisions de la détérioration de leur performance hydraulique. Surtout que, dans le contexte climatique actuel et futur (voir section 2.7.2), ces deux types de réseau devront faire face à des changements dans les régimes pluviométriques (Zhou *et al.*, 2012; Mailhot et Duchesne, 2010; Watt *et al.*, 2003; Jobin, 2001). Ainsi, en plus d'adopter de nouvelles pratiques de gestion, décrites à la section suivante, leur mode de gestion devra, entre autres, être adapté aux conditions climatiques futures.

Dans la littérature, plusieurs méthodes sont citées permettant de construire les conditions pluviométriques futures utilisées dans la modélisation HH. La méthode la plus simple consiste à appliquer une augmentation relative à l'intensité d'une pluie de conception donnée, la valeur de cette augmentation étant généralement basée sur les projections climatiques disponibles (Kirshen *et al.*, 2015; Huong and Pathirana, 2013; Olsson *et al.*, 2013; Kleidorfer *et al.*, 2009; Watt *et al.*, 2003; Waters *et al.*, 2003; Niemczynowicz, 1989). La seconde méthode consiste à modifier les séries de précipitations observées selon les projections de modèles climatiques (Dale *et al.*, 2017; Berggren *et al.*, 2012; Olsson *et al.*, 2009; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Mailhot *et al.*, 2007b; He *et al.*, 2006). Une autre méthode consiste à produire des séries de précipitations futures ou des pluies de conception en réduisant l'échelle des séries obtenues de pluies issues des modèles climatiques (Kang *et al.*, 2016; Osman, 2015). Enfin, il existe une autre méthode dite « l'approche de l'analogie (ou le comparable) en climat » pour estimer les changements futurs de l'intensité des précipitations (Dale *et al.*, 2017). Cette méthode consiste à identifier la température moyenne future de la saison et de la région à l'étude à l'aide des modèles climatiques. Par la suite, des villes (appelées analogues climatologiques contemporains) avec des températures saisonnières moyennes actuelles similaires à celle estimée pour la région à l'étude dans le futur sont sélectionnées et les précipitations observées dans ces dernières sont

supposées représentatives des conditions climatiques futures et utilisées comme intrants du modèle HH.

## **2.6. Gestion des eaux pluviales en milieu urbain**

### **2.6.1 Gestion conventionnelle**

Les eaux pluviales ont été gérées par le passé, et encore de nos jours dans plusieurs pays, d'une manière dite conventionnelle. Ce type de gestion considère les eaux de pluie comme une nuisance à éliminer rapidement. Cela nécessite des infrastructures massives et des solutions centralisées, tel que des réseaux qui drainent efficacement les eaux de pluie vers les milieux récepteurs ou vers des stations de traitement (Philip *et al.*, 2011; Bédard *et al.*, 2010; Boucher, 2010). La méthode conventionnelle défavorise le cycle hydrologique naturel en réduisant la recharge de la nappe phréatique, en diminuant les débits de base dans les cours d'eau, en accélérant l'érosion des cours d'eau récepteurs et en dégradant la qualité de leurs eaux (Bédard *et al.*, 2010; Boucher, 2010). Ce type de gestion s'avère, en plus, néfaste pour les réseaux de drainage eux-mêmes, vu l'augmentation au fil des ans des volumes et des débits d'eau à gérer, augmentation résultant de l'accroissement des surfaces imperméables dans les zones urbaines et des changements dernièrement enregistrés dans les régimes pluviométriques (Philip *et al.*, 2011). Toutes ces raisons militent en faveur de l'adoption de pratiques de gestion des eaux pluviales dites durables.

### **2.6.2 Gestion durable**

La gestion durable des eaux pluviales consiste à reproduire au mieux le cycle hydrologique naturel. Ainsi, elle favorise l'infiltration, l'évaporation, la rétention et l'amélioration de la qualité de l'eau (Zhou *et al.*, 2013; Bédard *et al.*, 2010; Boucher, 2010). Elle considère les eaux de pluie comme une ressource à protéger et à réutiliser plutôt qu'une nuisance (Philip *et al.*, 2011; Boucher, 2010). Ce type de gestion se base essentiellement sur des infrastructures vertes, appelées au Québec pratiques de gestion optimales, et s'applique à plusieurs échelles (résidentielle, du quartier et du bassin versant). Ce type de gestion peut se faire par la mise en place de mesures de : 1) contrôle à la source, applicable en amont avant que l'eau n'atteigne le

réseau de conduites, qui comprend le stockage sur les lots, la récupération des eaux des toitures et des surfaces imperméables, les toits verts, les stationnements verts, les pavages poreux, les bassins de rétentions, les systèmes de biorétention et autres; 2) contrôle en réseau par l'utilisation, par exemple, de noues et de systèmes de conduites perforées; et 3) contrôle à la sortie, qui consiste à stocker temporairement les eaux pluviales dans des milieux humides, dans des bassins secs ou humides, ou dans des bassins d'infiltration avant leur rejet au milieu récepteur (Philip *et al.*, 2011; Bédard *et al.*, 2010).

Au Québec, le Guide de gestion des eaux pluviales (MDDEP et MAMROT, 2011) recommande une gestion durable des eaux de pluie adaptée aux conditions climatiques nordiques prévalant au Québec. Cette approche ne peut être efficace que si elle prend en considération les CC et leurs impacts sur le régime pluviométrique.

## **2.7. Changements Climatiques**

Les CC, soit les changements des caractéristiques statistiques de certains paramètres du système climatique (température, précipitations, vitesse des vents, etc.), ainsi que leurs impacts représentent l'un des principaux défis actuels que rencontrent les autorités à l'échelle planétaire. Leurs empreintes, mesurables depuis plusieurs années, forcent les autorités à chercher à mieux les prévoir et à évaluer leurs impacts pour mieux s'y adapter.

### **2.7.1 Modélisation du climat futur**

Les changements des paramètres climatiques sont modélisés à l'aide de modèles mathématiques basés sur les lois de la physique (notamment conservation de la masse, du mouvement et de l'énergie) capables de simuler l'évolution future du climat terrestre en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) (Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2013). Ces scénarios sont décrits, présentement, par des trajectoires de concentration représentatives (RCP; Representative Concentration Pathways) établis dans le cadre du 5<sup>e</sup> rapport du GIEC (2013), une mise à jour des scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios; GIEC, 2007). Ces scénarios RCP sont basés sur des hypothèses posées par rapport au changement technologique, à la croissance démographique, au développement socioéconomique, aux orientations énergétiques et aux engagements politiques en ce qui a trait à la lutte contre les CC. Quatre trajectoires RCP

ont été développées et nommées selon leur forçage radiatif total (en  $\text{W/m}^2$ ) pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle, soit : 1) RCP 2.6, sans équivalent en scénario SRES, qui suppose une baisse éventuelle des concentrations de  $\text{CO}_2$  et projette les plus petits changements de températures à la surface du globe; 2) RCP 4.5, équivalent au scénario SRES B1; 3) RCP 6.0, qui se situe entre les scénarios SRES B2 et A1B; et 4) RCP 8.5, équivalent au scénario SRES A1FI et proche du scénario SRES A2. Ce dernier est basé sur l'augmentation constante des concentrations de  $\text{CO}_2$  et conduit aux plus fortes augmentations de température d'ici 2100 (Vuuren and Carter, 2014; Charron, 2016).

Les scénarios d'émission abordés ci-haut, entre autres, sont utilisés comme intrants aux modèles climatiques pour ainsi produire des scénarios climatiques, produit final des modèles climatiques représentant le climat présent ou futur, aussi appelé projection climatique (Charron, 2016). Deux principaux types de modèles de prévision du climat existent: 1) les modèles de circulation générale (MCG), qui simulent des projections climatiques à l'échelle de la planète à une résolution d'environ 150 à 300 km, selon la latitude. Leur faible résolution spatiale limite leur utilisation en vue d'évaluer l'impact des CC sur des processus mesurables à plus petites échelles, à savoir l'hydrologie régionale et urbaine (Willems et al., 2012; Sunyer et al., 2012; Olsson et al., 2009; Semadeni-Davies et al., 2008; Fowler et al., 2007); 2) les modèles régionaux du climat (MRC), qui se caractérisent par une résolution plus fine de moins de 45 km (Charron, 2016; Arnbjerg-Nielsen et al., 2013). Ces derniers découlent d'une volonté de mise à l'échelle des MCG et couvrent seulement une partie du système Terre-atmosphère. Ils incluent une représentation spatiotemporelle plus fine des caractéristiques physiques de la région à l'étude (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013; Willems et al., 2012). Les MRC utilisent comme conditions initiales et aux limites les résultats d'un MCG pour une région d'intérêt (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013; Mladjic et al., 2011; Willems et al., 2012), ce qui les amènent à hériter des biais des MCG (Sunyer et al., 2012; Mladjic et al., 2011; Semadeni-Davies et al., 2008; Mailhot et al., 2007a,b). D'autres techniques de mise à l'échelle existent (Sunyer et al., 2012). Il s'agit de techniques statistiques qui consistent à déterminer une relation statistique entre les résultats du modèle à grande échelle (soit MCG ou MRC) et le climat local (Sunyer et al., 2012; Willems et al., 2012) et permettent donc d'obtenir des projections à résolution encore plus fine. Parmi ceux-là, on peut citer les fonctions empiriques de transfert, les méthodes de ré-échantillonnage et la modélisation stochastique.

### 2.7.2 Impact des changements climatiques sur le régime des précipitations

L'augmentation des précipitations moyennes et surtout extrêmes, observée durant les dernières décennies, est une réalité dans plusieurs régions de la planète (see Westra *et al.*, 2015; IPCC, 2013; Ryu *et al.*, 2014; Shephard *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2005). Cette augmentation, en particulier celle concernant l'intensité et la fréquence des précipitations intenses, est aussi prévue dans le futur, mais à des proportions plus élevées (see Dale *et al.*, 2017; Kendon *et al.*, 2014; Westra *et al.*, 2014; IPCC, 2013; Mailhot *et al.*, 2012). Plusieurs études l'ont d'ailleurs démontré en considérant différentes séries de précipitations annuelles (Madsen *et al.*, 2009; Bates *et al.*, 2008; Meehl *et al.*, 2007; Kharin *et al.*, 2007; GIEC, 2007; Denault *et al.*, 2006; Groisman *et al.*, 2005; Meehl *et al.*, 2005), saisonnières (Tebaldi *et al.*, 2004) ou journalières (Groisman *et al.*, 1999; Zwiers et Kharin, 1998). Cette augmentation est liée à l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère (Bates *et al.*, 2008; GIEC, 2007; Semenov and Bengtsson 2002). Elle est spatialement hétérogène et affecte différemment les pluies extrêmes et les pluies moins intenses (Meehl *et al.*, 2005; Groisman *et al.*, 1999; Zwier *et al.*, 1991). Zwiers et Kharin (1998), par exemple, ont conclu à une augmentation générale des précipitations moyennes annuelles de durée 24 h dans les hautes latitudes et à une diminution marginale aux latitudes moyennes. Meehl *et al.* (2005), considérant le scénario d'émission de GES SRES-A1B (forçage moyen), ont également conclu à une nette augmentation de l'intensité des précipitations annuelles pour plusieurs régions de la planète, mais plus soutenue dans les tropiques et les hautes latitudes entre le climat passé (1980-1999) et le climat futur (2080-2099). Kharin *et al.* (2007), pour le scénario SRES A1B et en utilisant les résultats de simulation de plusieurs modèles de prévisions climatiques, estiment des augmentations relatives (médiane sur toute la planète) d'environ 3,4 % pour les précipitations annuelles moyennes contre 12,3 % pour les précipitations annuelles extrêmes, vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle par rapport à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Les changements dans les précipitations intenses sont aussi variables dans l'espace et dans le temps (Groisman *et al.*, 1999). Au Canada, Cheng *et al.* (2012) estiment que l'intensité et la fréquence des événements extrêmes devraient doubler ou même tripler vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dans le sud du pays pendant la saison chaude. Les conclusions de plusieurs chercheurs convergent vers une tendance à la hausse des précipitations intenses, de différentes durées et périodes de retour, dans le climat futur pour la majorité des régions canadienne (Burn et Taleghani, 2013; Mladjic *et al.*, 2011; Mailhot *et al.*, 2012-2007a). Ce constat concerne surtout

les événements intenses de longues durées (Burn et Taleghani, 2013) et de périodes de retours allant de 20 à 100 ans (Mladjic *et al.*, 2011). Mailhot *et al.* (2012), par exemple, estiment que les augmentations de l'intensité des précipitations extrêmes les plus élevées sont attendues pour les régions intérieures localisées dans les latitudes moyennes et le sud du Canada. Dans leur étude, les chercheurs ont évalué des événements de durées allant de 6 à 120 h et de périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans. Pour cela, ils ont utilisé des données provenant de plusieurs MRC pilotés par différents MCG simulant les conditions actuelles (1968-2000), avec les concentrations historiques de GES, et futures (2041-2070) pour le scénario SRES A2. Précédemment et sur un territoire encore plus petit, soit le sud du Québec, Mailhot *et al.* (2007a) ont noté une augmentation de l'intensité des maxima annuels et une diminution, de pratiquement la moitié, de la période de retour pour une intensité de pluie donnée, surtout de courtes durées (2 à 6 h), en climat futur (2041-2070) comparativement au climat passé (1961-1990) (tel que simulé par le MRCC (Modèle Régional Canadien du Climat) et en considérant le scénario SRES A2).

Cette augmentation prévue des précipitations, en particulier intenses, est susceptible d'augmenter les risques d'inondations dans les milieux urbains (Jung *et al.*, 2011) et d'entraîner des impacts sur le niveau de performance des infrastructures de drainage urbain, comme nous le verrons plus en détail à la section suivante.

## **2.8. Impact des changements climatiques sur les infrastructures de drainage urbain**

Les CC, en induisant un changement dans les caractéristiques des événements pluviométriques (tel que discuté à la section précédente), accentuent les risques de carence dans le niveau de service des réseaux de drainage souterrains. Ce sont surtout les précipitations intenses, les plus touchées par les CC, qui causent le plus grand défi pour les infrastructures urbaines en place. En drainage urbain, un changement dans les événements de précipitation intenses aurait plus d'impact que celui dans les événements moyens, puisque la performance et le dimensionnement des ouvrages de drainage sont basés sur l'intensité des précipitations intenses (Waters *et al.*, 2003). Tel que noté à la section 2.2, le dimensionnement des conduites d'un réseau de drainage se base essentiellement sur des intensités de pluie correspondant à certaines périodes de retour, en considérant que la relation entre l'intensité, la durée et la période de retour d'une pluie ne varie pas dans le temps. Toutefois, cette relation est sujette à des changements à cause des CC.

Par exemple, dans une étude où l'on examine les critères de conception et d'évaluation du niveau de service des infrastructures de drainage urbain dans un contexte de CC, Mailhot et Duchesne (2010) ont souligné que négliger la non-stationnarité des pluies extrêmes au moment de la conception des conduites peut avoir des effets néfastes considérables à long terme. Ces effets seraient évidemment plus grands sur les infrastructures à longue durée de vie, dépassant la période pendant laquelle les CC auront un effet significatif sur l'évolution des événements pluviométriques intenses, ce qui est le cas des conduites d'égout souterraines conçues pour fonctionner jusqu'à 100 ans ou même parfois plus. Dans cette même optique, He *et al.* (2006) ont démontré que les pratiques de conception utilisées depuis longtemps doivent être révisées en raison de leur incapacité à tenir compte des conditions climatiques futures. Ces conclusions ont été confirmées par les résultats obtenus par plusieurs autres chercheurs, quant à l'impact des CC sur la performance hydraulique des réseaux de drainage urbain, quelle que soit la méthode utilisée pour reproduire les conditions climatiques futures, le type de pluie, les modèles HH utilisés ou la localisation des réseaux étudiés (p. ex. Mikovits *et al.*, 2017; Dale *et al.*, 2017; Kang *et al.*, 2016; Kirshen *et al.*, 2015; Berggren *et al.*, 2014,2013; Huong and Pathirana, 2013; Olsson *et al.*, 2013, 2009; Zhou *et al.*, 2012; Kleidorfer *et al.*, 2009; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Denault *et al.*, 2006; Watt *et al.*, 2003; Waters *et al.*, 2003; Niemczynowicz, 1989).

Olsson *et al.* (2009), par exemple, ont utilisé les résultats de prévisions climatiques pour évaluer la performance du réseau de drainage de la ville de Kalmar en climat futur, selon les scénarios SRES A2 et B2. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé une version améliorée de la méthode du delta pour ajuster une série temporelle continue de précipitations observées entre 1991 et 2004. Il s'agit de la version « delta-change factors (DCF) », qui utilise les rapports entre les différents percentiles de la distribution des intensités de pluie en climat actuel et futur simulées par les modèles climatiques. Ainsi, la méthode fournit une distribution de facteurs couvrant toutes les intensités des pluies, des plus faibles aux plus intenses (Olsson *et al.*, 2009). Olsson *et al.* (2009) ont constaté que les facteurs de changement DCF sont globalement similaires pour les scénarios A2 et B2. À l'aide du modèle MOUSE et de la série de pluie ajustée (selon le scénario SRES A2), les auteurs ont remarqué une augmentation de l'ordre de 20 à 40 % du nombre d'épisodes d'inondations en surface causées par une augmentation, estimée, de 20 à 60 % des intensités des précipitations intenses en été et à l'automne, respectivement, d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Par la suite et en utilisant une approche différente, Olsson *et al.* (2013) ont évalué la performance

hydraulique future d'un réseau d'égout située à Arvika, en Suède. Dans cette étude, les auteurs ont appliqué une augmentation relative (de 23,6% entre la 10<sup>e</sup> et la 40<sup>e</sup> minute et de 22,6% pour le reste de la pluie) à l'intensité d'une pluie de conception, de durée de 1 h et de période de retour 10 ans, afin d'obtenir un événement pluvieux futur (horizon 2071-2100). Les pourcentages utilisés, soient 23,6 et 22,6 %, représentent la moyenne des résultats d'un MRC pour trois scénarios d'émission de GES (A2, B2 et A1B), pour les précipitations d'une période de retour 10 ans et de durée de 30 min et 1 h, respectivement, entre les climats actuel (1961-1990) et futur (2071-2100). Olsson et al. (2013) ont utilisé la pluie majorée pour simuler l'hydraulique du réseau étudié à l'aide du modèle MOUSE. Dans cette étude, les auteurs ont constaté une large déficience du réseau étudié en conditions futures. Berggren *et al.* (2012), quant à eux, ont évalué la performance du réseau de drainage séparatif d'une zone suburbaine située dans le sud-est de la côte suédoise. Ils ont considéré une période actuelle (1971-2000) et trois périodes futures : proche (2011-2040), intermédiaire (2041-2070) et lointaine (2071-2100). Les simulations d'un MRC pour le scénario SRES A2 ont été utilisées pour cette étude. De la même manière que dans Olsson *et al.* (2009), ces derniers ont estimé les facteurs de changement saisonniers des intensités de pluie entre la période actuelle et chacune des périodes futures avec la méthode DCF. Une série de pluie observée couvrant la période 1993-2002 a été ajustée avec les facteurs de changement estimés, donnant ainsi trois séries futures de 10 ans. Berggren *et al.* (2012) ont ensuite simulé l'hydraulique du réseau en fonction des séries de pluie futures avec le modèle MIKE-Urban. Cette analyse leur a permis de démontrer que, dans les trois périodes futures et surtout pour la période future lointaine, le nombre, la fréquence et la durée des inondations et débordements d'égout augmenteront significativement. Plus tard, Berggren et al. (2014) ont évalué la performance hydraulique actuelle et future d'un réseau d'égout pluvial situé dans la ville de Kalmar en Suède en utilisant le modèle MOUSE. Dans cette étude, les conditions climatiques futures ont été obtenues en ajustant : 1) l'intensité d'une pluie de conception Chicago (PCC) par un facteur d'ajustement constant; et 2) l'intensité d'une série de pluie observée (SPO) à l'aide de l'approche DCF. En plus des pluies PCC et SPO ajustées, les chercheurs ont utilisé des événements à caractère intense qu'ils ont pu isoler de la SPO ajustée pour produire des événements de différentes durées et périodes de retour. Dans cette étude, les deux types d'ajustement ont été basés sur les résultats de modèles climatiques considérant les scénarios SRES A2 et B2. Berggren et al. (2014) ont montré que le nombre de nœuds inondés augmente dans les conditions futures et ce, peu importe le type de pluies utilisé pour



l'évaluation. Toujours en Europe, Mikovits et al. (2017) ont évalué, avec le modèle SWMM, l'impact combiné du développement urbain et du CC sur les volumes d'inondation provenant d'un réseau d'égout unitaire à Innsbruck, en Autriche. Ces derniers ont montré que l'impact des CC, c'est-à-dire une précipitation plus intense en été, pourrait être compensé ou amplifié par le développement urbain, en fonction de la répartition spatiale de la croissance urbaine. Pour cette évaluation, ils ont utilisé des précipitations de conception de différentes durées et périodes de retour, qui ont été modifiées à l'aide d'une méthode empirique de réduction d'échelle statistique pour produire les conditions futures pour quatre scénarios d'émission de GES. Récemment, Dale et al. (2017) ont utilisé le modèle HH InfoWorks (Innovyze 2018) pour évaluer la performance hydraulique de quatre réseaux de drainage situés dans plusieurs villes anglaises. Les auteurs ont utilisé comme intrants pour ces modèles des pluies de conception, qui ont été modifiées en appliquant des pourcentages de changement à la hauteur des précipitations pour représenter le climat futur. Ces pourcentages de changement ont été calculés en combinant les résultats de deux méthodes : 1) la méthode des analogues climatiques (voir section 2.5.2) et 2) une méthode comparant les intensités de précipitations (de différentes périodes de retour), simulées dans le cadre du projet CONVEX, entre les climats actuels et futurs. Dale et al. (2017) ont noté des augmentations variant de 11% à 113% dans les volumes d'inondation dans les quatre réseaux pour des augmentations dans les précipitations allant de 7% à 50%. Ils ont aussi relevé une augmentation du nombre, de la fréquence et du volume des débordements d'égouts unitaires.

## **2.9. Mesures d'adaptation aux changements climatiques**

Malgré les incertitudes liées aux projections climatiques, leur utilisation a permis de mettre en évidence l'impact d'une éventuelle augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes, et par conséquent des volumes et débits de ruissellement, sur le drainage en milieu urbain. Cet impact, démontré par plusieurs chercheurs (voir section précédente), montre l'importance de mettre en place un plan d'intervention incluant des mesures d'adaptation aux conditions climatiques futures. L'adaptation doit être appliquée en fonction des caractéristiques locales des bassins urbains et doit tirer profit des infrastructures déjà en place. Elle peut être réalisée par la mise en place de nouveaux ouvrages de gestion, PCS (voir section 2.9), et/ou par la mise à niveau des capacités hydrauliques des conduites souterraines au moment du remplacement des conduites critiques (en mauvais état structural) ou du renouvellement des conduites prévu par

les municipalités dans leurs plans de gestion des réseaux de drainage. Plusieurs chercheurs ont évalué l'efficacité de certaines de ces pratiques de gestion, avec ou sans considération de l'impact des CC, en incluant les coûts qui leur sont associés (ex. : Brett *et al.*, 2018; Cano and Barkdoll, 2017; Winston *et al.*, 2013 and 2016; Sebt *et al.*, 2015 et 2016a-b; Yazdi and Salehi Neyshabouri, 2014; Damodaram *et al.*, 2010; Ackerman et Stein (2008); Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Watt *et al.*, 2003). En effet, Watt *et al.* (2003) ont démontré que la déconnexion de la moitié des toits du bassin de Malvern en Ontario permettrait de réduire les volumes d'eau de ruissellement attendus en raison des CC (représentés par une augmentation de 15 % de l'intensité d'une pluie de conception de durée 1 h et période de retour de 2 ans). Ces auteurs ont souligné que l'installation d'un certain volume de tranchées d'infiltration (700 m<sup>3</sup>) permettrait de contenir l'équivalent de l'augmentation de volume d'eau de ruissellement prévue en raison des CC (soit 15 % d'augmentation). Damodaram *et al.* (2010) notent que les toits verts, les pavages poreux et la collecte des eaux de pluie, sont bénéfiques pour les précipitations de faibles intensités et peuvent être combinés à des mesures visant à contrôler les événements de pluie les plus extrêmes (ex. bassin de rétention souterrain). Sebt *et al.* (2015 et 2016-b) ont démontré que l'utilisation des PCS permet de maintenir un niveau acceptable de la performance hydraulique d'un réseau unitaire situé dans la grande région de Montréal. Ces auteurs ont également noté l'utilité de ces pratiques d'un point de vue qualité de l'eau. Cano and Barkdoll, (2017) ont évalué l'emplacement idéal et le choix entre trois types de PCS (tranchées d'infiltration, bassins de rétention de surface et noues végétalisées) en considérant des facteurs sociaux (probabilité que les propriétaires maintiennent le PCS), économiques (coût) et techniques (connaissances sur l'exploitation et l'entretien). Les auteurs ont noté que, pour une pluie de durée 1 h et de période de retour 10 ans, l'installation des PCS dans les sous-bassins situés à l'amont du réseau est moins coûteuse. Par ailleurs, l'installation de ces PCS dans la partie aval du réseau à l'avantage de retenir plus d'eau, mais à des coûts plus élevés (Cano and Barkdoll; 2017). Winston *et al.* (2016) ont également noté le grand potentiel des bassins de biorétention dans la réduction des volumes de ruissellement, même dans des sols mal drainés, avec, cependant, l'inclusion d'un système de stockage d'eau interne. Toutefois, et en accord avec d'autres études (Bhatt, 2017; Davis, 2008; Hatt *et al.*, 2009), Winston *et al.* (2016) ont indiqué que la capacité du système de biorétention est moindre dans l'atténuation du débit de pointe pour les événements à fort volume et à forte intensité. Encore récemment, Brett *et al.* (2018) ont démontré une diminution des débits de pointe et des volumes de ruissellement dans certains

bassins versants urbains de Blacksburg (Virginie) en installant des bassins de biorétention pour un événement de pluie de période de retour 10 ans.

## **2.10 Résumé**

La revue de littérature a mis en évidence les lacunes à combler pour réaliser une gestion intégrée des réseaux d'égout. En effet, aucun des outils ou méthodes de gestion cités dans la revue précédente, ni d'autres à notre connaissance, ne prend en considération simultanément les aspects structural et hydraulique dans un contexte de CC. Cela concerne même les outils et méthodes utilisant des techniques avancées pour améliorer ou même optimiser la réhabilitation des systèmes d'égout. En effet, certains d'entre eux ne considèrent que le processus de la détérioration structurale (Baah et al., 2015; Halfawy et al., 2008 et 2009) ou hydraulique (Yazdi et al., 2017a et 2017b; Vojinovic et al., 2014), alors que d'autres considèrent les deux processus, mais sans évaluer l'impact des CC sur la performance hydraulique (Diogo et al., 2018; Mohammadiun et al., 2018; Yazdi, 2018; Halfawy et al., 2008 et 2009). Tandis que les études adoptant les PCS pour améliorer la performance hydraulique des réseaux pluviaux ne prennent pas en compte la détérioration structurale des conduites.

### **3 Hypothèse, objectifs et originalité**

#### **3.1. Hypothèse et objectifs**

Tel que mis en lumière dans le chapitre précédent, la considération simultanée des processus de détérioration structurale et hydraulique dans la gestion des réseaux d'égout, dans un contexte de CC, serait un grand atout pour les gestionnaires, tout comme l'intégration de PCS dans la remise à niveau de la performance hydraulique des conduites. Ainsi, l'hypothèse de base de la thèse est que la prise en compte simultanée des deux processus de détérioration, en contexte de CC, et l'adoption de PCS permet d'améliorer le choix des interventions de renouvellement, de réduire les coûts associés à ces interventions et d'améliorer la performance globale des réseaux.

L'objectif principal de la thèse est de vérifier cette hypothèse. Pour ce faire, trois objectifs spécifiques sont définis :

- I. L'identification des facteurs ayant un impact significatif sur le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout, en contexte québécois, et leur intégration dans la modélisation mathématique de cette détérioration.
- II. L'élaboration d'une méthode de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de CC.
- III. Le développement d'une méthode de planification du renouvellement intégrée des réseaux de drainage urbain intégrant à la fois les facteurs structuraux et hydrauliques dans un contexte de CC et l'adoption de nouvelles pratiques de gestion.

#### **3.2. Originalité**

L'originalité de la thèse réside dans : i) la considération simultanée, dans la planification du renouvellement des conduites, des processus de détérioration de l'état structural et de la performance hydraulique dans un contexte de CC; et ii) la considération des PCS comme pratique alternative d'adaptation à ces changements. Cela dans le but d'élaborer une planification intégrée des interventions de renouvellement visant à rétablir et/ou maintenir une performance adéquate des réseaux de drainage urbain.

D'autre part, les méthodes proposées dans le cadre de ce projet de recherche pour évaluer et prédire les performances structurale et hydraulique dans un contexte de CC ciblent les conduites individuellement. Ceci permet d'identifier celles qui sont actuellement dysfonctionnelles, ou qui le seront en conditions futures, d'un point de vue structural et/ou hydraulique. L'identification des performances individuelles de chaque conduite permet de dresser un plan d'intervention par priorité et de faire un meilleur choix dans la stratégie de renouvellement. De plus, la méthode d'évaluation et de prévision de la performance structurale se base, pour la première fois à notre connaissance, sur un modèle statistique permettant d'intégrer des variables de type quantitatif et aussi qualitatif, qui caractérisent certains facteurs liés aux conduites d'égout (comme le type de matériau, le type de réseau, etc.).

### **3.3. Liste de contribution scientifiques**

- I. Élaboration d'une méthodologie permettant de : i) identifier les facteurs ayant un impact significatif sur le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout, en contexte québécois, et ii) modéliser cette détérioration en intégrant les facteurs jugés influents. Cette méthodologie se base sur une modélisation statistique utilisant le modèle de Cox (modèle de survie), et intégrant l'ensemble des données disponibles concernant les caractéristiques physiques et fonctionnelles des conduites d'égout. Cette méthodologie est traduite en langage de programmation informatique Matlab et appliquée aux conduites de deux réseaux d'égout québécois. La méthodologie en question et les résultats de son application font l'objet d'un article scientifique publié dans la Revue Canadienne de Génie Civil.
  
- IV. Élaboration d'une méthode de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de changement climatique. Elle permet d'identifier les conduites hydrauliquement contraignantes en conditions climatiques actuelles et d'évaluer l'évolution future de leur performance hydraulique dans un contexte de changement climatique. Celle-ci se base sur des simulations hydrologiques/hydrauliques utilisant le modèle de gestion des eaux pluviales SWMM

avec des événements pluviométriques isolés observés comme intrants. La méthode proposée est traduite en langage de programmation informatique Matlab et appliquée à deux réseaux d'égout sanitaire et unitaire canadiens. La méthodologie de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de changement climatique ainsi que les résultats de son application font l'objet d'un article scientifique publié au Journal of Water Resources Planning and Management.

- V. Développement d'une méthode de planification du renouvellement intégrée des réseaux de drainage urbain basée sur les résultats de la modélisation des performances structurale et hydraulique des conduites d'égout dans un contexte de changement climatique. La planification intégrée du renouvellement des conduites vise à mieux choisir les options de renouvellement permettant de maintenir des performances structurale et hydraulique adéquates sur au moins 25 ans au moindre coût. Elle se base sur la modélisation des deux performances, structurale et hydraulique, des conduites, compte tenu des changements climatiques. La méthodologie proposée à cet effet est traduite en langage de programmation informatique Matlab et appliquée à un réseau d'égout québécois. Les détails concernant cette planification ainsi que les résultats de son application font l'objet d'un article scientifique qui sera bientôt soumis.



## **4 Méthodologie**

Cette section présente l'ensemble des étapes, données et méthodes utilisées pour la planification intégrée du renouvellement des conduites d'égout proposée dans le cadre de ce projet de recherche. Elle se sépare en trois sous-sections : 1) la première (section 4.1) concerne les données et la méthode utilisées pour la modélisation du processus de la détérioration structurale des conduites d'égout; 2) la deuxième section (section 4.2) présente les données et la méthode proposée pour la modélisation de la performance hydraulique individuelle des conduites dans un contexte de CC; et 3) la dernière (section 4.3) résume les données et la méthode adoptée pour la planification intégrée du renouvellement des conduites des réseaux de drainage, basée sur les méthodes de modélisation présentées aux points 1 et 2. La Figure 4-1 résume les étapes clés de la méthodologie.



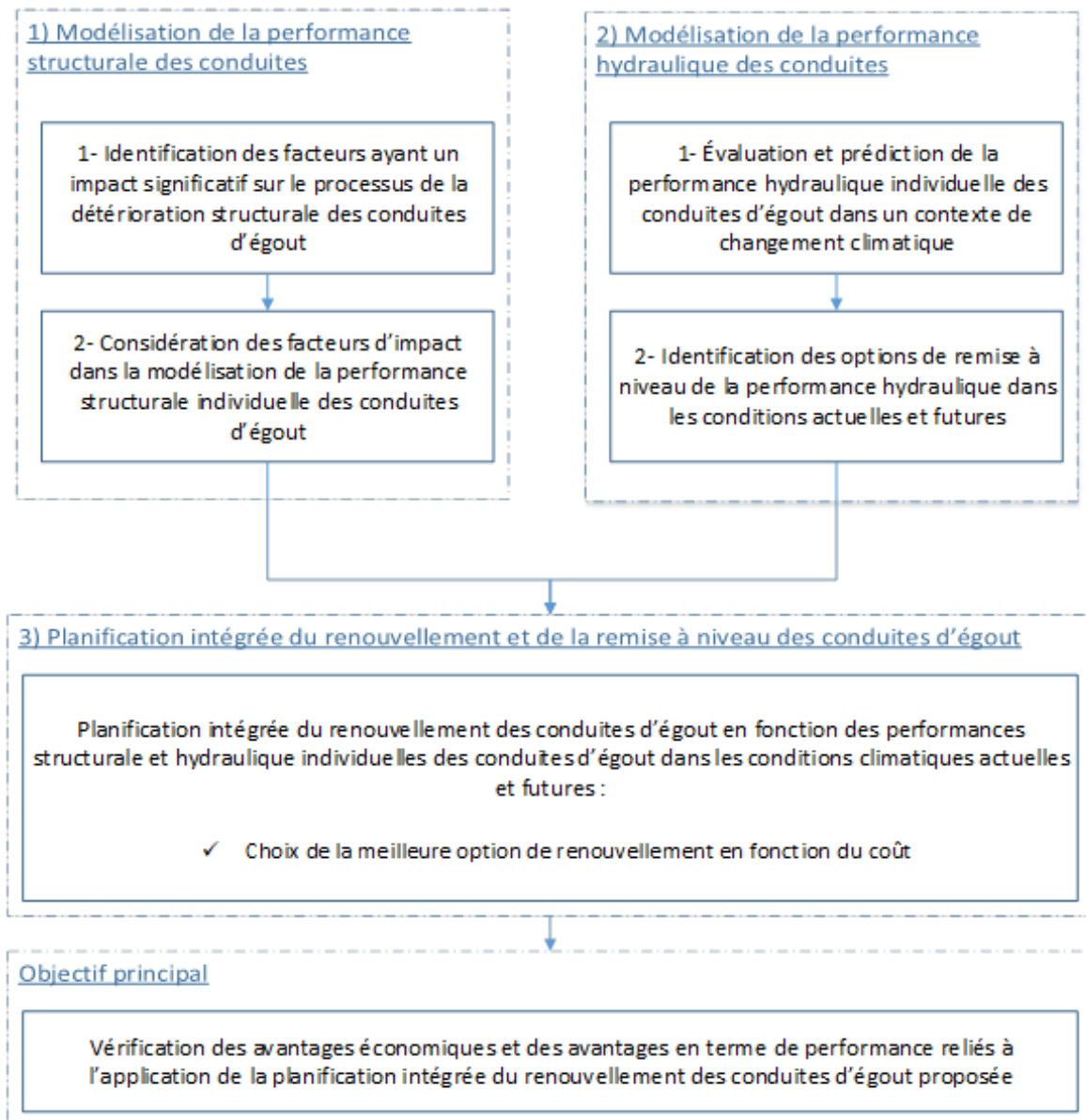


Figure 4-1. Schématisation des objectifs du projet de recherche

## 4.1. Identification des facteurs ayant un impact significatif sur la modélisation de la détérioration structurale des conduites d'égout

### 4.1.1 Description des données

Dans le cadre de ce projet et pour des fins d'application de la méthodologie de modélisation de la détérioration structurale des conduites, les réseaux de drainage de deux villes québécoises, appelés A et B pour des raisons de confidentialité, sont utilisés. Les bases de données représentant les caractéristiques physiques (date d'installation, diamètre, longueur, type de matériau et pente) et fonctionnelle (type de réseau) de l'ensemble des conduites d'égout de chaque réseau ont été fournies par les deux villes respectives. Selon la base de données de la ville A, le réseau d'égout contient 4 624 km de conduites, dont 2 067 km sont de type sanitaire, 1 972 km sont de type pluvial et 586 km sont de type unitaire. L'âge des conduites de ce réseau varie de 2 à 114 ans. Le réseau d'égout de la ville B contient 1 343 km de conduites. Dans cette ville, le réseau unitaire compte 443 km de conduites, le réseau pluvial compte 424 km de conduites et le réseau sanitaire compte 420 km de conduite. L'âge des conduites de ce réseau varie de 3 à 120 ans. Les Figures 4-2 et 4-3 présentent les gammes de diamètres et les types de matériau qui constituent les conduites de chacun de ces deux réseaux.

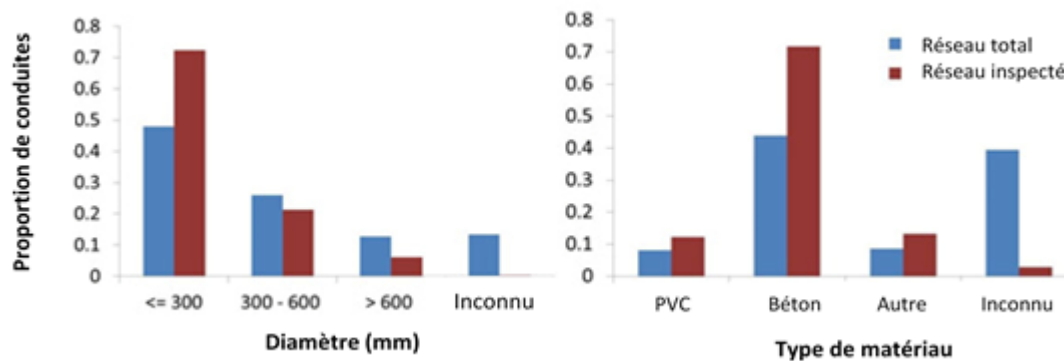


Figure 4-2. Caractéristiques physiques des conduites du réseau A

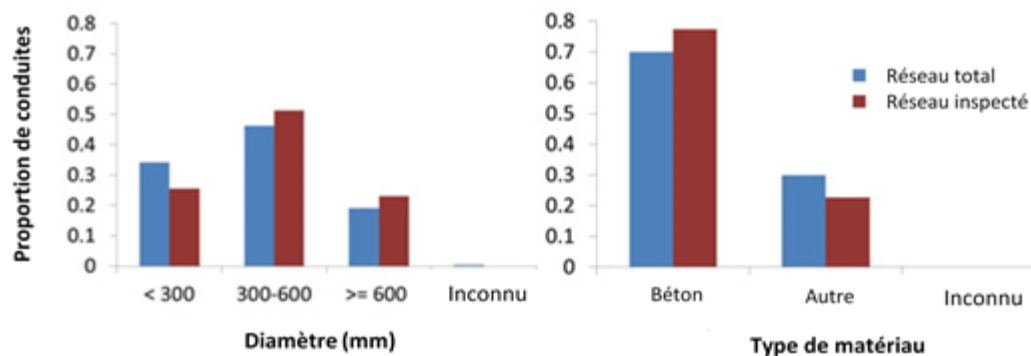


Figure 4-3. Caractéristiques physiques des conduites du réseau B

Deux autres bases de données contenant les défauts structuraux relevés sur chaque tronçon de conduite (défini comme une partie du réseau d'égout située entre deux regards ou intersections adjacentes, avec une pente, un diamètre et un matériau constants) lors des inspections télévisuelles ont été fournies par les deux villes à l'étude. Ces conduites représentent 21 et 15 % du nombre total de tronçons de conduite des réseaux A et B respectivement, ce qui est assez élevé par rapport à ce qui est normalement disponible dans les municipalités du Québec. Selon l'importance du défaut et le système de cotation (par exemple celui du WRc, 1994, utilisé par la Ville A), une cote allant de 1, défaut mineur, à 5, défaut nécessitant une intervention d'urgence, est attribuée à chaque défaut. De plus, les côtes attribuées aux défauts des conduites du réseau B, basées initialement sur un système de cotation différent (CERIU) ont été converties au système WRc (1994) pour harmoniser l'information. Dans le cadre de ce projet, seules la cote maximale par section et sa date de relevé ont été retenues pour attribuer une cote finale à chaque conduite et une date permettant de calculer son âge. En absence d'information au sujet de la date d'installation de la conduite, l'âge est estimé à partir de l'année d'installation du réseau routier le plus proche dans un rayon inférieur à 100 m. Toutefois, afin d'éviter la surestimation de l'âge des conduites, seules les conduites ayant moins de 70 ans lors de l'inspection sont prises en compte pour les deux réseaux. Une cote de 0 a été ajoutée pour désigner les conduites sans aucun défaut structural. Pour le réseau A, 82 % des conduites inspectées étaient en très bon à bon état (états 0 et 1), 15 % étaient dans un état intermédiaire (états 2 et 3) et seulement 3 % étaient dans un mauvais à très mauvais état (états 4 et 5). Pour ce qui est du réseau B, 51 % des conduites étaient en très bon à bon état, 47 % étaient dans un état intermédiaire et seulement 2 % étaient dans les états 4 et 5. Ainsi, en raison du nombre réduit

de conduites dans les états structuraux intermédiaires et mauvais, les conduites dans les états 2 et 3 et les conduites dans les états 4 et 5 ont été regroupées dans les classes 2-3 et 4-5, respectivement. Donnant ainsi quatre classes d'état structural : 0 (très bon état), 1 (bon état), 2-3 (état intermédiaire) et 4-5 (mauvais état).

#### **4.1.2 Méthode proposée**

Dans ce sous-objectif, il est question de déterminer, à partir des données disponibles, quels sont les facteurs qui influencent de façon significative le processus de la détérioration structurale. Les facteurs d'impact jugés influents sont par la suite intégrés dans un modèle mathématique d'évaluation et de prédiction de l'état structural des conduites d'égout. Les facteurs qui sont étudiés ici sont : l'âge, le diamètre, la longueur, le type de matériau, la pente et le type de conduite (pluviale, sanitaire ou unitaire). Ces facteurs ont été choisis en fonction de leur importance vis-à-vis du fonctionnement de la conduite, ainsi que de leur disponibilité. Ce sont, de plus, les facteurs les plus évalués dans la littérature concernant leur impact sur la détérioration structurale des conduites d'égout (voir Tableau A-1).

Dans la méthode proposée, l'identification des facteurs ayant un impact significatif sur le processus de la détérioration structurale des conduites est basée sur le modèle de Cox. L'une des principales conditions à l'utilisation de ce modèle est la non-corrélation entre les covariables. Dans cette méthode, la non-corrélation entre les facteurs est vérifiée à l'aide du test de Spearman.

La signification de l'impact des facteurs est évaluée en intégrant l'ensemble des facteurs, avec et sans considération de corrélation entre eux, dans le modèle de Cox. Certains de ces facteurs, de type qualitatif, nécessitent un codage spécifique pour être intégrés dans le modèle de Cox (p. ex. le matériau et le type de conduite). Ces variables sont codées par indicateurs de variables  $X_i$  de type binaire. Le nombre d'indicateurs de la variable  $i$  varie selon le nombre de catégories incluses dans cette même variable (égal au nombre de catégories moins un selon Klein et Moeschberger, 2003). Par exemple, pour le réseau B, le facteur type de conduite est codé comme suit : égout unitaire,  $X_1 = 1$  et  $X_2 = 0$ ; égout pluvial,  $X_1 = 0$  et  $X_2 = 1$ ; et égout sanitaire,  $X_1 = 0$  et  $X_2 = 0$ . Par la suite, la signification statistique des coefficients correspondant à chacun de ces facteurs est évaluée à l'aide du test du ratio de vraisemblance (Klein et Moeschberger, 2003). Ce dernier

vérifie si le coefficient (paramètre) testé est significativement non nul, donc considéré influent et, par conséquent, maintenu dans le modèle.

Dans le cadre de ce projet, la signification statistique de l'impact de chacun des facteurs étudiés est, également, évaluée avec deux autres méthodes classiques en guise de comparaison. La première consiste à séparer les conduites en groupes homogènes (cohortes) partageant les mêmes caractéristiques et à comparer, visuellement, l'évolution de leurs courbes de détérioration selon le modèle de Cox sans covariables, équivalent à l'utilisation du modèle de survie de Duchesne et al. (2013). Pour cela, les conduites des deux réseaux évalués ont été classées par facteur :

- *D* : i) > 300 mm, ii) entre 300 et 600 mm et iii) < 600 m pour les réseaux A et B
- *L* : i) > 60 m, ii) entre 60 et 120 m et iii) < 120 m pour le réseau A; i) > 60 m et i) < 60 m pour réseau B
- *M* : i) béton armé, ii) PVC et iii) autres pour le réseau A; i) béton et ii) autre pour le réseau B
- *C* : i) sanitaire et ii) unitaire pour le réseau A; i) sanitaire, ii) unitaire et iii) pluvial pour le réseau B

Donnant ainsi douze cohortes pour le réseau A et 11 cohortes pour le réseau B. La pente des conduites n'a pas été évaluée en raison de la faible variation entre les valeurs pour l'ensemble des conduites du réseau A. La pente n'est, cependant, pas disponible pour le réseau B.

La deuxième méthode classique consiste à évaluer si la distribution des valeurs des facteurs est significativement différente pour les différentes classes d'état structural à l'aide du test de Kurskal-Wallis (Caperaa et Van Custem, 1988). Ce test non paramétrique permet de vérifier si  $k$  variables ( $k \geq 2$ ) proviennent d'une même population ou si ces variables ont des lois identiques (Bertrand et Maumy, 2011; Rakotomalala, 2008). Lorsque les données d'un facteur suivent une même distribution statistique quel que soit l'état structural, le facteur est donc jugé non influent sur l'état structural.

### Modèle de Cox

Le modèle de Cox est une régression multivariée équivalente à une régression logistique ou linéaire, qui permet d'expliquer une variable dépendante par une fonction de plusieurs variables indépendantes (Timsit *et al.*, 2005). Adapté au processus de la détérioration de la performance

structurale, le modèle de Cox permet de modéliser comme variable aléatoire le temps qu'une conduite passe dans chacune des classes d'état structural considérée. Il s'agit alors, dans le cadre de ce projet, des temps de séjour passés à l'état 0, à l'état 1 et à l'état 2-3 (Figure 4-4). Le temps de séjour passé à l'état 4-5 n'a pas besoin d'être modélisé puisqu'une fois que la conduite atteint cette classe d'état structural, elle y reste jusqu'à ce qu'elle soit réparée ou remplacée.

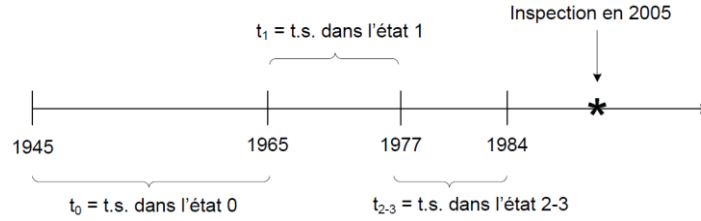


Figure 4-4. Illustration des divers temps modélisés (cas d'une conduite dans l'état 4-5 lors de son inspection; t.s. = temps de séjour; tiré de Duchesne et al., 2011)

Les fonctions de densité de probabilité (PDF) des temps de séjour passés dans chacune des trois classes d'état structural (0, 1 et 2-3) sont exprimées par des fonctions exponentielles. Ces PDF sont associées à des fonctions de risque constantes dans le temps, qui sont les mieux adaptées pour décrire le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout. L'équation 4-1 donne la PDF associée au temps de séjour passé dans un état  $j$  ( $j=0, 1$  et  $2-3$ ).

$$f_j(t, X) = k_j e^{\beta_j X} e^{-k_j e^{\beta_j X} t} \quad (4-1)$$

où :  $t$  = temps de résidence dans l'état structural  $j$ ;  $X$  = vecteur de variables explicatives; et  $k_j$  et  $\beta_j$  = paramètres du modèle correspondant à l'état structural  $j$  ( $j = 0, 1$  ou  $2$ ). Lorsque les coefficients  $\beta_j$  sont égaux à zéro, le modèle de Cox devient équivalent au modèle de survie de Duchesne *et al.* (2013).

À chacune des PDF des temps de séjour considérées est associée une fonction de survie (équation 4-2), qui modélise la probabilité que le temps de séjour  $T$  dans une classe d'état structural donné  $j$  ( $= 0, 1$  ou  $2-3$ ) soit supérieur à  $t$ .

$$S_j(t, X) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f_j(t, X) dt \quad (4-2)$$

Les paramètres du modèle  $k_j$  et  $\beta_j$ , correspondant aux trois premières classes d'état structural, sont estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance, basée sur l'état structural observé lors des inspections télévisuelles pour un échantillon de conduites d'égout représentatives; leur valeur est donc propre à chaque réseau. Selon cette méthode, on détermine la valeur des paramètres en maximisant la fonction de vraisemblance donnée à l'équation 4-3.

$$L = \prod_{k \in cd_0}^{n_{cd_0}} P_0(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_1}^{n_{cd_1}} P_1(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_2}^{n_{cd_2}} P_2(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_3}^{n_{cd_3}} P_3(t_k, X_k) \quad (4-3)$$

Avec :  $t_k$  : âge de la conduite inspectée  $k$  (années);  $X_k$  = valeurs des covariables pour la conduite inspectée  $k$ ;  $cd_j$  = ensemble des conduites inspectées qui sont dans l'état structural  $j$  au moment de leur inspection à l'âge  $t_k$ ; et  $n_{cd_j}$  = nombre de conduites dans l'ensemble  $cd_j$ .

## 4.2. Méthode d'évaluation et de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de CC

### 4.2.1 Description des données

#### Secteurs d'étude

Deux secteurs de réseau de drainage sont utilisés dans le cadre de l'évaluation de la performance hydraulique des réseaux de drainage urbains. L'un est situé dans la ville A et le deuxième est situé dans la ville B. Les caractéristiques de ces réseaux et leur modélisation dans SWMM (illustrées à la Figure 4-5 ont été fournies par les municipalités respectives. Le calage des modèles SWMM a été réalisé par les municipalités en se basant sur : 1) pour le réseau A, cinq épisodes de pluie (de récurrence jusqu'à 5 ans), enregistrés par des pluviomètres proches, et des mesures de débit recueillies entre juillet et août 2011 (Fortier et al., 2014); et 2) pour le réseau B, deux campagnes de mesures de débit effectuées sur deux périodes distinctes (du 17 septembre au 16 octobre 2014 et du 25 août au 23 septembre 2015) et des données pluviométriques observées pour ces mêmes périodes (selon les communications des gestionnaires).



Figure 4-5. Modèles SWMM pour les réseaux A (droite) et B (gauche)

Le réseau A correspond à un réseau mixte (pluvial et unitaire) d'une longueur totale de 46 km de conduites (de 0,125 à 1,8 m de diamètre) qui drainent une superficie de 378 ha (23% de superficie imperméable). Le réseau B est un réseau unitaire de 70 km de conduites drainant 475 ha (36% de superficie imperméable), avec des diamètres de conduite variant de 0,15 à 3,8 m.

#### Données de pluie



La modélisation de la performance hydraulique individuelle des conduites des réseaux à l'étude a été réalisée à l'aide de six événements observés isolés (EOI; enregistrées entre 1943 et 1994 dans des stations météorologiques situées dans le sud du Québec) de durées allant de 1 à 24 h et de période retour de 2 à 5 ans (selon les courbes intensité-durée-fréquence créées par Mailhot et Talbot (2011) et par Villeneuve et al. (2007)). Cette modélisation a été faite en considérant comme conditions initiales un réseau sec et un sol non saturé. Les EOI utilisés ont été sélectionnés pour : 1) avoir des distributions et des intensités temporelles plus réalistes que celles de pluies de conception; 2) cibler des événements susceptibles d'entraîner des surcharges, et même des inondations, dans les conduites d'égout, contrairement aux pluies de conception souvent utilisées pour la conception des réseaux; et 3) réduire le temps de simulation, qui peut devenir un problème lors de la simulation de séries de précipitations continues (Notaro et al., 2016). La Figure 4-6 illustre la répartition de la pluie dans le temps pour chaque événement.

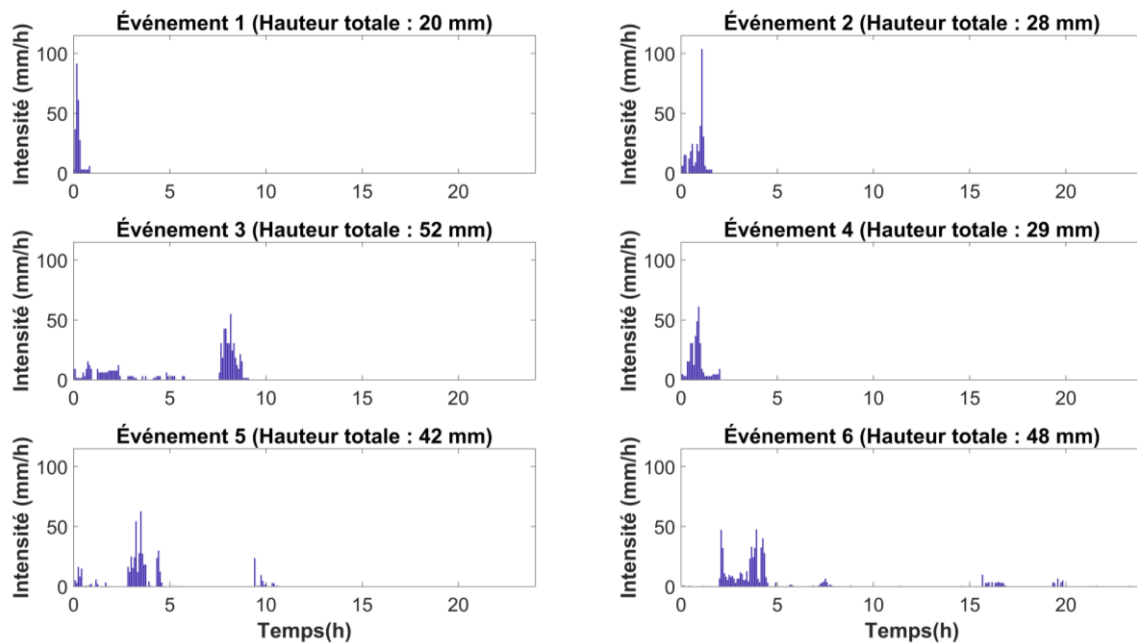


Figure 4-6. Profil de l'intensité (en mm/ aux 5 min) de pluie des six événements

### Impact des changements climatiques

Pour produire des événements de pluies représentatifs des conditions climatiques futures, à savoir d'ici 25 ans, un facteur multiplicatif de 1,15 a été appliqué à l'intensité de pluie à chaque pas de temps de 5 min pour l'ensemble des six événements. Le choix de ce facteur est basé sur les conclusions des études de Mailhot et al. (2007a et 2012) concernant l'évolution de l'intensité des événements de précipitations extrêmes, décrites en détail à la section 2.7.2. En effet, dans ces études, il a été démontré que les intensités des événements extrêmes de différentes durées et période de retour, dans le sud du Canada et le sud du Québec, pourraient augmenter de 10 à 20 % dans le futur (2041-2070) par rapport à la période actuelle (1961-1990 ou 1968-2000, selon l'étude).

La performance hydraulique des conduites est évaluée à des intervalles réguliers de 5 ans, donnant 6 horizons au total, pour actualiser l'impact des CC selon les nouvelles mises à jour des prédictions des modèles climatiques. Pour cela, l'évolution de l'intensité de pluie est supposée linéaire au cours des 25 prochaines années. Ainsi, les facteurs d'augmentation de l'intensité de pluie pour chaque horizon ont été calculés avec l'équation (4-4)

$$I(t) = I_0 + (I_k - I_0) \frac{t - t_0}{t_k - t_0} \quad (4-4)$$

avec :  $I(t)$  = intensité des précipitations à l'année  $t$ ,  $I_0$  = intensité des précipitations à l'année  $t_0$  (période de référence; EOI original),  $I_k$  = intensité des précipitations à l'année  $t_k$  ( $I_k = 1,15 I_0$  dans notre cas), et  $t_k$  = année des prévisions climatiques ( $t_k - t_0 = 25$  ans dans notre cas).

#### 4.2.2 Méthode proposée

L'organigramme de la Figure 4-8 résume les étapes de la méthode proposée pour modéliser et évaluer la performance hydraulique individuelle des conduites d'égout. Cette performance correspond à la capacité des conduites à drainer les eaux de pluie d'une période de retour donnée sans créer de surcharge ni d'inondation (dysfonctionnement hydraulique; voir Figure 4-7). Dans cette méthode, une surcharge est enregistrée lorsque le niveau de l'eau dans un nœud dépasse le niveau de la couronne de la plus petite conduite situé immédiatement à l'aval de ce dernier. Un nœud en surcharge est considéré à risque d'inondation lorsque la surcharge, dans ce dernier, atteint un niveau critique (p. ex. 1 m du niveau du sol dans cette thèse). La méthode

ainsi proposée consiste à identifier les conduites à remplacer, appelées conduites contraignantes, afin d'éviter toute surcharge ou risque d'inondation causé par un événement de pluie donné.

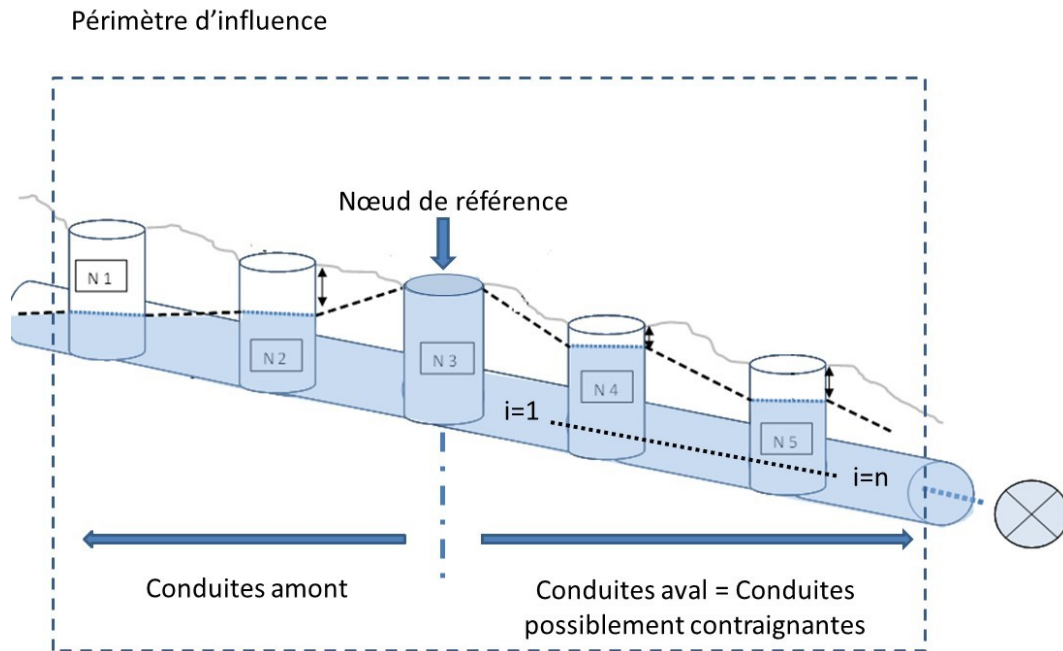


Figure 4-7. Exemple de délimitation d'un dysfonctionnement hydraulique; identification de son nœud de référence et des conduites possiblement contraignantes

Tel que le montre l'organigramme de la Figure 4-8, la méthode d'identification des conduites contraignantes est constituée de trois étapes principales :

- 1- La première consiste à réaliser une simulation HH avec le modèle SWMM pour chaque EOI et à identifier les nœuds en surcharge. Dans cette étape, tous les nœuds en charge adjacents et les conduites reliées à ces nœuds sont regroupés en zones de surcharges (ZS). La Figure 4-7 illustre un exemple de dysfonctionnement hydraulique délimité.
- 2- La deuxième étape concerne l'identification d'un nœud de référence (NR) et de toutes les conduites susceptibles d'être responsables de la surcharge dans chaque ZS, appelées conduites possiblement contraignantes (CPC). NR correspond au nœud dans lequel le niveau de l'eau est le plus élevé. Les conduites CPC sont, quant à elles, nécessairement situées à l'aval de NR. Par ailleurs, il est possible qu'une seule des conduites de CPC ou que l'ensemble de ces

conduites soient réellement responsables du dysfonctionnement d'une ZS donnée. Pour cela, une matrice de combinaisons des conduites de CPC ( $M_{CPC}$ ) est construite (équation 4-5). Le nombre de lignes dans cette matrice est égal au nombre de conduites CPC. La première ligne de la matrice  $M_{CPC}$  contient la dernière conduite de CPC (la conduite située le plus à l'aval de la ZS) ainsi que toutes les conduites situées immédiatement à l'aval à celle-ci et qui ont la même capacité hydraulique que cette dernière, si le cas se présente. La dernière ligne de la matrice  $M_{CPC}$  contient l'ensemble des conduites CPC et, éventuellement, les conduites ayant la même capacité hydraulique que la dernière conduite de CPC situées immédiatement à l'aval de celle-ci.

$$M_{CPC} = \begin{bmatrix} P_n & & & & & & \\ P_{n-1} & P_n & & & & & \\ P_{n-2} & P_{n-1} & P_n & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ P_1 & \cdot & \cdot & P_{n-2} & P_{n-1} & P_n & \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

3- La dernière étape de la méthode proposée permet d'identifier la ou les conduites réellement contraignantes, responsables du dysfonctionnement d'une ZS donnée. Pour cela, l'évaluation de la responsabilité des conduites CPC se fait sur une ligne de la matrice  $M_{CPC}$  à la fois, de la première vers la dernière. Cette évaluation consiste à augmenter la capacité hydraulique de la ou des conduites évaluées de 25 mm jusqu'à ce que le dysfonctionnement de la ZS disparaisse ou que le diamètre de la conduite située immédiatement à l'aval de la ZS et à l'extérieur de celui-ci soit atteint. Lorsque le dysfonctionnement disparaît, les conduites évaluées sont considérées contraignantes. Autrement, l'évaluation est appliquée à la combinaison suivante de conduites. Si toutes les lignes de la matrice sont évaluées sans, toutefois, identifier les conduites contraignantes, le dernier diamètre ( $D_r$ ) appliqué à la conduite la plus à l'aval de la ZS est retenu. La ZS est ensuite élargie pour inclure la ou les conduites située(s) immédiatement à l'aval et à l'extérieur de la ZS initiale et qui ont le même diamètre que  $D_r$ . L'identification des conduites contraignantes de la nouvelle ZS passe, par la suite, par les mêmes étapes que la méthode décrite ci-dessus. Finalement, les diamètres des conduites contraignantes permettant d'éliminer la surcharge, à chaque horizon d'évaluation,

représentent les diamètres nécessaires pour un éventuel remplacement à court ou à long terme.

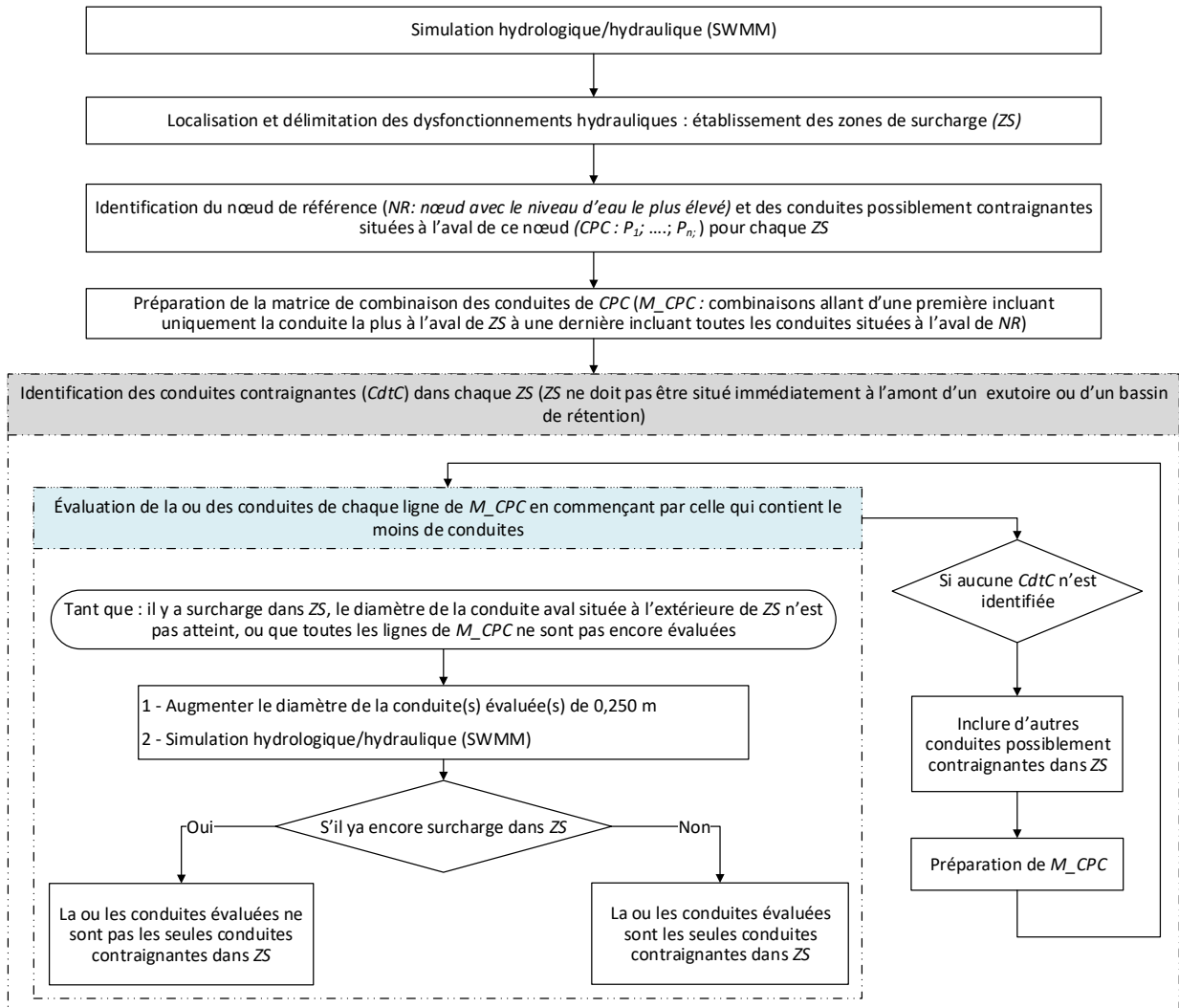


Figure 4-8. Méthode d'identification des conduites contraignantes de chaque zone de surcharge

### 4.3. Méthode de planification intégrée de renouvellement des conduites des réseaux de drainage urbain

#### 4.3.1 Description des données et site d'étude

La méthode proposée de planification intégrée du renouvellement des conduites des réseaux de drainage intègre à la fois les facteurs structuraux et hydrauliques dans un contexte de CC et

adopte de nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales. Elle a été appliquée au réseau A, également utilisé pour l'évaluation de la performance hydraulique des conduites d'égout. La description détaillée de ce réseau est donnée à la section 4.2.1. Seul le deuxième événement de pluie illustré à la Figure 4-6 est utilisé pour cette application. Le choix de cet événement réside dans le fait qu'il soit l'événement causant le plus de surcharges dans le réseau A parmi les six EOI précédemment considérés (voir section 4.2.1).

#### **4.3.2 Méthode proposée**

La planification intégrée de renouvellement (PIR) vise à identifier les interventions et leur moment d'implantation de façon à permettre de maintenir un niveau de performances hydraulique et structurale acceptable du réseau de drainage urbain. Elle est réalisée, tel que mentionné précédemment, en intégrant la modélisation des deux processus de détérioration, structurale et hydraulique, dans un contexte CC. La modélisation des performances futures est effectuée pour les 25 prochaines années afin de maintenir un niveau acceptable de précision en termes de prévision de la détérioration structurale. De plus, cette planification peut être renouvelable à des intervalles réguliers de 5 ans pour : 1) intégrer les nouvelles avancées par rapport aux prévisions des modèles climatiques; 2) considérer les nouvelles informations sur l'état structural des conduites; et 3) prendre en compte la période généralement considérée par les gestionnaires de réseaux pour la mise à jour des interventions prioritaires (voir par exemple MAMROT, 2013). D'une part, un niveau acceptable de performance hydraulique est, rappelons-le, défini ici comme la capacité du réseau à acheminer les débits générés par un événement de pluie de conception donné (ex. pluie de durée 1 h et de période de retour 2 ou 5 ans) sans surcharge ni inondation dans le réseau. D'autre part, un dysfonctionnement structural est enregistré lorsqu'une conduite atteint l'état structural 4-5; une intervention doit être planifiée en priorité pour les conduites dans cet état, car elles représentent un danger imminent (par exemple, un effondrement) et menacent, entre autres, la sécurité des citoyens.

La PIR proposée se base sur les résultats de la modélisation des performances structurale et hydraulique actuelle et future (dans 25 ans) dans le but de sélectionner et de planifier les meilleures options de renouvellement (MOR) à mettre en place dans tout le réseau. Le choix des MOR est basé sur le coût associé à toutes les interventions possibles et leur faisabilité. Les MOR choisies devraient, ainsi, maintenir la performance structurale et hydraulique du réseau sur un

horizon de 25 ans à un coût minimal. Les MOR peuvent être soit le remplacement des conduites, avec ou sans augmentation de leur capacité hydraulique, l'installation de PCS ou les deux.

La section suivante explique les méthodologies utilisées pour : 1) la modélisation de la performance structurale actuelle et future, 2) la modélisation de la performance hydraulique actuelle et future et 3) le choix et la planification des MOR.

#### Modélisation de la performance structurale

La modélisation de la performance structurale des conduites du réseau à l'étude est réalisée à l'aide du modèle de Cox (décrit à la section 4.1.2), en considérant uniquement les facteurs jugés significativement influents. Le modèle est initialement calé sur les données d'inspection des conduites du réseau étudié. Ce dernier permet d'estimer, pour chaque conduite, l'année à laquelle celle-ci passe à l'état 4-5. Dans la PIR, les conduites à l'état 4-5 sont immédiatement remplacées par une conduite dont le diamètre (définissant la capacité hydraulique) dépend des résultats concernant leur performance hydraulique actuelle et future.

#### Modélisation de la performance hydraulique dans un contexte de changement climatique

La performance hydraulique individuelle des conduites aux horizons actuel et futur consiste à identifier : 1) les conduites contraignantes et le diamètre qu'elles devraient avoir pour éviter toute surcharge en conditions actuelles et futures, selon la méthodologie décrite à la section 4.2.2; et 2) l'emplacement idéal et la superficie des PCS nécessaires pour éliminer les surcharges attendues à l'horizon futur (d'ici 25 ans). La méthodologie utilisée pour l'identification de l'emplacement et de la superficie de PCS pour chaque ZS est illustrée par l'organigramme donné à la Figure 4-10. Cette méthodologie est constituée de quatre étapes :

- Étape 1 : simulation hydrologique/hydraulique à l'aide du modèle SWMM pour un événement et délimitation des dysfonctionnements hydrauliques (surcharges) en ZS, comme dans la méthode d'identification des conduites contraignantes. La Figure 4-9, illustre l'événement utilisé dans le cadre de l'application de cette méthodologie, aux conditions actuelles et futures.

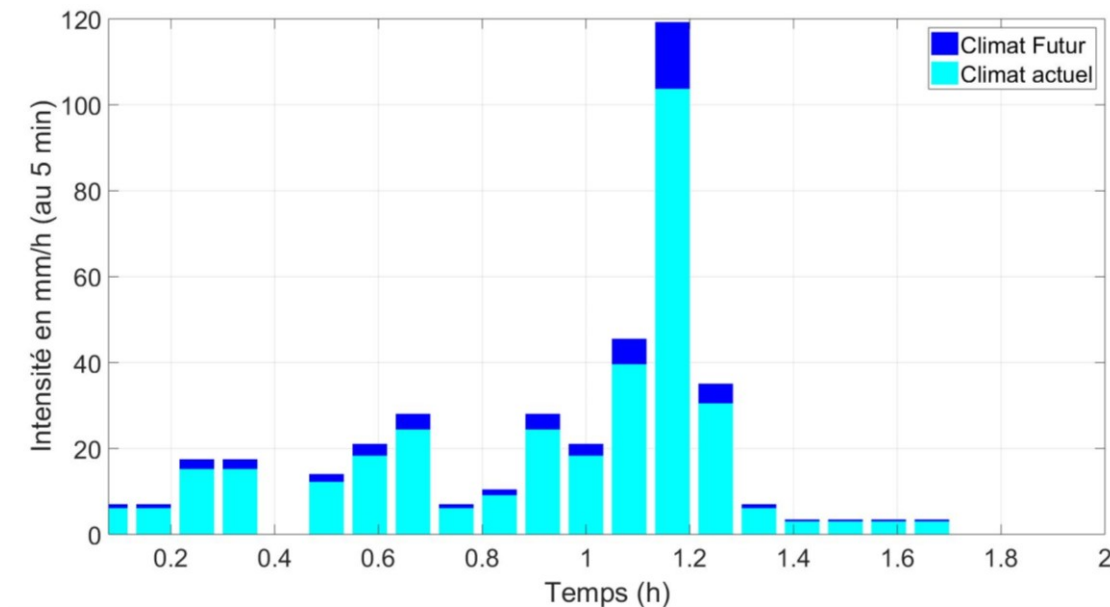


Figure 4-9. Événement de pluie, représentant les conditions actuelles et futures, utilisé pour évaluer la performance hydraulique du réseau d'égout étudié

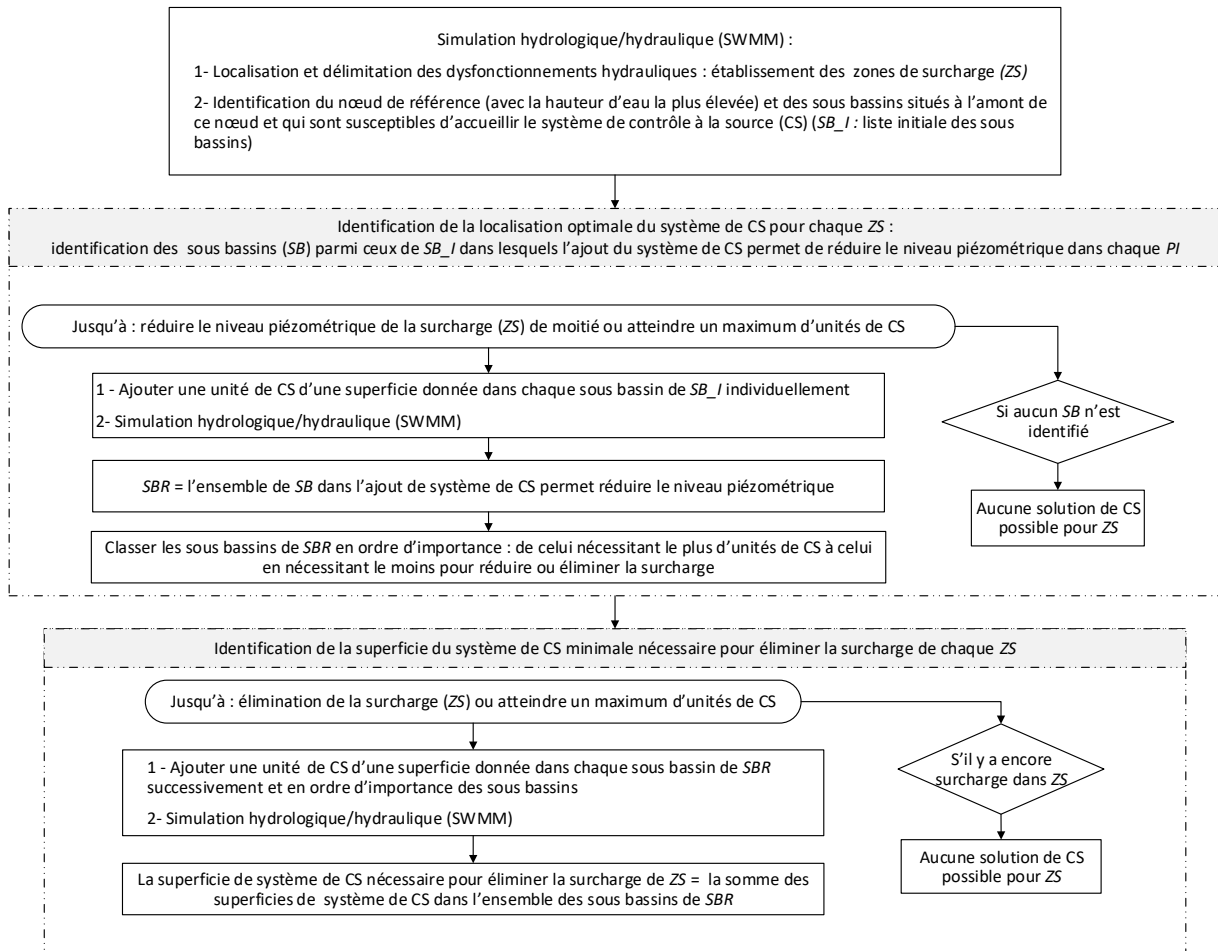
- Étape 2 : identification du *NR* et sélection de tous les sous-bassins drainés par ce nœud, situés à l'amont de *NR*, pour chaque *ZS*. L'identification du *NR* est aussi basée sur la méthodologie décrite dans la section 4.2.2.
- Étape 3 : identification des sous bassins dans lesquels l'ajout de PCS a un impact significatif sur la réduction ou l'élimination de la surcharge de chaque *ZS*. Cette évaluation se fait sur chacun des sous-bassins, initialement identifiés dans l'étape 2, individuellement et indépendamment les uns des autres. Pour cela, des unités de PCS d'une superficie donnée (ici : équivalente à 5 % de la superficie imperméable totale (SIT) du sous-bassin, proportion permettant à la fois d'évaluer l'impact de l'ajout des unités de PCS dans le sous-bassin, l'importance de ce sous-bassin par rapport aux autres sous-bassins évalués et la réduction du temps nécessaire à cette évaluation) sont ajoutées temporairement au sous-bassin évalué jusqu'à : i) la réduction du niveau de la surcharge ou de la ligne piézométrique d'un minimum de moitié, ou ii) l'atteinte d'une superficie maximale de PCS préalablement choisie (qui est de 20 % de la SIT du sous-bassin dans cette étude, pourcentage jugé raisonnable tenant compte des autres composantes d'infrastructures à mettre en place en milieux urbains). Un minimum de réduction du niveau de la surcharge est considéré ici pour tirer avantage des possibles combinaisons de PCS installées dans différents sous-bassins pour certaines *ZS*. En effet, l'ajout de PCS dans un seul sous-bassin



ne permet pas toujours d'éliminer certaines surcharges, en particulier dans le cas des grandes ZS (avec plusieurs nœuds en charge). Il est supposé alors, sur la base de quelques essais erreurs, que l'ajout de PCS dans plusieurs sous-bassins peut éliminer des surcharges étendues sur une grande zone.

Lorsque la superficie maximale de PCS possible est atteinte dans le sous-bassin évalué sans aucun impact sur la surcharge, le sous-bassin en question est considéré non efficace pour régler cette surcharge. Ainsi, seuls les sous-bassins identifiés efficaces sont retenus pour l'étape suivante. Ces derniers sont classés en ordre d'importance, c.-à-d. du sous-bassin nécessitant le moins de superficie de PCS à celui qui en nécessite le plus pour réduire le niveau de la surcharge ou l'éliminer. Dans le cas où aucun sous-bassin n'est sélectionné pour une ZS donnée, la ZS en question est donc considérée sans solution PCS.

- Étape 4 : identification du minimum de superficie requis pour l'ensemble des sous-bassins, identifiés à l'étape 2, nécessaire à l'élimination de la surcharge de chaque ZS. Cela consiste à ajouter des unités de PCS d'une superficie donnée (0,1 % de SIT du sous-bassin dans ce cas-ci, une proportion correspondant à une superficie assez faible afin ne pas surestimer la superficie nécessaire en PCS et assez importante pour avoir un impact sur la diminution du volume d'eau drainé vers le réseau d'égout établie selon des tests « essai-erreur » réalisés au préalable), en commençant par le sous-bassin le plus important, jusqu'à élimination de la surcharge ou jusqu'à atteindre un maximum de superficie de PCS (correspondant à 20 % de de la SIT du sous-bassin) dans tous les sous-bassins identifiés pour la ZS étudiée. Les zones de surcharge persistantes malgré l'ajout d'un maximum de superficie de PCS dans tous les sous-bassins identifiés dans l'étape 3 sont, aussi, considérés sans solution PCS.



**Figure 4-10. Méthodologie d'identification de la localisation et de la superficie de PCS nécessaire à l'élimination des dysfonctionnements hydrauliques**

Dans le cadre de ce projet, seuls les systèmes de biorétention sont considérés comme PCS, en raison de leur efficacité éprouvée (Brett et al., 2018; Winston et al., 2016) et de la possibilité de les installer dans des espaces restreints comme le long des trottoirs. Toutefois, la méthodologie proposée ici peut être appliquée en utilisant d'autres types de PCS. Dans un premier temps et pour l'ajout de cellules de biorétention, une cellule de biorétention standard est ajoutée dans le modèle SWMM pour définir et paramétrer ses couches de surface, de sol et de stockage. Aucun drain souterrain n'est intégré, dans notre application, pour maximiser le processus d'infiltration. De plus, tout ruissellement provenant des zones imperméables du sous-bassin où est installée la PCS est d'abord dirigé vers la biorétention avant d'être drainé par les conduites souterraines (en cas de débordement du système de biorétention). La paramétrisation des couches de la cellule de biorétention a été réalisée dans une étude précédente (voir Makungu, 2018).

### Planification intégrée de renouvellement des conduites d'un réseau de drainage urbain

Tel que mentionné précédemment, pour bien planifier le renouvellement des conduites d'un réseau de drainage donné, les performances structurale et hydraulique de l'ensemble de ses conduites sont estimées dans les conditions climatiques actuelles et futures. Les conditions climatiques actuelles et futures seront désignées respectivement par horizon actuel (HA) et horizon futur (HF) dans la suite du document. Ainsi, considérant tous les types de dysfonctionnements en HA et ceux qui se produiront en HF, pour chaque conduite individuellement, la PIR proposée permet d'identifier ou de choisir les meilleures options de renouvellement possibles, soit celles qui sont les plus rentables possible tout en évitant les surcharges pour l'événement de conception en HA et HF. Quatre cas de dysfonctionnements sont considérés : 1) Cas 1 : conduite à capacité hydraulique insatisfaisante (conduite contraignante) et qui se trouve également dans la dernière classe d'état structural (état 4-5); 2) Cas 2 : conduite contraignante dans un état structural adéquat; 3) Cas 3 : conduite à l'état structural 4-5 avec une performance hydraulique adéquate; et 4) Cas 4 : conduite présentant des performances hydraulique et structurale adéquates.

La PIR proposée considère les conduites du réseau une à la fois, sauf dans le cas d'un dysfonctionnement hydraulique. Dans ce cas, toutes les conduites contraignantes pour une même surcharge sont prises en compte simultanément dans le choix de l'intervention à mettre en place. En effet, et comme décrit dans la section 4.2.2, une conduite peut être l'unique contraignante ou faire partie d'un ensemble de conduites contraignantes pour une ZS donnée. Le choix de l'option de renouvellement à mettre en place à HA pour une(des) conduite(s) donnée(s) dépend : 1) du cas dans lequel se classe(nt) cette(ces) conduite(s) à HA et de l'évolution de ses(leurs) performances structurale et hydraulique en HF, basée sur les méthodologies de modélisation décrites précédemment; 2) de l'emplacement de la(les) conduite(s) dans le réseau, cette condition étant considérée uniquement en présence de dysfonctionnement hydraulique puisque certaines surcharges peuvent être tolérées dans des endroits spécifiques, par exemple en amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention; 3) des options de renouvellement possibles, puisque certains dysfonctionnements hydrauliques ne peuvent pas être résolus par l'ajout de PCS; et 4) du coût associé à chacune des options possibles. Ainsi l'option la moins onéreuse est finalement retenue, lorsque plusieurs options sont possibles. Le coût utilisé pour la comparaison et le choix des options correspond uniquement au coût de construction par unité. Ce dernier

varie de 105 à 851 \$CAD/m<sup>2</sup> pour la biorétention et de 1 500 à 5 250 \$CAD par mètre linéaire pour le remplacement des conduites. Ces derniers sont colligés des documents techniques relatant l'installation de ces options de renouvellement dans plusieurs municipalités au Québec. Ainsi pour chaque dysfonctionnement, le coût minimal total et le coût maximal total correspondants à chacune des options de renouvellement possibles, permettant d'éliminer le dysfonctionnement dans les conditions actuelles et futures (pendant les 25 prochaines années au moins), sont calculés. Ces coûts sont calculés en fonction de : i) la superficie totale en mètre carré de PCS; ii) la longueur totale en mètre linéaire de conduites à remplacer; et iii) la superficie totale en mètre carré de PCS et la longueur totale en mètre linéaire de conduites à remplacer nécessaires pour résoudre un dysfonctionnement. L'option dont le coût moyen total est le plus faible est finalement choisie. L'illustration de la Figure 4-11 résume l'ensemble des options de renouvellement possibles selon le type de dysfonctionnement actuel que représente chacune des conduites et des dysfonctionnements prévus à l'horizon futur (d'ici 25 ans).

#### **Cas 1 : Conduite hydrauliquement contraignante appartenant à une ZS donnée et représentant un dysfonctionnement structural à l'horizon actuel**

- ZS située immédiatement à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention
  - Aucune intervention n'est requise (ZS tolérée)
- ZS sans mesure de CS possible
  - Unique option : remplacer toutes les conduites contraignantes de la ZS par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
- ZS non localisée à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention et avec mesure de CS possible
  - Option 1 : remplacer toutes les conduites contraignantes de la ZS par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
  - Option 2 : installer un système de CS dimensionné pour l'horizon futur et remplacer uniquement la ou les conduites de la ZS qui seront dans l'état structural 4 dans l'horizon futur sans changement de leur capacité hydraulique

#### **Cas 2 : Conduite hydrauliquement contraignante appartenant à une ZS donnée mais ayant un bon état structural à l'horizon actuel**

- ZS située immédiatement à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention
  - Aucune intervention n'est requise (ZS tolérée)
- ZS sans mesure de CS possible
  - Unique option : remplacer toutes les conduites contraignantes de la ZS par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
- ZS non localisée à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention et avec mesure de CS possible
  - Option 1 : remplacer toutes les conduites contraignantes de la ZS par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
  - Option 2 : installer un système de CS dimensionné pour l'horizon futur et remplacer uniquement la ou les conduites de la ZS qui seront dans l'état structural 4 dans l'horizon futur sans changement de leur capacité hydraulique

#### **Cas3 : Conduite ayant uniquement un dysfonctionnement structural**

- ❖ Conduite sans problème hydraulique prévu pour l'horizon futur
  - Unique option : remplacer la conduite sans changement de capacité hydraulique
- ❖ Conduite prévue pour devenir hydrauliquement contraignante dans l'horizon futur (attribuée à une ZS donnée)
  - ZS située immédiatement à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention
    - Unique option : remplacer la conduite sans changement de capacité hydraulique (ZS tolérée)
  - ZS sans mesure de CS possible
    - Unique option : remplacer toutes les conduites contraignantes du PI par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
  - ZS non localisée à l'amont d'un exutoire ou d'un bassin de rétention et avec mesure de CS possible
    - Option 1 : remplacer toutes les conduites contraignantes de la ZS par des conduites dimensionnées pour l'horizon futur
    - Option 2 : installer un système de CS dimensionné pour l'horizon futur et remplacer uniquement la ou les conduites de la ZS qui sont ou qui seront dans l'état structural 4 dans l'horizon futur sans changement de leur capacité hydraulique

**Figure 4-11. Options de renouvellement possible pour une conduite donnée et ses conduites adjacentes en cas de dysfonctionnement hydraulique, en fonction de ses performances hydraulique et structurale actuelles et futures**

#### **4.3.3 Avantages de l'approche proactive par rapport à une approche réactive traditionnelle**

Pour mettre en évidence l'importance de la prise en compte simultanée des performances hydraulique et structurale dans un contexte de CC, le coût moyen total (CMT) associé aux options de renouvellement choisies selon la méthode de planification de renouvellement intégrée est comparé à celui associé aux options issues de l'application d'une approche réactive plus traditionnelle.

##### *Calcul du coût moyen total de l'approche réactive*

L'approche réactive est basée sur une évaluation instantanée et individuelle des performances hydraulique et structurale des conduites dans un climat considéré stationnaire. Pour cette dernière, le CMT correspond à l'ensemble des coûts associés aux options de renouvellement des conduites nécessaires pour : 1) la mise à niveau des conduites du réseau aux conditions actuelles, et 2) requises pour éliminer les dysfonctionnements prévus dans 25 ans sur le réseau modifié. Pour cette approche, le CMT est calculé en considérant ou non l'ajout de PCS. Lorsque les PCS sont considérés, le CMT correspond à la somme des coûts de : 1) la superficie totale des PCS, identifiée pour les ZS éligibles à cette option (dans le cas de l'approche réactive traditionnelle, contrairement à l'approche proactive, une identification globale de l'emplacement et de la superficie de PCS est utilisée; pour ce faire, toutes les cellules de PCS identifiées pour une ou plusieurs ZS sont conservées dans le réseau lors de l'évaluation des autres ZS); 2) la longueur totale des conduites contraignantes à remplacer afin d'éliminer les dysfonctionnements hydrauliques restants; et 3) la longueur totale des conduites remplacées en raison de dysfonctionnements structuraux, à l'exception des conduites remplacées en raison de dysfonctionnements hydrauliques. Dans le cas où l'option PCS n'est pas envisagée, le CMT correspondant aux coûts de remplacement de la longueur totale des conduites représentant des dysfonctionnements hydrauliques et/ou structuraux.



## 5 Résultats et discussion

Cette section synthétise et discute brièvement l'ensemble des résultats obtenus pour : 1) l'identification des facteurs ayant un impact significatif sur le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout et leur intégration dans la modélisation statistique de ce processus (section 5.1); la modélisation de la performance hydraulique individuelle des conduites considérant un régime pluviométrique non stationnaire en raison des CC (section 5.2); et 3) la PIR des conduites des réseaux de drainage considérant des pratiques de gestion à la source des eaux pluviales (section 5.3).

### 5.1. Identification des facteurs ayant un impact significatif sur la modélisation de la détérioration structurale des conduites d'égout

#### 5.1.1 Signification statistique des facteurs d'impact

##### Utilisation du modèle de Cox avec covariables

Les résultats du test de Spearman, concernant la corrélation entre les facteurs évalués, ont démontré la présence d'une corrélation moyenne à légère entre les facteurs diamètre et type de conduite ainsi que les facteurs diamètre et matériau pour le réseau A. Pour le réseau B, le test a relevé des corrélations entre le facteur diamètre et les facteurs matériau et type de conduite ainsi qu'entre les facteurs matériau et type de conduite. Suite à ces observations, la pertinence de chaque covariable dans le modèle de Cox a d'abord été évaluée pour les réseaux A et B sans tenir compte des corrélations observées. Ensuite, les corrélations relevées entre les variables ont été prises en compte dans le processus de l'évaluation de l'impact de chacun de ces facteurs. Les résultats de ces deux étapes d'évaluation sont donnés dans les deux sections suivantes.

#### • Signification statistique des facteurs dans le modèle de Cox sans considération des corrélations entre les covariables

Le Tableau 5-1 donne, pour les réseaux A et B, la valeur des coefficients  $\theta_j$  pour chaque classe d'état structural. Il donne aussi les résultats du test du ratio de vraisemblance concernant la signification statistique de ces coefficients. Selon les résultats du tableau, aucun des coefficients associés aux facteurs évalués n'est significativement différent de zéro ( $p\_value = 1$ ), tant pour le réseau A que pour le réseau B. L'ajout de ces facteurs dans le modèle, sans considération de



l'impact des corrélations entre certains facteurs, ne permet donc pas d'améliorer la performance du modèle de prévision basé sur le modèle de Cox, par rapport à un modèle ne considérant que l'âge des conduites.

**Tableau 5-1. Résultats du test du ratio de vraisemblance pour les facteurs considérés pour les réseaux A et B**

| Réseau A         |            |            |            |            |         | Réseau B         |            |            |            |            |         |
|------------------|------------|------------|------------|------------|---------|------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| Facteur          | Indicateur | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | p_value | Facteur          | Indicateur | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | p_value |
| Diamètre         |            | 0,00       | 0,14       | 0,00       | 1       | Diamètre         |            | 0,00       | 0,00       | 0,02       | 1       |
| Longueur         |            | 0,07       | 0,00       | 0,03       | 1       | Longueur         |            | 0,00       | 0,07       | 0,01       | 1       |
| Type de conduite | $X_1$      | 0,47       | 0,00       | 0,00       | 1       | Type de conduite | $X_1$      | 0,17       | 0,13       | 0,04       | 1       |
|                  |            |            |            |            |         |                  | $X_2$      | 0,13       | 0,65       | 0,01       | 1       |
| Type de matériau | $X_1$      | 0,27       | 0,00       | 0,00       | 1       | Type de matériau | $X_1$      | 0,06       | 0,00       | 0,00       | 1       |
|                  | $X_2$      | 0,01       | 0,51       | 0,88       | 1       |                  |            |            |            |            |         |
| Pente            |            | 0,08       | 0,00       | 0,41       | 1       |                  |            |            |            |            |         |

**• Signification statistique des facteurs dans le modèle de Cox en tenant compte des corrélations entre les covariables**

Pour vérifier si les corrélations enregistrées entre certains facteurs pouvaient avoir un impact, pour les réseaux A et B, sur la signification statistique des facteurs dans le modèle de prévision, des modèles comprenant uniquement les covariables non corrélées ont été produits. Ainsi pour le réseau A, deux modèles ont été testés. Le premier modèle ne prend en compte que les facteurs diamètre, longueur et pente. Le deuxième intègre les facteurs matériau, type de conduite, longueur et pente. Pour le réseau B, trois modèles ont été créés sur la base des corrélations précédemment identifiées. Le premier inclut les facteurs diamètre et longueur, le second intègre les facteurs matériau et longueur, tandis que le troisième intègre les facteurs type de conduite et longueur. Pour tous ces modèles, le test du ratio de vraisemblance a conclu qu'aucun facteur, pour les deux réseaux, n'est significativement influent. Ce résultat a également été obtenu pour des modèles incluant un facteur d'impact à la fois pour les deux réseaux.

Utilisation du modèle de Cox sans covariable

La Figure 5-1 présente les probabilités qu'une conduite du réseau B soit à l'état 4-5 en fonction du temps pour les conduites de chaque cohorte.

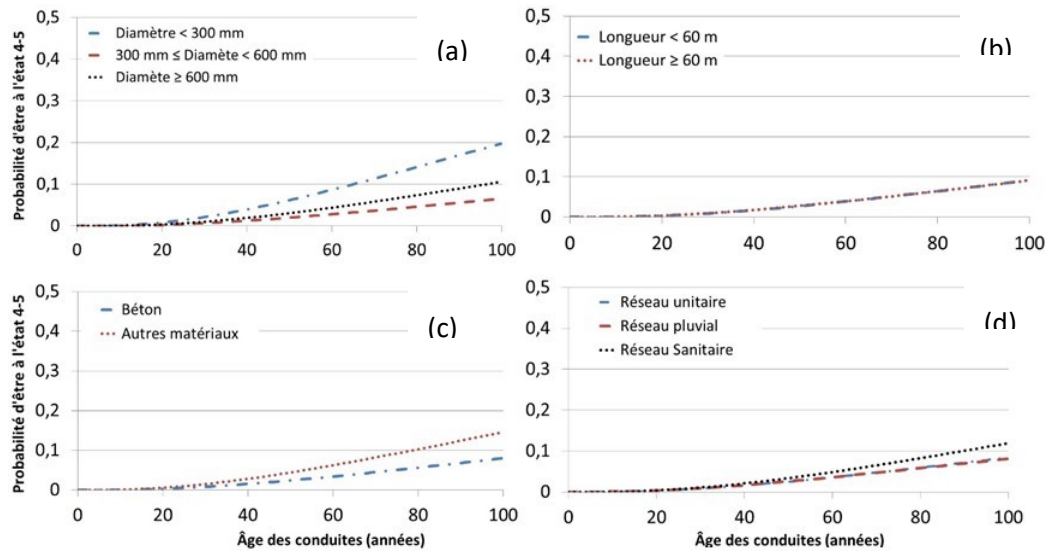


Figure 5-1. Probabilité que les conduites du réseau B soient à l'état 4-5 (mauvais état structural), classées par (a) diamètre, (b) longueur (les courbes de probabilité pour les deux cohortes se chevauchent), (c) matériau et (d) type de conduite (les courbes de probabilité pour les conduites de types sanitaire et unitaire se chevauchent)

Comme le montre la Figure 5-1, l'application du modèle de Cox sans covariable à différentes cohortes de conduites du réseau B montre que l'état structural des conditions évolue de manière similaire pour les différentes cohortes. Cette application montre que les vieilles conduites sont plus susceptibles d'être à l'état 4-5, quelles que soient leurs caractéristiques physiques ou fonctionnelle et quel que soit le réseau. Pour la majorité des facteurs définissant les cohortes, certaines différences, faibles pour la plupart, sont notées pour les probabilités que les conduites soient dans l'état 4-5 en fonction du temps. Cependant, les différences les plus importantes sont observées pour le matériau des conduites du réseau A (voir El-Housni et al., 2018a) et le diamètre des conduites du réseau B. Ces deux facteurs semblent donc avoir un potentiel impact sur la détérioration structurale des conduites selon cette méthode d'évaluation.

### Comparaison de la distribution des données par classe d'état structural

Le Tableau 5-2 résume les résultats du test de Kruskal-Wallis comparant la distribution des données des facteurs évalués en fonction de l'état structural des conduites. Seuls les facteurs de type quantitatif sont considérés par cette méthode d'évaluation, à savoir les facteurs âge, diamètre et longueur pour les conduites des réseaux A et B et le facteur pente pour les conduites du réseau A.

**Tableau 5-2. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les facteurs évalués pour les conduites de chaque réseau**

| Réseau | p_value pour les facteurs évalués |          |          |       |
|--------|-----------------------------------|----------|----------|-------|
|        | Âge                               | Diamètre | Longueur | Pente |
| A      | 1.241E-38                         | 0.215    | 0.094    | 0.013 |
| B      | 0.007                             | 0.965    | 0.931    |       |

En considérant un niveau de signification,  $\alpha$ , de 5 %, on constate que l'âge des conduites, selon cette comparaison, est un facteur d'influence important pour les réseaux A et B, ce qui s'accorde avec les résultats du modèle de Cox avec ou sans covariable. L'autre facteur identifié potentiellement influent est le facteur pente pour les conduites du réseau A.

#### **5.1.2 Synthèse des résultats des trois méthodes d'évaluation**

Les trois méthodes d'évaluation utilisées (Cox avec et sans covariables et comparaison des distributions des facteurs selon l'état structural) identifient l'âge des conduites comme facteur d'impact significatif. C'est pourquoi dans les sections suivantes de la thèse, seul ce facteur est pris en compte dans la modélisation de la détérioration de la performance structurale des conduites des deux réseaux. Les facteurs diamètre, matériau et pente ne sont pas considérés, malgré leur identification comme facteur explicatif selon deux des trois méthodes d'évaluation appliquées, en raison des réserves quant à la robustesse de ces deux méthodes. D'un côté, la méthode d'évaluation basée sur le modèle de Cox sans covariable reste visuelle, elle ne tient pas compte des corrélations entre facteurs, et ses résultats dépendent grandement de la quantité de données pour chaque cohorte utilisée pour le calage du modèle. En effet, la plupart des conduites ont un diamètre supérieur à 600 mm pour le réseau B et la majorité sont en béton

pour les deux réseaux. Ce qui ne permet pas de tirer des conclusions claires concernant ces facteurs. De l'autre côté, la méthode basée sur le test de Kruskal-Wallis ne considère pas les éventuelles corrélations entre les facteurs, en particulier celle entre le facteur âge et les autres facteurs.

## **5.2. Méthodologie d'évaluation et de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout dans un contexte de CC**

### **5.2.1 Performance hydraulique globale des réseaux A et B**

La Figure 5-2 donne les proportions de nœuds en charge et de nœuds à risque d'inondation d'après des simulations réalisées à l'aide du modèle SWMM pour les six événements (EOI) en HA et HF (d'ici 25 ans). Dans cette figure, on peut noter la très faible performance hydraulique du réseau B, en particulier par rapport à l'événement 3 (l'événement avec la hauteur totale de pluie la plus élevée). Pour cet événement, environ 30 % des nœuds du réseau B sont à risque d'inondation en conditions actuelles (horizon actuel : H1). Cette proportion passe à plus de 70 % dans les conditions climatiques futures dans 25 ans (sixième horizon futur : H6). L'augmentation des proportions de nœuds en charge et à risque d'inondation entre les climats actuel et futur dans le réseau B est très importante, quel que soit l'événement de pluie considéré. Pour ce qui est du réseau A, en HA, un maximum de 7 % de nœuds en charge est enregistré pour l'événement 2 (l'événement avec l'intensité de pluie la plus forte), dont 4 % sont à risque d'inondation. Les proportions de nœuds en charge et à risque d'inondation dans le réseau A varient légèrement selon les événements, mais toutes se voient augmenter dans les conditions futures. La plus grande augmentation est enregistrée pour l'événement 3. Cette variabilité dans les proportions de nœuds en charge et à risque d'inondation par événement, par horizon et par réseau peut s'expliquer par la variabilité des caractéristiques des événements et des caractéristiques des réseaux eux-mêmes.

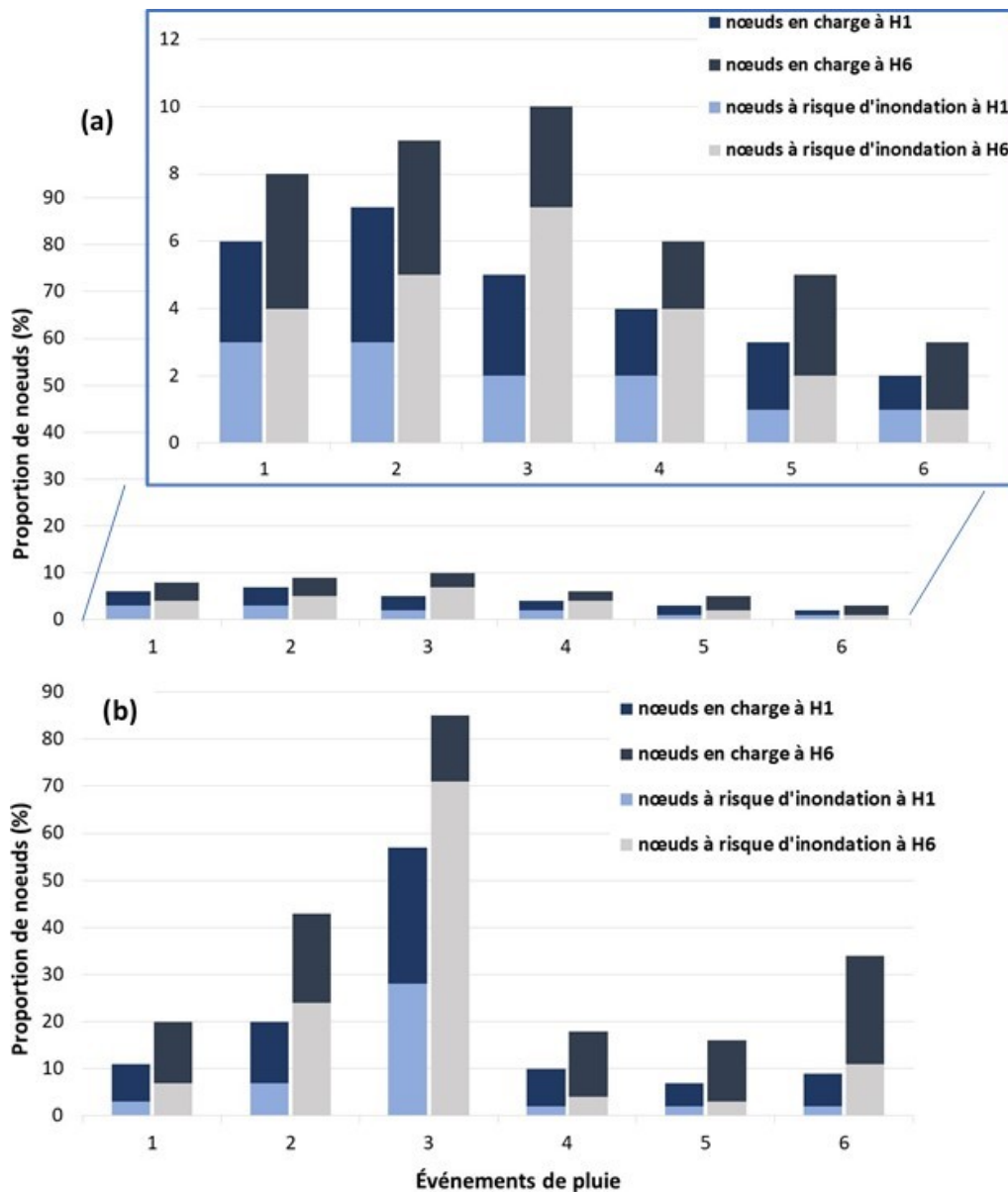


Figure 5-2. Proportion de nœuds en charges et de nœuds à risque d'inondation aux horizons actuel (H1; t = 0 an) et futur (H6; t = 25 ans) pour les réseaux A (en haut) et B (en bas).

En effet, les événements choisis ont des intensités maximales aux 5 min, des durées et des hauteurs totales de pluie différentes. Le réseau B semble plus sensible à l'événement qui a la plus grande hauteur totale, tant en HA qu'en HF (événement 3). Tandis que le réseau A présente plus de déficiences hydrauliques pour : 1) les événements avec des intensités maximales aux 5 min les plus élevées, soit l'événement 2 suivi de l'événement 1, en HA ; et 2) l'événement 3, qui a la plus grande hauteur totale, suivi des événements 2 et 1, en conditions futures. Le réseau A

se caractérise par des sous-bassins plus petits (0,7 ha en moyenne pour le réseau A contre 1,10 ha en moyenne pour le réseau B) et plus imperméables que ceux du réseau B (48 % en moyenne pour le réseau A contre 18 % en moyenne pour le réseau B), ce qui peut expliquer sa sensibilité aux événements intenses. La saturation du sol causée par une plus grande hauteur totale de pluie pourrait expliquer les réponses du réseau A en conditions futures et celles du réseau B en conditions actuelles et futures. Une évaluation des variables intermédiaires issues de la simulation HH des deux réseaux aurait pu permettre de vérifier et même de consolider cette hypothèse. Toutefois, cet exercice n'a pas été réalisé et pourrait l'être dans la suite des travaux concernant ce projet.

L'application de la méthodologie d'évaluation et de prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'égout proposée dans le cadre ce projet de doctorat (voir section 4.2.2) a permis d'identifier les conduites contraignantes responsables des dysfonctionnements hydrauliques (surcharges) relevés pour chaque événement et pour les conditions climatiques des six horizons. Les capacités hydrauliques nécessaires à la remise à niveau de ces conduites ont aussi été déterminées pour tous les événements et à tous les horizons. Les résultats de cette application sont décrits dans les sections 5.2.2 et 5.2.3 suivantes.

### **5.2.2 Identification des conduites contraignantes**

La Figure 5-3 présente un exemple d'identification des conduites contraignantes responsables des dysfonctionnements hydrauliques causés par l'événement 1 en HA. L'extension à droite de la figure montre un exemple de zones de surcharge (ZS; appelées aussi périmètres d'influence et représentées par un polygone en vert), les nœuds en charge (en violet), le nœud de référence ainsi que la conduite contraignante identifiée pour deux dysfonctionnements distincts. La zone à gauche de l'extension (Figure 5-3) contient un seul nœud en charge, qui est par conséquent le nœud de référence, et une seule conduite contraignante, qui est aussi l'unique conduite initialement supposée contraignante. Selon la méthodologie proposée, pour bien drainer un événement de caractéristiques semblables à celles de l'événement 1, la conduite contraignante de cette ZS, ayant un diamètre actuel de 300 mm, devrait être remplacée par une nouvelle conduite de diamètre égal à 375 mm pour H1 (conditions actuelles) et 450 mm à partir de H2 (dans 5 ans). En ce qui concerne la ZS située à droite de l'extension de la Figure 5-3, plusieurs nœuds en charge y sont inclus et celui avec le niveau d'eau le plus élevé est identifié comme

nœud de référence (voir Figure 5-3). Dans ce cas, selon la méthodologie proposée, une seule conduite est identifiée contraignante (de diamètre actuel égal à 375 mm). Pour un événement tel que l'événement 1, cette conduite devrait avoir un diamètre de 875 mm (plus de deux fois plus large) tant en HA qu'en HF. Pour certains ZS de la Figure 5-3, des conduites situées à l'extérieur de la ZS sont aussi identifiées contraignantes. Celles-ci, tel qu'expliqué à la section 4.2.2, doivent avoir la même capacité hydraulique que la(es) conduite(s) contraignante(s) la(es) plus à l'aval de la ZS en amont.

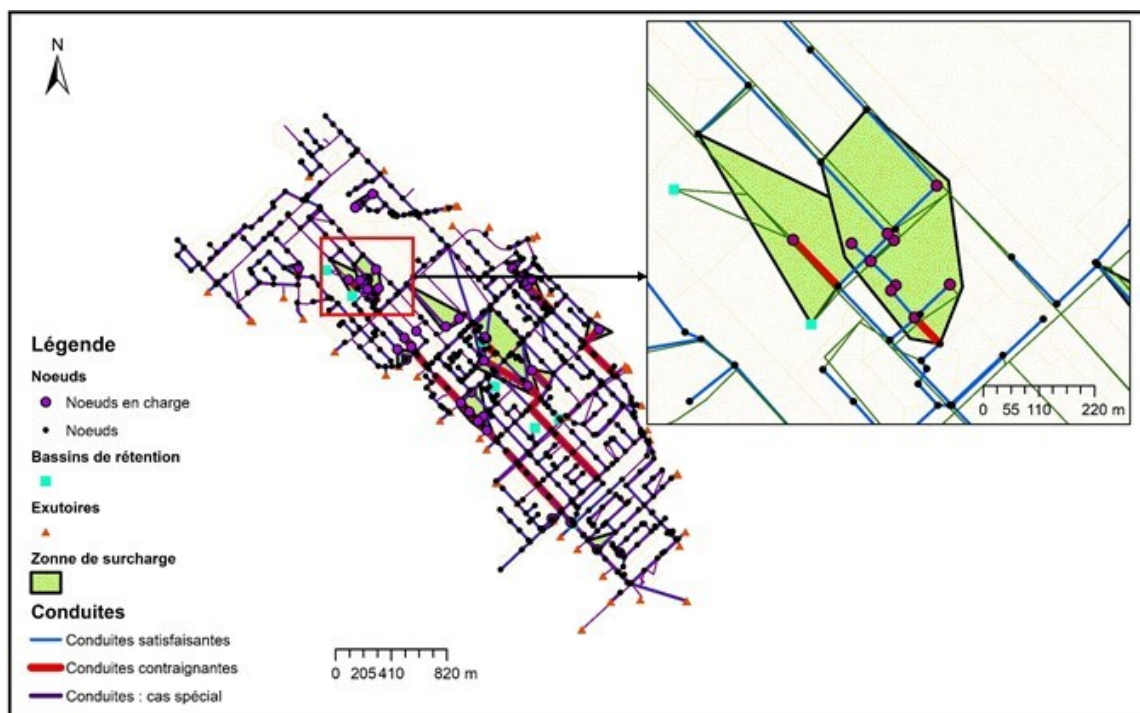


Figure 5-3. Exemple d'identification des conduites contraignantes pour le réseau A et l'événement EO1 à l'horizon H1

### 5.2.3 Impact des changements climatiques

Pour le réseau A, HA, un minimum de 2 % et un maximum de 8 % de la longueur totale des conduites sont identifiées contraignantes, pour les événements 6 et 2 respectivement. Tel qu'illustré à la Figure 5-4-a, ces proportions passent à 4 % pour l'événement 6 et à 11 % pour l'événement 2 d'ici 25 ans. Ceci correspond à des augmentations de 100 % pour l'événement 6

et de 37 % pour l'événement 2, causées par une augmentation de 15 % des intensités de pluie. Pour le réseau A, l'événement 2 reste celui qui cause le plus de problèmes hydrauliques en termes de conduites contraignantes dans les conditions actuelles et futures, suivi des événements 1 et 3. La Figure 5-4-b donne les résultats obtenus pour le réseau B. Pour ce réseau, les proportions en longueur totale de conduites contraignantes sont plus élevées comparativement au réseau A. Celles-ci varient, à l'horizon 1, d'un minimum de 10 %, enregistré pour l'événement 5, à un maximum de 25 %, causé par l'événement 3. À l'horizon H6, les proportions de conduites contraignantes en longueur totale augmentent de 30 à 77 % selon l'événement de pluie. L'événement 3 reste, cependant, l'événement le plus problématique pour les conduites du réseau B, suivi des événements 2 et 1. Ces événements, nécessitant le remplacement des plus grands nombres de conduites dans les deux réseaux, sont caractérisés par : 1) une intensité maximale aux 5 min très élevée, pour les deux premiers événements (1 et 2); 2) une plus grande partie de la hauteur totale tombant sur une courte période, soit de 1 h à 1 h 30 (voir Figure 4-6); et 3) la plus grande hauteur totale pour l'événement 3.



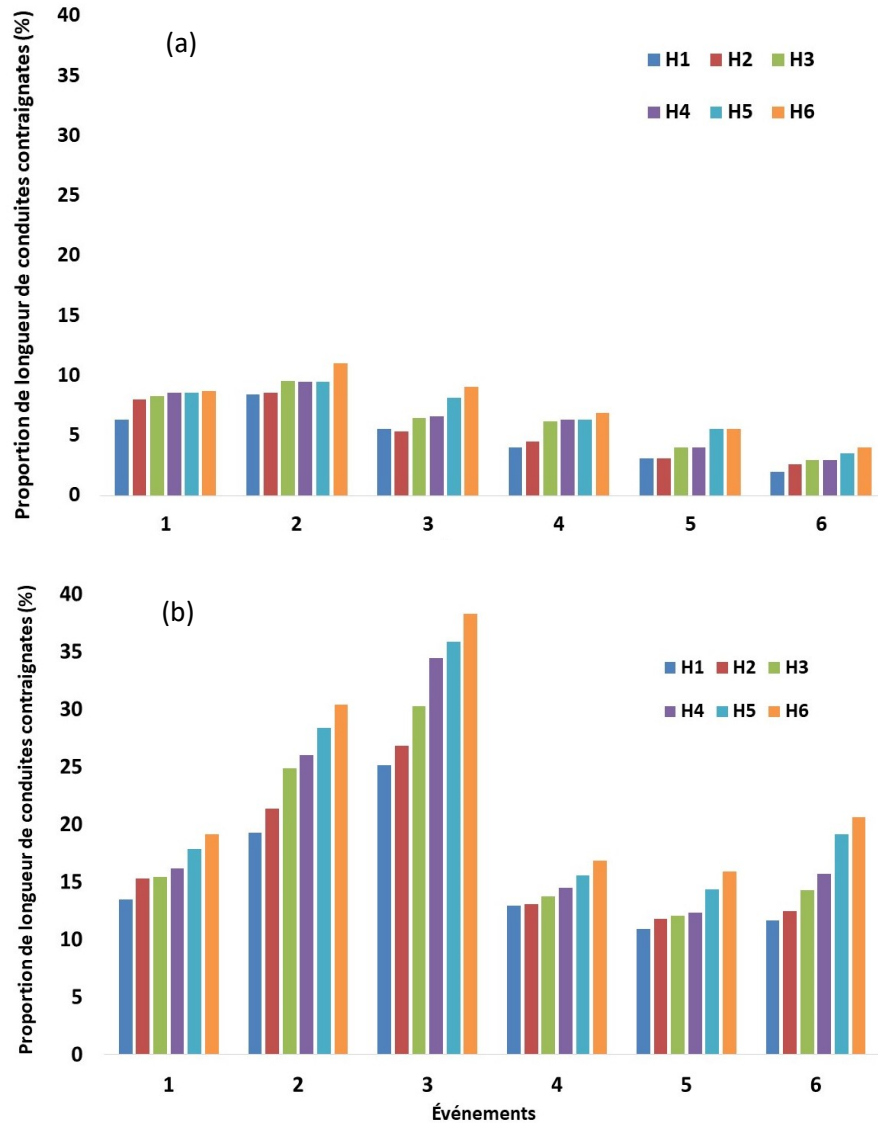


Figure 5-4. Proportion de longueur totale de conduites contraignantes pour les six événements et les six horizons (de H1 à H6) pour le réseau A (a) et le réseau B (b)

D'après les résultats présentés précédemment, seuls les événements 2 et 3 ont été considérés, dans un premier temps, pour identifier les conduites contraignantes à mettre à niveau pour les réseaux A et B respectivement, en raison de l'ampleur de la carence hydraulique que ces événements provoquent dans ces réseaux. Dans un deuxième temps, les conduites contraignantes et leur capacité hydraulique requise ont été identifiées pour les autres événements.

L'application de la méthodologie d'évaluation de la performance hydraulique des conduites d'égout des réseaux A et B a mis en évidence l'impact que peuvent avoir les changements sur la performance globale des réseaux d'égout. Elle a, par conséquent, démontré l'importance de la prise en compte de ces changements dans la conception des nouveaux développements et dans la planification de la gestion actuelle et future des réseaux existants.

### **5.3. Méthodologie de planification du renouvellement des réseaux de drainage urbain intégrant à la fois les facteurs structuraux et hydrauliques dans un contexte de CC et l'adoption de nouvelles pratiques de gestion**

#### **5.3.1 Performance hydraulique et structurale des conduites d'égout**

L'application des méthodologies de modélisation de la performance structurale et hydraulique, décrites dans les sections 4.1.2 et 4.2.2 respectivement, a permis d'identifier et de localiser l'ensemble des dysfonctionnements actuels et de prévoir ceux qui pourront survenir d'ici 25 ans dans le réseau à l'étude. La Figure 5-5 illustre ces deux types de dysfonctionnements et leurs emplacements aux deux horizons.

Pour ce qui est de la performance hydraulique aux conditions actuelles, l'événement de pluie considéré (de 28 mm de hauteur totale en moins de 2 h; Figure 4-6), cause une surcharge dans environ 7 % des nœuds du réseau. Ce même événement engendrerait une surcharge dans environ 10 % des nœuds du réseau avec une intensité 15 % plus forte sur la totalité de sa durée (conditions futures). Dans les conditions actuelles comme futures, la moitié des nœuds en charge sont à risque d'inondation. Dans un premier temps, la méthodologie de modélisation de la performance hydraulique associe chacun des nœuds et des conduites en charge à une ZS qui regroupe les nœuds et les conduites adjacentes en charge. Ceci a permis d'identifier 20 et 27 ZS aux horizons actuel et futur, respectivement. La modélisation de la performance hydraulique a identifié : 1) en utilisant le remplacement des conduites comme unique option de renouvellement, 4 513 m de longueur totale de conduites contraignantes à remplacer aux conditions actuelles et 5 639 m aux conditions futures; et 2) en adoptant l'option de bioretention en parallèle avec le remplacement des conduites, 10 602 m<sup>2</sup> et 10 687 m<sup>2</sup> de superficie de bioretention en HA et HF, respectivement, combinée à 2 630 m et 3 634 m de longueur totale de conduites nécessitant d'être remplacées aux horizons actuel et futur.

La modélisation de la performance structurale prévoit, quant à elle, qu'environ 8 159 m de conduites seront dans la classe d'état structural 4 d'ici 25 ans. En conditions actuelles, selon les résultats d'inspections télévisuelles, 4 538 m de longueur totale des conduites du réseau sont dans l'état structural 4 et nécessitent donc une intervention (réparation ou remplacement) immédiate.

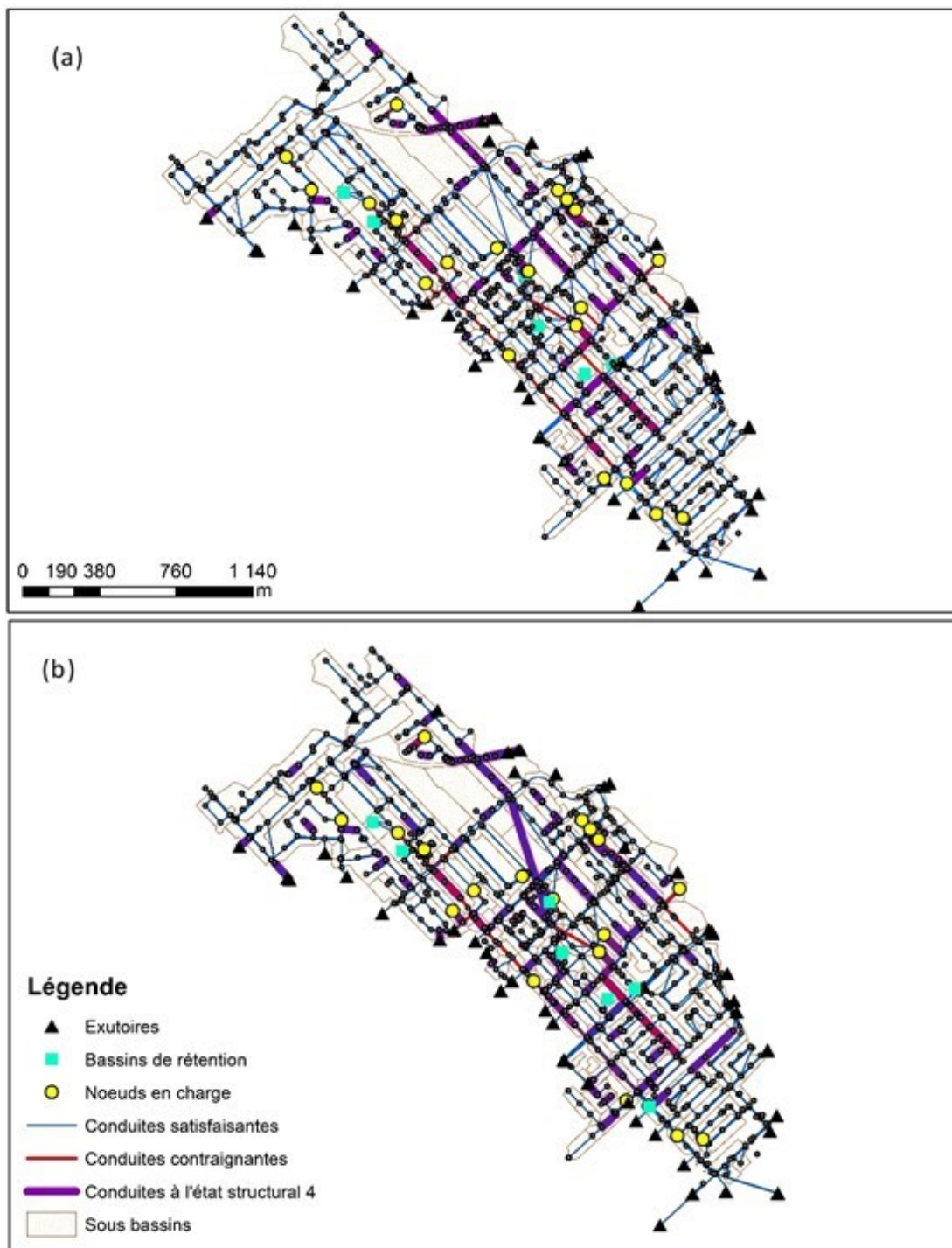


Figure 5-5. Performances structurale et hydraulique des conduites d'égout en conditions (a) futures et (b) actuelles

### **5.3.2 Avantages de l'approche proactive par rapport à l'approche réactive traditionnelle**

Le Tableau 5-3 récapitule les options de renouvellement et les CMTs qui leur sont associés en adoptant l'approche réactive traditionnelle (basée sur les interventions d'urgence sans considération des deux types de dysfonctionnement ni des CC), et l'approche proactive, telle que proposée dans la méthodologie de PIR.

La comparaison des coûts associés à chacune de ces méthodes a mis en évidence l'importance de considérer simultanément les performances structurale et hydraulique dans un climat en évolution dans la planification de la mise à niveau des conduites d'égout. L'approche proactive permet, dans le cas du réseau à l'étude, d'économiser pratiquement le tiers du budget (14 millions \$CAD) nécessaire pour maintenir un niveau de performance acceptable du réseau sur une période de 25 ans selon la méthode traditionnelle.

D'un point de vue économique et contre toute attente, la méthode proactive basée sur une comparaison des coûts des options de renouvellement pour chaque ZS a démontré que l'ajout de cellules de bioretention n'est pas toujours la meilleure option. Cela est dû au fait que l'élimination de certaines ZS, qui s'étendent sur une large zone, nécessitent une grande superficie de biorétention pour être éliminées. Toutefois, ce constat est spécifique au réseau étudié, aux coûts unitaires considérés et à la méthode appliquée pour identifier la superficie et l'emplacement de la biorétention. Cependant, d'autres résultats non présentés ici ont démontré que, même lorsque la superficie et l'emplacement de la bioretention sont identifiés de manière globale (c'est-à-dire sans la suppression des cellules de biorétention identifiées précédemment lors de l'évaluation de chaque ZS), l'option de biorétention n'est pas toujours la moins coûteuse. Ce résultat pourrait être différent, ou non, si les options de biorétention étaient identifiées à l'aide d'un algorithme d'optimisation, ce qui n'est pas le cas dans la méthodologie proposée ici. De plus, une autre raison peut expliquer le choix de l'option de remplacement de conduite à la place de l'option de bioretention pour certaines ZS : il s'agit de la prise en compte des deux types de performances (structurale et hydraulique) sur 25 ans. En effet, le remplacement de la conduite est l'unique option possible lorsque la conduite contraignante d'un point de vue hydraulique est dans un état structural nécessitant un remplacement immédiat.





**Tableau 5-3. Options de renouvellement permettant une performance acceptable sur 25 ans et leurs coûts moyens totaux selon l'approche réactive traditionnelle et l'approche proactive**

|                                                      | Conditions climatiques actuelles                                                |                                 |                                                                                | Conditions climatiques futures                                                  |                                                                                |                                                                                | Coût total            |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                      | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement hydraulique (m) | Superficie de biorétention (m²) | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement structural (m) | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement hydraulique (m) | Superficie de Biorétention (m²)                                                | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement structural (m) | moyen (million \$CAD) |
| Approche réactive avec PCS                           | 2 630                                                                           | 10 601                          | 3 875                                                                          | 1 003                                                                           | 1 778                                                                          | 3 254                                                                          | 42,2                  |
| Approche réactive sans PCS                           | 4 513                                                                           | 0                               | 3 648                                                                          | 1 230                                                                           | 0                                                                              | 3 017                                                                          | 41,9                  |
| Planification de renouvellement intégrée (proactive) | Conditions climatiques actuelles et futures                                     |                                 |                                                                                |                                                                                 |                                                                                |                                                                                | Coût total            |
|                                                      | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement hydraulique (m) |                                 | Superficie de biorétention (m²)                                                |                                                                                 | Longueur totale de conduites à remplacer pour dysfonctionnement structural (m) |                                                                                | moyen (million CAD)   |
|                                                      | 4 499                                                                           |                                 | 2 314                                                                          |                                                                                 | 3 636                                                                          |                                                                                | 28,6                  |



L'autre avantage que représente l'approche proactive est la possibilité de l'utiliser pour planifier la remise à niveau des performances hydraulique et structurale actuelles des conduites compte tenu des CC. Cela permet aux gestionnaires de : 1) prendre en compte les nouvelles avancées concernant les méthodes de modélisation et de prévisions des variables climatiques et les éventuelles évolutions en fonction des actions des autorités pour lutter contre le réchauffement climatique; et 2) planifier les options de renouvellement sur une période prolongée lorsque le réseau évalué couvre une grande superficie. La Figure 5-6 donne les types d'option de renouvellement et leurs emplacements pour éliminer les dysfonctionnements structuraux et hydrauliques actuels. Ces options sont choisies en fonction des connaissances actuelles concernant les CC afin de garantir les performances actuelles et futures des conduites.

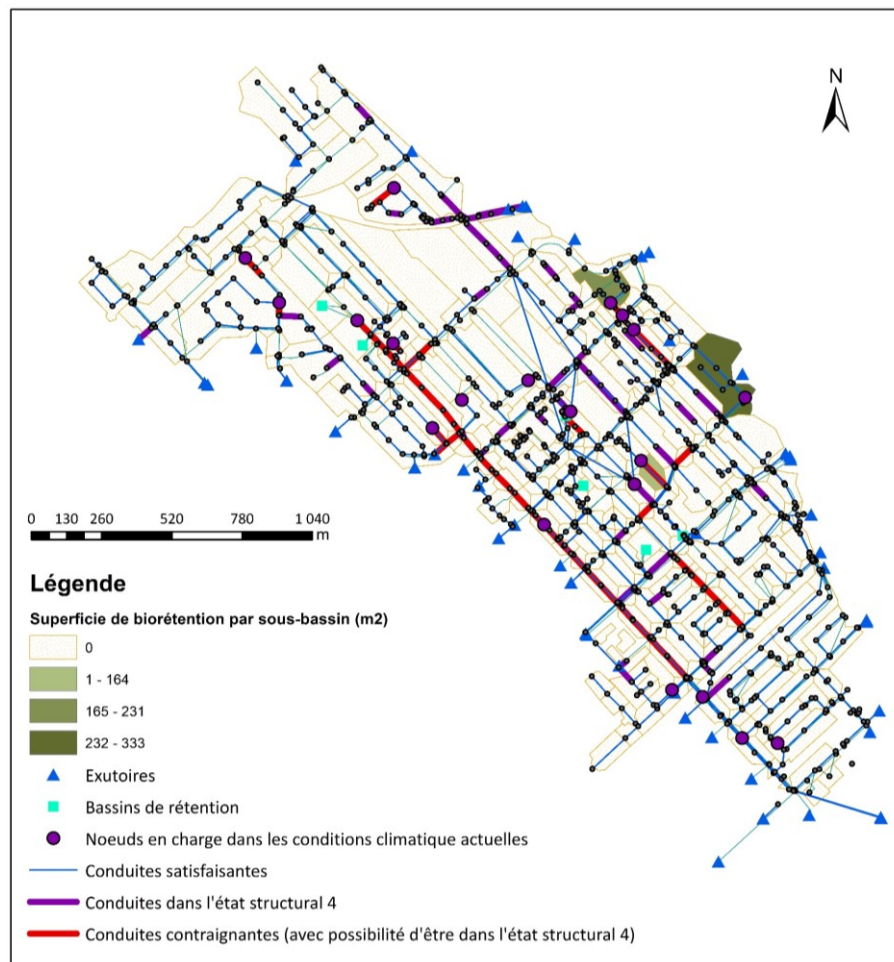


Figure 5-6. Emplacement et types d'options de renouvellement pour les conditions actuelles, tels qu'identifiés par la méthodologie de planification intégrée de renouvellement

## 6 CONCLUSION

La gestion des réseaux de drainage urbains devient de plus en plus préoccupante pour les municipalités et les autorités responsables, en raison du vieillissement des composantes de ces réseaux, en particulier des conduites souterraines, de l'impact des CC et des coûts liés à leur entretien. Pour répondre à cette problématique, une planification intégrée basée sur une approche préventive est proposée dans le cadre de cette thèse, considérant conjointement les détériorations structurale et hydraulique dans un contexte de CC et adoptant des mesures de contrôle à la source. L'objectif principal de la thèse étant de vérifier dans quelle mesure ce type de planification intégrée permet d'améliorer le choix des interventions de renouvellement, de réduire les coûts associés à ces interventions et d'améliorer la performance globale des réseaux. La planification intégrée proposée consiste à : i) identifier les options de renouvellement des réseaux d'égout possibles, ii) choisir la moins coûteuse de ces options et iii) planifier le moment idéal pour leur implantation. Le choix et la planification des options de renouvellement sont basés sur la modélisation des performances structurale et hydraulique individuelles des conduites dans les conditions climatiques actuelles et futures. Dans cette planification, des mesures d'adaptation aux CC, telles que le remplacement de conduites et l'installation de PCS, sont considérées.

La méthode de modélisation de la performance structurale proposée dans le cadre de ce projet de thèse se base sur le modèle de Cox en considérant l'ensemble des facteurs identifiés ayant un impact significatif sur le processus de la détérioration structurale des conduites. Cette méthode a été appliquée aux conduites de deux réseaux d'égout canadiens A et B. Seul l'âge des conduites des deux réseaux a été identifié comme facteurs d'impact significatif, selon le test du ratio de vraisemblance. Contrairement à d'autres études similaires, le diamètre, la longueur, le type de matériau, la pente et le type de conduite n'ont pas été identifiés comme ayant un impact significatif sur la modélisation du processus de la détérioration de la performance structurale des conduites; leur intégration dans le modèle de Cox ne permet pas d'améliorer la prédiction de l'état structural de ces conduites. Ce résultat est, toutefois, lié aux réseaux évalués et peut être dû : i) à la corrélation relevée entre certains de ces facteurs (p.ex. diamètre, type de matériau, type de réseau) et/ou avec l'âge des conduites (p.ex. diamètre, type de réseau); et ii) au manque de variabilité pour certains facteurs (p.ex. type de matériau et diamètre). Les résultats auraient pu être différents si la méthode de

modélisation avait été appliquée à des réseaux d'égout différents, comportant, par exemple, plus de données pour chaque classe de matériau.

La méthode de modélisation de la performance hydraulique proposée dans cette thèse est basée sur la modélisation hydraulique et hydrologique à l'aide du modèle SWMM. Elle consiste à localiser les dysfonctionnements hydrauliques, à les isoler et à identifier : 1) les conduites contraignantes responsables de ces dysfonctionnements et la capacité hydraulique nécessaire pour leur remise à niveau; et/ou 2) l'emplacement idéal et la superficie nécessaire de PCS permettant d'éliminer les surcharges correspondant à ces dysfonctionnements hydrauliques. Pour ce faire, cette méthode utilise des événements intenses isolés observés d'une récurrence donnée (d'une large gamme de durées, de distributions temporelles et d'intensités) représentant les conditions climatiques actuelles et futures, après modification basée sur les résultats des prévisions climatiques pour la région d'étude. Appliquée à deux secteurs des réseaux canadiens utilisés pour la modélisation de la performance structurale, la méthode de modélisation de la performance hydraulique a mis en évidence l'impact que peuvent avoir les CC sur la performance hydraulique des conduites. Lorsque seul le remplacement de conduite (sans l'installation de PCS) est considéré comme moyen d'intervention, la proportion de la longueur totale de conduites contraignantes, à remplacer, augmente de 25 % pour le réseau A et de 61 % pour le réseau B entre les horizons actuel et futur (dans 25 ans). Les événements de pluie utilisés dans cette méthode causent plus de surcharges dans le réseau B que dans le réseau A et cela même dans les conditions climatiques actuelles. Les proportions de nœuds en surcharge, pour les deux réseaux, varient d'un événement à l'autre pour les deux horizons. Toutefois, aucune corrélation entre ces proportions de nœuds en surcharge et i) la durée, ii) la hauteur totale ou iii) l'intensité maximale sur 5 min de l'événement pluvieux, n'a été identifiée. L'autre caractéristique des événements de pluie susceptible d'expliquer ces variations est la variabilité de la distribution temporelle de ces derniers. Cependant, aucune évaluation n'a été entreprise pour évaluer l'impact de cette caractéristique sur la proportion de nœuds en surcharge dans les deux réseaux.

Basé sur les résultats de la modélisation des deux performances structurale et hydraulique, dans les conditions actuelles et futures dans un climat en évolution, la PIR a été appliquée aux conduites du réseau A uniquement. L'application de la planification intégrée, basée sur le coût unitaire des options, a démontré que l'ajout de PCS n'est pas toujours plus économique comparée au remplacement des conduites. Cela dépend de la méthode utilisée pour identifier les superficies et les

emplacements idéaux des PCS, méthode qui n'est pas optimale dans l'application présentée. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour identifier les superficies et localisations optimaux des PCS améliorerait vraisemblablement les résultats obtenus et pourrait favoriser l'option des PCS dans un plus grand nombre de situations. La comparaison des résultats de la planification intégrée avec ceux d'une planification de renouvellement basée sur une approche réactive, dans laquelle les performances structurale et hydraulique sont considérées de manière instantanée et indépendante, a mis en évidence l'importance de la prise en compte des performances hydraulique et structurale simultanément dans un contexte de CC lors de la planification du renouvellement des conduites d'égout. Pour le cas d'étude présenté, l'application de la méthode de planification intégrée conduit à une économie d'environ 14 millions de dollars, ce qui correspond à environ 33 % du coût des interventions pour la méthode réactive plus traditionnelle. Par ailleurs, l'autre avantage que présente la méthode proactive proposée est la possibilité de programmer les interventions de renouvellement requises en tenant compte des connaissances actuelles en matière de CC et des performances du réseau d'égout, puis de réviser cette programmation à intervalles réguliers. Cela permet aux gestionnaires de tirer profit des progrès concernant les prévisions climatiques et de considérer les résultats des mesures prises par les gouvernements pour lutter contre les CC. Cela permet également de mieux planifier le renouvellement de grands réseaux, qui peut nécessiter une période d'intervention plus longue.

Toutes les méthodes proposées dans le cadre de ce projet de recherche sont automatisées et peuvent être facilement appliquées à d'autres types de réseaux, ce qui en fait un outil utile pour la planification du renouvellement des réseaux de drainage accessible aux autorités responsables de la gestion de ces actifs. Ces méthodes pourraient cependant être améliorées en : 1) incluant d'autres facteurs d'impact (p.ex. niveau de trafic, profondeur d'enfouissement et type de remblai) pouvant améliorer la modélisation de la détérioration de la performance structurale, après évaluation préalable; 2) utilisant un outil d'optimisation pour améliorer l'identification des options de renouvellement, PCS et/ou remplacement de conduites; 3) calculant les coûts liés aux différentes options compte tenu de la durée de vie de chaque option et en incluant les coûts liés à l'entretien; 4) intégrer le taux d'actualisation dans le calcul du coût associé aux options de renouvellement à mettre en place dans le futur ; et 5) utilisant un éventail d'événements de pluie plus large et en évaluant de plus près le lien entre la distribution temporelle des événements et la capacité hydraulique des conduites.



## **PARTIE II : ARTICLES**



## **7 Article I: Identification of most significant factors for modeling deterioration of sewer pipes**

—

Identification des facteurs ayant un impact significatif sur la modélisation de la détérioration de la performance structurale des conduites d'égout

---

### **Auteurs**

Hind El-Housni<sup>1</sup>, Maxim Ouellet<sup>1</sup>, and Sophie Duchesne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : INRS-ETE, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9, Canada

### **Revue**

L'article a été publié dans la *Revue Canadienne de Génie Civil*, 2018, 45(3): 215-226, <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0293>.

### **Contribution des auteurs**

L'élaboration de la méthodologie de modélisation de la détérioration de l'état structural des conduites d'égout et le choix des tests statistiques ont été réalisés par la candidate au doctorat Hind El-Housni sous la supervision et l'orientation de la Pre Sophie Duchesne. La vérification du modèle statistique a été réalisée par les Pre Sophie Duchesne et Alain Mailhot. La traduction du modèle et des tests statistiques en langage de programmation informatique, Matlab, a été réalisée par la candidate avec l'aide du stagiaire Maxim Ouellet. L'interprétation et la vérification des résultats et la rédaction de l'article scientifique ont été réalisées par la candidate. L'article a été relu par le stagiaire Maxim Ouellet et révisé par la Pre Sophie Duchesne. La candidate Hind El-Housni, sous la supervision de la Pre Sophie Duchesne, a effectué les corrections demandées par les réviseurs désignés par le journal.





## Résumé

Les méthodes existantes permettant d'identifier les facteurs d'influence qui doivent être pris en compte dans la modélisation de la détérioration structurale des conduites d'égout prennent rarement en compte les interactions et/ou les corrélations entre ces facteurs. Une méthode standardisée, basée sur l'utilisation combinée du modèle de Cox et du test du rapport de vraisemblance, est proposée dans cet article. Cette méthode est appliquée aux conduites de deux réseaux d'égout canadiens et ses résultats sont comparés aux résultats de deux méthodes plus simples pour l'identification des principaux facteurs influents. Les trois méthodes identifient l'âge des conduites comme étant le principal facteur d'influence dans le processus de détérioration des conduites. Cependant, de légères différences entre les résultats de ces méthodes concernant certains facteurs potentiellement influents (matériau, pente et diamètre) démontrent que la prise en compte des interactions et des corrélations entre les facteurs, rendue possible avec la méthode proposée, est cruciale pour identifier les facteurs ayant un impact significatif.

**Mots-clés :** analyse de survie; covariables; état structural; Kruskal-Wallis; modèle de Cox; rapport de vraisemblance.

## Abstract

Existing methods used to identify the important factors that can improve predicting structural deterioration of sewer pipes rarely take into account the interactions and correlations among them. Here we present a standardized method that combines use of the Cox model and likelihood ratio test, and overcomes these limitations of previously employed methods. This combined method is applied to the pipes of two Canadian sewer systems, and the results are compared to those of two simpler methods for the identification of the factors that significantly influence sewer pipe deterioration. The three methods identified pipe age as the principal factor driving the structural deterioration of sewer pipes. However, slight differences between the methods for other potential influential factors (material, slope and diameter) showed that accounting for the interactions and correlations among factors, as is possible with the proposed method, is crucial to identifying the factors having a significant impact on pipe deterioration.

**Keywords:** covariates; Cox model; Kruskal-Wallis; likelihood ratio; structural state; survival analysis



## 7.1 .Introduction

Many mathematical models exist to predict the structural condition of sewer pipes over time, depending on several variables. These models can be classified into three groups (Ana and Bauwens, 2010): 1) physical models that are based on the physical mechanisms governing the deterioration of pipes (e.g. Konig, 2005); 2) artificial intelligence models (e.g. Tran et al., 2006; Kleiner et al., 2006); and 3) statistical models (e.g. Duchesne et al., 2013). The input data for each of the three model types are pipe condition ratings, which summarize the defects (nature, number, and severity) observed in sewer pipes during televisual inspection. Statistical models, however, remain the most commonly used method to predict the structural condition of sewer pipes (Duchesne et al., 2013).

The principal classes of statistical models that have been applied to the structural deterioration of sewer pipes are: 1) survival models, 2) Markovian models, 3) regression models, and 4) classification models. In survival models, the process of pipe deterioration is represented by the successive transition from one condition state to another (Ana and Bauwens, 2010; Baur et al., 2004). The period of time during which the pipes remain in a given structural state is considered a random variable, described by different distribution functions (e.g. Weibull, exponential, or Hertz), thus defining the process of sewer pipe deterioration over time (Horold and Baur, 1999; Mailhot et al., 2000). Survival models give the proportion of sewer pipes in a given structural state according to age (Baur and Herz, 2002; Duchesne et al., 2013; Ugarelli et al., 2013). Markovian models describe the discrete-time stochastic process whereby the transition probability to the following state class depends only on the current state (Baik et al., 2006; Ross, 2000; Wirahadikusumah et al., 2001). This type of model gives the probability that a pipe moves from one condition state to another over a given time interval (Baik et al., 2006; Duchesne et al., 2013; Micevski et al., 2002; Ugarelli et al., 2013). This transition probability is constant over time, although in semi-Markovian models (also known as non-homogenous Markov models), the transition probability varies with time (Ana and Bauwens, 2010). In regression models, the probability that a pipe is in a given state after a given period of time is evaluated according to multiple independent variables (Ana et al., 2009; Ana et al., 2008; Ariaratnam et al., 2001; Baik et al., 2006; Chughtai and Zayed, 2008; Salman and Salem, 2012; Younis and Knight, 2010). Regression models can also be used to determine the transition probabilities of Markov models (Baik et al., 2006; Le Gat, 2008). Finally, different classification

models exist; an example of such a model based on a Random Forest Approach is given in Harvey and McBean (2014).

Variables included in statistical models designed to predict the structural integrity of sewer pipes may be specific to the pipes themselves, such as the age, time of installation, size, length, shape, material, network type, slope, burial depth, and hydraulic performance. Variables may also relate to the environment where the pipes are found, including the soil type, location, level of traffic in close proximity, type of pipe bedding, temperature, and freezes. Several studies have been conducted over the past fifteen years to determine which factors (i.e. independent variables) should be incorporated into models predicting the structural deterioration of sewer pipes. Table 7-1 provides a summary of these studies and their results.

**Table 7-1. Summary of studies that assessed the impacts of different variables on the sewer structural deterioration process**

| <b>Authors</b>            | <b>Model type used</b>                    | <b>City of application</b>             | <b>Evaluated factors</b>                                                                                                                                                                     | <b>Influential factors</b>                                                                                                                       | <b>Statistical tests used</b>                                        |
|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Ariaratnam et al. (2001)  | Logistic regression                       | Edmonton * (Canada)                    | Age; Diameter; Depth; Sewer type; Material; Interactions between factors (Age; Diameter; Sewer type)                                                                                         | Age; Diameter; Sewer type                                                                                                                        | Wald Likelihood ratio                                                |
| Micevski et al. (2002)    | Markov model                              | Newcastle ** (Australia)               | Diameter; Material; Soil type; Exposure classification (distance from the coastline); Hydraulic performance                                                                                  | Diameter; Material; Soil type; Exposure classification                                                                                           | Chi squared                                                          |
| Baur and Herz (2002)      | Cohort survival model                     | Dresden* (Germany)                     | Period of construction; Material; Location relative to other infrastructure (road network); Diameter; Slope; Sewer type; Shape; Sewer function (minor or major network)                      | Material; Period of construction; Location relative to other infrastructure                                                                      |                                                                      |
| Baik et al. (2006)        | Markov and ordered probit model           | San Diego † (United States)            | Age; Length; Diameter; Material; Slope                                                                                                                                                       | Age; Length; Diameter; Slope                                                                                                                     | Measure of overall statistical fit: $p^2$ (for ordered probit model) |
| Tran et al. (2006)        | Multiple discriminant analysis regression | Greater Dandenong** (Australia)        | Age; Diameter; Depth; Slope; Location (reserve, under road, under nature strip, under easement); Trees root presence; Hydraulic performance; Soil type; Soil moisture index at dry condition | According to the chi squared test and stepwise method: Hydraulic performance<br>According to ANOVA 1: Slope; Depth                               | ANOVA 1<br>Stepwise method<br>Univariate Analysis with Chi squared   |
| Chughtai and Zayed (2008) | Multiple regression                       | Niagara Falls and Pierrefonds (Canada) | Age; Diameter; Length; Material; Depth; Slope; Bedding factor; Location relative to other infrastructure (road network category); Interactions between some factors                          | Concrete pipes: Age associated to material; Location relative to other infrastructure; Depth; Depth associated to Bedding factor; Bedding factor | t-test                                                               |

| Authors                  | Model type used                 | City of application           | Evaluated factors                                                                                                                                                                                                                                            | Influential factors                                                                                                                                                             | Statistical tests used                                                   |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                          |                                 |                               |                                                                                                                                                                                                                                                              | Asbestos cement pipes:<br>Age; Depth associated to Length<br>PVC pipes: Age; Length;<br>Location relative to other infrastructure; Bedding factor; Diameter associated to Depth |                                                                          |
| Ana et al. (2008)        | Cohort survival model           | Leuven* (Belgium)             | Period of construction; Diameter; Length; Shape; Material; Slope; Depth; Location relative to other infrastructure (road network)                                                                                                                            | Period of construction; Length; Material                                                                                                                                        |                                                                          |
| Ana et al. (2009)        | Multiple logistic regression    | Leuven* (Belgium)             | Age; Period of construction; Diameter; Length; Shape; Material; Sewer type; Slope; Depth; Location relative to other infrastructure (road network)                                                                                                           | Age; Material; Length                                                                                                                                                           | Wald Likelihood ratio                                                    |
| Younis and Knight (2010) | Ordinal regression              | Niagara Falls † (Canada)      | Age; Material; Interaction between Age and Material                                                                                                                                                                                                          | Material; Interaction between Age and Material (Age is influent only for concrete pipes)                                                                                        | Wald                                                                     |
| Salman and Salem (2012)  | Multinomial logistic regression | Cincinnati †† (United States) | Age; Diameter; Length; Material; Sewer type; Slope; Location relative to other infrastructure (road network); Depth; Interactions between factors: 27 two-way interactions (except interaction between Sewer type and Material) and 5 three-way interactions | Age; Diameter; Length; Material; Sewer type; Slope; Location relative to other infrastructure; Depth; 13 two-way interactions and 2 three-way interactions                      | Wald (for factors)<br>Stepwise method (for interactions between factors) |

| Authors                        | Model type used                                                                        | City of application       | Evaluated factors                                                                                                                                                                                                               | Influential factors                                                                                                                                         | Statistical tests used                                                                        |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                | Binary logistic regression                                                             |                           | Age; Diameter; Length; Material; Sewer type; Slope; Location relative to other infrastructure (Road network); Depth; Interactions between factors: 20 two-way interactions (except interaction between Sewer type and Material) | Age; Diameter; Length; Slope; Material; Sewer type; Location relative to other infrastructure; Depth; 7 two-way interactions                                | Wald (for factors)<br>Stepwise method and Likelihood ratio (for interactions between factors) |
| Ugarelli et al. (2013)         | GompitZ deterioration modeling tool using the combination of Markov and survival model | Oslo †† (Norway)          | Diameter; Sewer type; Period of construction; Road traffic; Soil type; Tramway proximity; Trees presence; Interactions between factors                                                                                          | For concrete pipes up to 600 mm: Diameter; Sewer type; Period of construction; Soil type; Trees presence; Interaction between Sewer type and trees presence | Likelihood ratio                                                                              |
| Rokstad and Ugarelli (2015)    | GompitZ deterioration modeling tool (non-homogeneous Markov Chain model)               | Oslo * (Norway)           | Diameter; Sewer type; Period of construction; Road traffic; Bedding factor; Trees presence                                                                                                                                      | For all pipes material : Diameter; Sewer type; Period of construction; Road traffic; Bedding factor; Trees presence                                         | Chi squared                                                                                   |
| Fuchs-Hanusch et al. (2015)    | Logistic regression models                                                             | Unnamed * (Austria)       | Material; Vintage (period of construction); Sewage type; Profile type; Width; Height; Length; Depth                                                                                                                             | Material; Length; Width; Vintage; Profile type                                                                                                              | Likelihood ratio                                                                              |
| Tscheikner-Gratl et al. (2014) | Binary logistic regression                                                             | Alpine city ††† (Austria) | Age; Diameter; Material<br>Slope; Length; Shape                                                                                                                                                                                 | Age; Diameter; Slope; Length; Shape                                                                                                                         | Wald                                                                                          |

\* : Total network: sanitary, stormwater and combined sewers

\*\* : Stormwater sewer

† : Sanitary sewer

†† : Sanitary and combined sewers

††† : Combined sewer



The factor that was most frequently identified as having an impact on the structural deterioration of sewer pipes was age, followed by pipe diameter, pipe length, pipe material, network type and pipe slope (Table 7-1). There was no consensus, however, concerning the method that should be applied to identify the factors that significantly affect sewer pipe deterioration. Also, the factors identified as influential varied greatly among studies because: 1) differences in how factors influence the structural deterioration of sewer pipes mainly depended on the networks where the studies were conducted, and 2) most studies were ad hoc and used different approaches and evaluated different combinations of factors for different networks. Additionally, the interactions among multiple factors were only evaluated in a few studies and correlations among factors were rarely taken into account (except in the case studies conducted by Ariaratnam et al., 2001, and Chughtai and Zayed, 2008). In this context, the first objective of the work presented here is to propose a new, robust and standardized method to identify the most influential factors that should be retained in the models predicting the structural deterioration of sewer pipes. The method is based on the likelihood ratio test and the Cox model, used for the first time here to simulate the structural deterioration process of sewer pipes, which makes it possible to integrate several impact factors as uncorrelated explanatory variables. Also, given the large variation in the results found in the literature concerning the influential factors for sewer pipe deterioration, the second objective is to determine the factors that should be considered for modeling the structural deterioration of Canadian sewers, as a function of their main characteristics and the data that are usually available in Canadian municipalities. This information will help guide network managers to the most appropriate deterioration model for their needs. The third objective is to compare the results of the proposed method for the identification of the most influential factors with the results of two simpler methods, one of them often applied in previously published studies. To attain these objectives, analyses were performed using data provided by two Canadian municipalities, as described in the following sections.

## **7.2 .Methodology**

### **7.2.1 Case studies**

The analyses were performed using data from two different Canadian sewer networks, hereafter referred to as Network A and Network B, located in the province of Quebec. The data provided by

network managers consisted of 1) sewer pipe characteristics (installation date, material, diameter, length, and location), and 2) observed structural defects in the pipes that were inspected using a camera, along with the inspection date. The database of the inspected sewer pipes included 15 years of inspections for Network A (1998 to 2012), and 3 years of inspections for Network B (2003 to 2005). In both databases, a “pipe” is defined as a portion of the sewer network located between two manholes or adjacent street junctions, with a constant slope, diameter, and material.

For the analyses presented in this paper, only the results from inspections performed with a zoom camera were retained, as these were the most common type. For Network A, all the observed defects were categorized using the WRc (1994) system, on a scale of 1 to 5. For Network B, the defects were originally characterized using the CERIU (2004) system, thus CERIU grades were converted to WRc grades using the conversion table presented in Duchesne *et al.* (2011). The highest grade for a structural pipe defect was retained to quantify its overall structural state. Another state, state 0, was incorporated into our analyses for pipes without noted defects. Consequently, a pipe in state 0 would have no significant observable structural defects, while a pipe in state 5 would need immediate intervention. Because there were fewer pipes in the worst deterioration states, condition states 2 and 3, and condition states 4 and 5, were grouped together. In summary, the inspected pipes were classified into four distinct deterioration states: 1) state 0 (no structural defect observed); 2) state 1 (only minor structural defects observed); 3) state 2-3 (moderate deterioration); and 4) state 4-5 (one or more severe structural defects observed).

Table 7-2 presents the main characteristics of the pipes in Networks A and B. Since there is a high level of uncertainty in the installation dates of older pipes, “total network” refers to all the pipes installed in 1900 or later, whereas “inspected pipes” refers to all the pipes that were 70 years old or newer at the time of inspection. In Table 7-2, “other material” includes asbestos cement, non-reinforced concrete, corrugated steel, brick, cast iron, pipe reinforced with glass fiber, polyethylene, steel, and vitrified clay. Table 7-3 gives the proportions of the pipes in states 0, 1, 2-3, and 4-5 (corresponding respectively to very good, good, fair and poor structural state) in the different age ranges for Networks A and B.

.

Tableau 7-2 Characteristics of sewer pipes in Networks A and B

|                     | Network A         |                       | Network B         |                       |
|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Installation year   | Whole network (%) | Inspected pipes (%)   | Whole network (%) | Inspected pipes (%)   |
| 1900-1929           | 5.0               | 7.0                   | 0.7               | 0.0                   |
| 1930-1949           | 6.1               | 8.1                   | 1.7               | 1.7                   |
| 1950-1969           | 25.4              | 32.5                  | 44.32             | 55.6                  |
| 1970-1989           | 36.6              | 36.9                  | 33.9              | 35.7                  |
| 1990-2012           | 21.8              | 13.6                  | 19.2              | 6.8                   |
| Unknown             | 4.8               | 1.6                   | 0.0               | 0.0                   |
| Sewer type          | Total length (km) | Inspected length (km) | Total length (km) | Inspected length (km) |
| Combined            | 586               | 383                   | 442               | 70                    |
| Stormwater          | 1,972             | 53                    | 424               | 43                    |
| Sanitary            | 2,067             | 1,213                 | 420               | 46                    |
| Diameter            | Total length (km) | Inspected length (km) | Total length (km) | Inspected length (km) |
| ≤ 300 mm            | 2,252             | 1,209                 | 426               | 23                    |
| 300 - 600 mm        | 1,236             | 344                   | 570               | 81                    |
| > 600 mm            | 636               | 93                    | 290               | 52                    |
| Unknownm            | 501               | 3                     | -                 | -                     |
| Material            | Total length (km) | Inspected length (km) | Total length (km) | Inspected length (km) |
| PVC                 | 471               | 273                   | -                 | -                     |
| Reinforced concrete | 2,167             | 1,212                 | -                 | -                     |
| Concrete            | -                 | -                     | 911               | 120                   |
| Other               | 267               | 115                   | 361               | 39                    |
| Unknown             | 1,720             | 49                    | 14                | -                     |

Table 7-3. Proportion of pipes in each structural state in different age ranges for Networks A and B

| Network A   |                                    |                                    |                                      |                                      |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Age (years) | Proportion of pipes in state 0 (%) | Proportion of pipes in state 1 (%) | Proportion of pipes in state 2-3 (%) | Proportion of pipes in state 4-5 (%) |
| 0 to 10     | 82                                 | 9                                  | 7                                    | 2                                    |
| 11 to 20    | 80                                 | 9                                  | 10                                   | 1                                    |
| 21 to 30    | 71                                 | 14                                 | 14                                   | 1                                    |
| 31 to 40    | 66                                 | 15                                 | 16                                   | 3                                    |
| 41 to 50    | 57                                 | 20                                 | 19                                   | 4                                    |
| 51 to 60    | 46                                 | 24                                 | 25                                   | 5                                    |
| Network B   |                                    |                                    |                                      |                                      |
| Age (years) | Proportion of pipes in state 0 (%) | Proportion of pipes in state 1 (%) | Proportion of pipes in state 2-3 (%) | Proportion of pipes in state 4-5 (%) |
| 0 to 10     | 54                                 | 15                                 | 27                                   | 4                                    |
| 11 to 20    | 47                                 | 24                                 | 29                                   | 0                                    |
| 21 to 30    | 41                                 | 18                                 | 40                                   | 1                                    |
| 31 to 40    | 37                                 | 15                                 | 47                                   | 1                                    |
| 41 to 50    | 27                                 | 13                                 | 58                                   | 2                                    |
| 51 to 60    | 14                                 | 14                                 | 71                                   | 1                                    |
| 61 to 70    | 0                                  | 0                                  | 100                                  | 0                                    |

### 7.2.2 Estimation of significant influential factors

The applied methodology is summarized in Figure 7-1. Details are provided in the sections below.

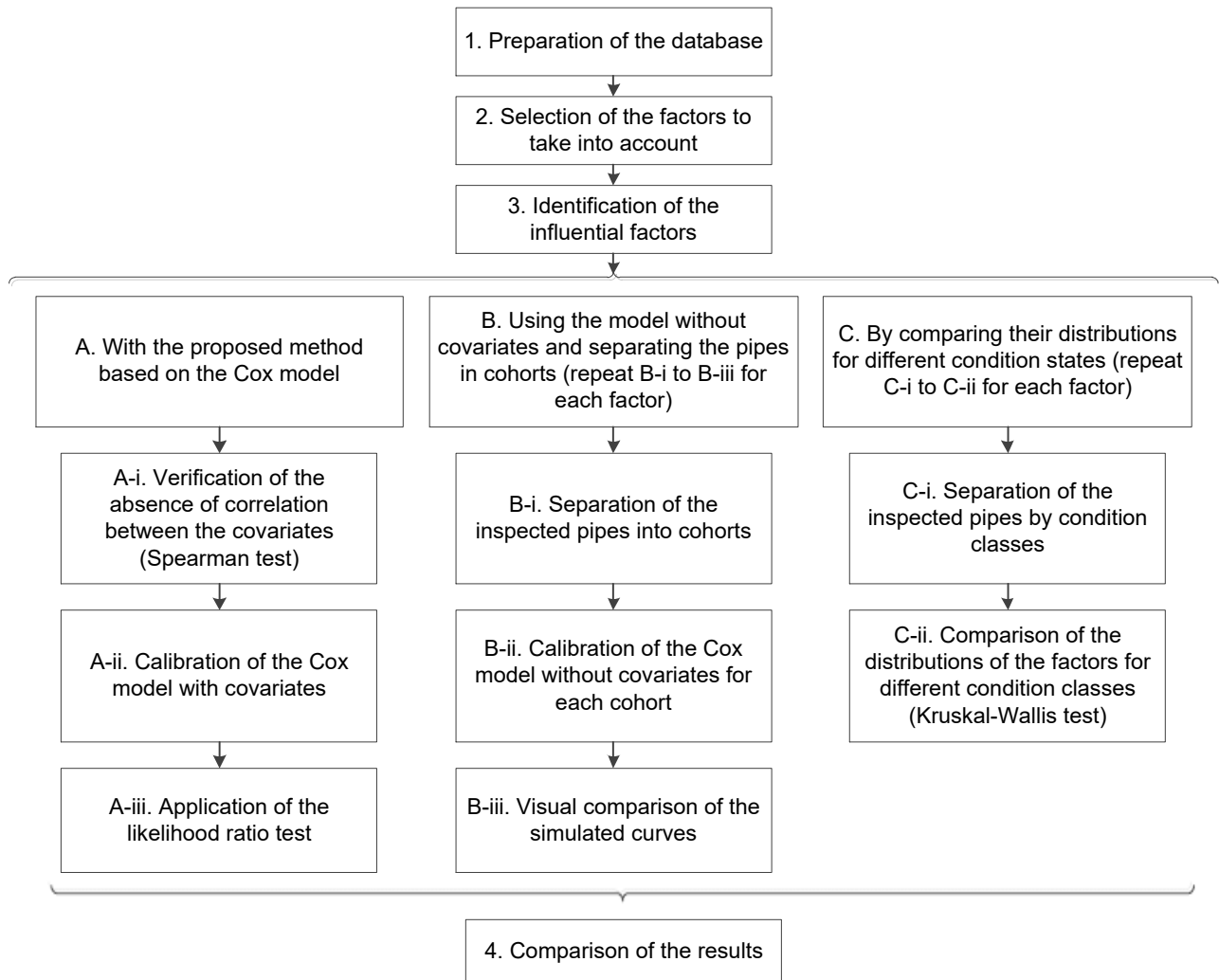


Figure 7-1. Illustration of methodology for the identification of the influential factors that should be taken into account for predicting the deterioration state of sewer pipes

### 7.2.3 Proposition of the Cox method to identify the significant influential factors

For the identification of the influential factors that should be taken into account for predicting the deterioration state of sewer pipes, we propose use of a Cox model, and then to evaluate the statistical significance of the model coefficient related to each influential factor (or covariate) (Figure 1, method A). Only the factors related to the coefficients that have been identified as statistically significant should then be retained in the model.

#### Description of the proposed Cox model

The Cox model is based on survival analysis principles, which represents the time that a pipe remains in each deterioration state as a random variable. This model, widely used in medical science to predict the time before an event (death, recidivism of a disease or cure) occurs (Klein and Moeschberger, 2003), has never been used, to our knowledge, for predicting the structural deterioration of sewer pipes (although it was used to predict breaks in water mains; e.g. Andreou *et al.*, 1987a and 1987b).

The equations of the Cox model for the modeling of sewer pipes deterioration are developed below for the specific case of four possible structural condition states. However, they could be developed similarly for any number of structural condition states. When four different structural condition states are considered, three residence times  $t$  should be modeled. Indeed, once a pipe has entered the fourth and final state it will remain in this state until it is replaced or repaired. Consequently, the residence time in the final state does not have to be modeled. The probability density functions (pdf) of the three residence times,  $f_j(t, X)$ , are expressed in the proposed model by exponential functions, as suggested by Serpente (1994) and Duchesne *et al.* (2013). Consequently, the pdfs of residence times are expressed as follows (Equation 7-1):

$$f_j(t, X) = k_j e^{\beta_j X} e^{-k_j e^{\beta_j X} t} \quad (7-1)$$

with:  $t$  = residence time in structural state  $j$ ;  $X$  = vector of explanatory variables; and  $k_j$  and  $\beta_j$  = model parameters corresponding to the structural state  $j$  ( $j = 0, 1$  or  $2$ ). When the  $\beta_j$  coefficients associated with the model covariates  $X$  equal zero, the Cox model becomes equivalent to the model of Duchesne *et al.* (2013).

The probability that a pipe will remain longer than time  $t$  in any state  $j$  is expressed by the survival function  $S_j(t, X)$  (Equation 7-2):

$$S_j(t, X) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f_j(t, X) dt \quad (7-2)$$

At the moment of inspection, only the physical and functional characteristics, including the deterioration state and the age of the pipe are available, but not the time at which it entered its current deterioration state and the previous ones. For example, if a pipe in the fourth deterioration state is inspected 60 years after its installation, 60 years is the total time the pipe was in the first, second, third and fourth states. For this reason, the pdf and survival functions for cumulative residence times need to be developed.

The equation for  $f_{01}$ , the pdf of the sum of residence times in the first and second states, is given in Equation 7-3:

$$f_{01}(t, X) = f_0 * f_1(t, X) = \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f_0(\tau, X) f_1(t - \tau, X) d\tau \quad (7-3)$$

where  $*$  is the convolution product. As  $f_0$ ,  $f_1$  and  $f_{01}$  are defined only for positive real numbers, then  $\tau \geq 0$  and  $(t - \tau) \geq 0$ , and consequently  $\tau \leq t$ , thus the previous integral can be simplified to:

$$f_{01}(t, X) = \int_{\tau=-\infty}^{\infty} f_0(\tau, X) f_1(t - \tau, X) d\tau = \int_{\tau=0}^t f_0(\tau, X) f_1(t - \tau, X) d\tau \quad (7-4)$$

The corresponding survival function, Equation 7-5, gives the probability that a pipe will be in the second state or lower (i.e., in the first or second state) at time  $T$ :

$$S_{01}(T, X) = \int_{t=T}^{+\infty} f_{01}(t, X) dt = 1 - \int_{t=0}^T f_{01}(t, X) dt = 1 - \int_{t=0}^T \int_{\tau=0}^t f_0(\tau, X) f_1(t - \tau, X) d\tau dt \quad (7-5)$$

Similarly for  $f_{012}$ , the pdf of the sum of the time in the first, second and third states, is given by Equation 7-6:

$$f_{012}(t, X) = f_{01} * f_2(t, X) = \int_{\tau=0}^t f_{01}(\tau, X) f_2(t - \tau, X) d\tau \quad (7-6)$$

And the probability that a pipe will be in the fourth state or lower (i.e. either in the first, second, third or fourth state) at time  $T$  is as presented in Equation 7-7:

$$S_{012}(T, X) = 1 - \int_{t=0}^T \int_{\tau=0}^t f_{01}(\tau, X) f_2(t - \tau, X) d\tau dt \quad (7-7)$$

The probability that a pipe with age  $t$  and having characteristics corresponding to covariates  $X$  will be in the first deterioration state is expressed in our model as (Equation 7-8):

$$P_0(t, X) = S_0(t, X) = e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} \quad (7-8)$$

with:  $k_0, \beta_0$  = model parameters associated with the residence time in the first condition state.

The probability that a pipe of age  $t$  and having characteristics  $X$  is in the second, third or fourth (final) structural state (respectively  $P_1(t, X)$ ,  $P_2(t, X)$  and  $P_3(t, X)$ ) is computed from the survival functions for cumulative residence times, as given in Equations 7-9, 7-10 and 7-11 respectively.

$$P_1(t, X) = S_{01}(t) - S_0(t, X) = \frac{k_0 e^{\beta_0 X} e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} - k_0 e^{\beta_0 X} e^{-k_1 e^{\beta_1 X} t}}{k_1 e^{\beta_1 X} - k_0 e^{\beta_0 X}} \quad (7-9)$$

$$P_2(t, X) = S_{012}(t) - S_{01}(t, X) = \frac{\left( k_0 k_1 k_2 e^{\beta_0 X + \beta_1 X + \beta_2 X} e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} - k_0 k_1^2 e^{\beta_0 X + 2\beta_1 X} e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} \right.}{\left( k_2 e^{\beta_2 X} - k_1 e^{\beta_1 X} \right) \left( k_1 e^{\beta_1 X} - k_0 e^{\beta_0 X} \right) \left( k_2 e^{\beta_2 X} - k_0 e^{\beta_0 X} \right)} \quad (7-10)$$

$$\left. - k_0 k_1 k_2 e^{\beta_0 X + \beta_1 X + \beta_2 X} e^{-k_1 e^{\beta_1 X} t} + k_0^2 k_1 e^{2\beta_0 X + \beta_1 X} e^{-k_1 e^{\beta_1 X} t} \right. \\ \left. + k_0 k_1^2 e^{\beta_0 X + 2\beta_1 X} e^{-k_2 e^{\beta_2 X} t} - k_0^2 k_1 e^{2\beta_0 X + \beta_1 X} e^{-k_2 e^{\beta_2 X} t} \right)$$



$$P_3(t, X) = 1 - S_{012}(t) = 1 - \frac{\left( \begin{aligned} &k_1 k_2^2 e^{\beta_1 X + 2\beta_2 X} e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} - k_1^2 k_2 e^{2\beta_1 X + \beta_2 X} e^{-k_0 e^{\beta_0 X} t} \\ &- k_0 k_2^2 e^{\beta_0 X + 2\beta_2 X} e^{-k_1 e^{\beta_1 X} t} + k_0^2 k_2 e^{2\beta_0 X + \beta_2 X} e^{-k_1 e^{\beta_1 X} t} \\ &+ k_0 k_1^2 e^{\beta_0 X + 2\beta_1 X} e^{-k_2 e^{\beta_2 X} t} - k_0^2 k_1 e^{2\beta_0 X + \beta_1 X} e^{-k_2 e^{\beta_2 X} t} \end{aligned} \right)}{\left( k_2 e^{\beta_2 X} - k_1 e^{\beta_1 X} \right) \left( k_2 e^{\beta_2 X} - k_0 e^{\beta_0 X} \right) \left( k_1 e^{\beta_1 X} - k_0 e^{\beta_0 X} \right)} \quad (7-11)$$

where:  $k_1$  and  $\beta_1$  = model parameters associated with the residence time in the second deterioration state;  $k_2$  and  $\beta_2$  = model parameters associated with the residence time in the third deterioration state.

#### 7.2.4 Choice of the covariates and verification of the absence of correlations between them

Factors (covariates) integrated in the Cox model should not be correlated, thus a correlation test should be used to identify possible correlations among the factors before constructing the Cox model. In the work presented here, the Spearman method was used to determine the correlations among the factors. As described in many handbooks on statistics (e.g., Sheskin, 2003), this test measures the degree of association, linear or not, between two variables, even for those which are ordinal.

Also, the factors that should be included in  $X$ , the vector of explanatory variables, should be factors for which extensive data are available on the studied network and for which an impact on sewer structural deterioration is suspected a priori. The factors selected for the analysis presented here were those for which data are generally available for Canadian sewer networks and that could affect the overall performance and structural state of the pipes. These factors are grouped into two categories: physical and functional factors. The first category includes general pipe characteristics such as the age, diameter, length, material, and slope, while the last concerns the type of network. The selected factors have been frequently identified as influential factors in previous studies (see Table 7-1). Pipe age is not included in the vector of explanatory variables since it appears explicitly in the Cox model as the variable  $t$ .

Finally, the covariates can be quantitative and/or qualitative. However, qualitative variables require specific coding (as ordinal or binary variables) to include them in the model. In the present case study, the material type and network type were qualitative variables. In order to evaluate their potential correlations with other factors, and to enable their integration into the Cox model, these variables required coding in the form of variable indicators  $X_i$ . The number of variable indicators ( $i$ ) varied according to the number of categories included in the same variable, with  $i$  equal to one less than the number of categories (Klein and Moeschberger, 2003). For example, within Network B, sewer type was coded as follows: combined sewer,  $X_1 = 1$  and  $X_2 = 0$ ; storm water sewer,  $X_1 = 0$  and  $X_2 = 1$ ; and sanitary sewer,  $X_1 = 0$  and  $X_2 = 0$ . All codes for the qualitative variables are provided in the supplementary material (Table 7-S-1).

### 7.2.5 Calibration of the Cox model parameters

Before using the model, all of its parameters  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  and  $\beta_2$  should be estimated, based on the condition state observed during televisual inspections for a sample of representative sewer pipes. They remain specific to each sewer system and must be adjusted according to the inspection results, but may be subsequently verified using a cross-validation method as carried out in Duchesne *et al.* (2013). In the present study, the calibration of the Cox model was performed using the maximum likelihood method. This consisted of estimating the values of the parameters that maximized the likelihood function given in Equation 7-12.

$$L = \prod_{k \in cd_0}^{n_{cd_0}} P_0(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_1}^{n_{cd_1}} P_1(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_2}^{n_{cd_2}} P_2(t_k, X_k) \prod_{k \in cd_3}^{n_{cd_3}} P_3(t_k, X_k) \quad (7-12)$$

with  $t_k$  = age of inspected pipe  $k$  (years);  $X_k$  = values of the covariates for inspected pipe  $k$ ;  $cd_j$  = all inspected pipes for which the state was equal to  $j$  at inspection at age  $t_k$ ; and  $n_{cd_j}$  = the number of pipes in the set  $cd_j$ .

### 7.2.6 Determination of significance of each covariate

In the proposed method, the statistical significance level of parameters in the vectors  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  and  $\beta_2$  is tested with the likelihood ratio test (Thiombiano, 2013; Klein and Moeschberger, 2003), also

considered as a validation test. This test verifies if the coefficients corresponding to the factors integrated into the model (i.e. elements of  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  and  $\beta_2$ ) are significantly different from zero. It is based on the calculation of the distance  $\lambda$  between the logarithm of the likelihood function, calculated with the  $\beta(X_i)$  values estimated during calibration (different from zero; unrestricted model,  $\beta_{unr}$ ), and the logarithm of the likelihood function calculated with  $\beta(X_i)$ , the value of the coefficient for the analyzed factor, forced to zero (restricted model,  $\beta_{res}$ ) (Equation 7-13).

$$\lambda = 2[LL(\beta_{unr}) - LL(\beta_{res})] \quad (7-13)$$

Under the null hypothesis ( $\beta(X_i) = 0$ ),  $\lambda$  follows a Chi-square law ( $\chi^2_\alpha$ ) with the number of degrees of freedom equal to the number of imposed constraints for this hypothesis (number of parameters forced to zero) (Thiombiano, 2013; Klein and Moeschberger, 2003). If the probability, that the null hypothesis is valid, is greater than the chosen significance level ( $\alpha = 0.05$  here), then the restricted model is accepted. In the opposite case, the unrestricted model is accepted and the coefficient corresponding to the evaluated factor is judged significantly different from zero.

### 7.2.7 Comparison of results with those of two simpler common methods

The results of the above method for the evaluation of the significant factors, which should be considered to predict the structural deterioration of sewer pipes, were compared to those of two simpler methods. The first method (Figure 7-1, method B) involves the separation of pipes into cohorts sharing common characteristics, according to the factors analyzed, and the comparison of their deterioration curves as computed with the Cox model without covariates. Table 7-4 summarizes the cohorts created for this method and their characteristics. Each cohort should contain a sufficient number of pipes in order to be able to establish significant statistical relationships between the age and structural state; for this reason, the impact of the slope of the pipe could not be analyzed using this method. Accordingly, for Networks A and B, respectively, twelve and eleven models were calibrated (one for each cohort). These models were then used to calculate, for each cohort, the probability of being in each of the considered structural states, with respect to the age of the pipes. This kind of analysis is similar to those conducted by Ana *et al.* (2008), Baur and Herz (2002), Duchesne *et al.* (2013), and Micevski *et al.* (2002).

The second method (Figure 7-1, method C) involves evaluating whether the distributions of the values for each factor are significantly different among the structural states. When the distribution for a given factor differs according to the structural state of the pipes, it can be considered to be influential to the process of structural deterioration. This evaluation was performed using the Kruskal-Wallis test statistic (details are found in Sheskin, 2003), which allows for the comparison of the distributions of two or more samples of different sizes. However, this test can only be used to compare the distributions of quantitative data. Therefore, only the impacts of age, diameter, length, and slope were evaluated with this method for the pipes of Network A. This also held true for Network B, except for the slope, which was not available.

Table 7-4. Descriptions of analyzed cohorts for the two sewer networks

| Factors            | Network A   |                                                                                                                                                                                              | Network B   |                                                                                                            |
|--------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | Cohort name | Description                                                                                                                                                                                  | Cohort name | Description                                                                                                |
| <b>All factors</b> | A1          | All inspected pipes ( $n = 16,896$ )                                                                                                                                                         | B1          | All inspected pipes ( $n = 2,380$ )                                                                        |
| <b>Diameter</b>    | A2          | Inspected pipes with diameter < 300 mm ( $n = 13,209$ )                                                                                                                                      | B2          | Inspected pipes with diameter < 300 mm ( $n = 353$ )                                                       |
|                    | A3          | Inspected pipes with diameter between 300 and 600 mm ( $n = 3,007$ )                                                                                                                         | B3          | Inspected pipes with diameter between 300 and 600 mm ( $n = 1,336$ )                                       |
|                    | A4          | Inspected pipes with diameter $\geq 600$ mm ( $n = 679$ )                                                                                                                                    | B4          | Inspected pipes with diameter $\geq 600$ mm ( $n = 691$ )                                                  |
|                    | A5          | Inspected sanitary pipes ( $n = 13,544$ )                                                                                                                                                    | B5          | Inspected combined pipes ( $n = 1,055$ )                                                                   |
| <b>Sewer type</b>  | A6          | Inspected combined and stormwater pipes ( $n = 3,352$ )                                                                                                                                      | B6          | Inspected stormwater pipes ( $n = 637$ )                                                                   |
|                    |             |                                                                                                                                                                                              | B7          | Inspected sanitary pipes ( $n = 688$ )                                                                     |
| <b>Material</b>    | A7          | Inspected PVC pipes ( $n = 2,882$ )                                                                                                                                                          | B8          | Inspected concrete pipes ( $n = 1,808$ )                                                                   |
|                    | A8          | Inspected reinforced concrete pipes ( $n = 12,900$ )                                                                                                                                         | B9          | Inspected pipes of all other materials (asbestos cement, vitrified clay, PVC, and cast iron) ( $n = 572$ ) |
|                    | A9          | Inspected pipes of all other materials (asbestos cement, non-reinforced concrete, corrugated steel, brick, cast iron, pipe reinforced with glass fiber, polyethylene, steel) ( $n = 1,114$ ) |             |                                                                                                            |
|                    | A10         | Inspected pipes with length < 60 m ( $n = 6,938$ )                                                                                                                                           | B10         | Inspected pipes with length < 60 m ( $n = 1,172$ )                                                         |
| <b>Length</b>      | A11         | Inspected pipes with length between 60 and 120 m ( $n = 9,221$ )                                                                                                                             | B11         | Inspected pipes with length $\geq 60$ m ( $n = 1,208$ )                                                    |
|                    | A12         | Inspected pipes with length $\geq 120$ m ( $n = 737$ )                                                                                                                                       |             |                                                                                                            |

### **7.3 .Results and discussion**

#### **7.3.1 Statistical significance of factors according to the proposed method using the Cox model**

The first step before applying the Cox model is to evaluate the correlation between covariates. The results of the Spearman test are presented in Table 7-5 for Networks A and B.

Table 7-5. Spearman correlation coefficients for pipe age and other covariates (for all pipes of networks A and B)

| Network A        |     |          |        |                  |                  |                  |                |
|------------------|-----|----------|--------|------------------|------------------|------------------|----------------|
|                  | Age | Diameter | Length | Sewer type $X_1$ | Slope            | Material $X_1$   | Material $X_2$ |
| Age              | 1   | 0.24     | 0.06   | 0.37             | 0.01             | 0.14             | -0.19          |
| Diameter         |     | 1        | 0.02   | 0.49             | 0.07             | 0.30             | -0.29          |
| Length           |     |          | 1      | -0.06            | 0.01             | 0.08             | -0.09          |
| Sewer type $X_1$ |     |          |        | 1                | 0.18             | 0.07             | -0.06          |
| Slope            |     |          |        |                  | 1                | -0.10            | 0.15           |
| Material $X_1$   |     |          |        |                  |                  | 1                | -0.81          |
| Material $X_2$   |     |          |        |                  |                  |                  | 1              |
| Network B        |     |          |        |                  |                  |                  |                |
|                  | Age | Diameter | Length | Material $X_1$   | Sewer type $X_1$ | Sewer type $X_2$ |                |
| Age              | 1   | 0.13     | 0.10   | 0.24             | 0.41             | -0.27            |                |
| Diameter         |     | 1        | 0.14   | 0.53             | 0.28             | 0.23             |                |
| Length           |     |          | 1      | -0.01            | 0.02             | -0.02            |                |
| Material $X_1$   |     |          |        | 1                | 0.47             | 0.05             |                |
| Sewer type $X_1$ |     |          |        |                  | 1                | -0.54            |                |
| Sewer type $X_2$ |     |          |        |                  |                  | 1                |                |

These results demonstrate that correlations exist between some of the factors for the two networks. For Network A, the pipe diameter, type of network, and type of material are correlated. For Network B, correlations are noted between the pipe diameter and network type, as well as between the pipe diameter and material, and between the material and network type (combined or other).

Following these observations, the pertinence of each covariate in the Cox model was first evaluated for Networks A and B without accounting for the observed correlations (section 7.3.2), since they are

considered minor to medium. Next, the impacts of these correlations were estimated (section 7.3.3). In both cases and as mentioned above, the statistical significance of each factor was evaluated using the likelihood ratio test.

### **7.3.2 Statistical significance of factors in Cox model without consideration of correlations between covariates**

In this section, a “global” Cox model that integrates all of the evaluated factors for each network is established. The statistical significance of the coefficients corresponding to each covariate for Networks A and B are presented in Table 7-6 (in this table, for all coefficients,  $p\_value = 1$  and  $\chi^2_{0.05} = 3.84$ ;  $\theta_0$ ,  $\theta_1$ , and  $\theta_2$  are the model parameters associated with the residence time respectively in the first, second and third condition states).



Table 7-6. Results of likelihood ratio test for the global Cox models

| Network A                         |            |            |            |            |            |            |                  |            |            |             |            |            |                |            |            |                |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|------------|
| Coefficients for the global model |            |            |            |            |            |            |                  |            |            |             |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                                   | Diameter   |            |            | Length     |            |            | Sewer type $X_1$ |            |            | Slope       |            |            | Material $X_1$ |            |            | Material $X_2$ |            |            |
| <i>Estimated parameters</i>       | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$  | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$     | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$     | $\theta_1$ | $\theta_2$ |
|                                   | 0.00       | 0.14       | 0.00       | 0.07       | 0.00       | 0.03       | 0.47             | 0.00       | 0.00       | 0.08        | 0.00       | 0.41       | 0.27           | 0.00       | 0.00       | 0.01           | 0.51       | 0.88       |
| $\lambda$                         | -32.90     |            |            | -30.58     |            |            | -333.71          |            |            | -4.77       |            |            | -303.74        |            |            | -150.02        |            |            |
| Network B                         |            |            |            |            |            |            |                  |            |            |             |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Coefficients for the global model |            |            |            |            |            |            |                  |            |            |             |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                                   | Diameter   |            |            | Length     |            |            | Material $X_1$   |            |            | Sewer $X_1$ |            |            | Sewer $X_2$    |            |            |                |            |            |
| <i>Estimated parameters</i>       | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$  | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$     | $\theta_1$ | $\theta_2$ |                |            |            |
|                                   | 0.00       | 0.00       | 0.02       | 0.00       | 0.07       | 0.01       | 0.06             | 0.00       | 0.00       | 0.17        | 0.13       | 0.04       | 0.13           | 0.65       | 0.01       |                |            |            |
| $\lambda$                         | 0.00       |            |            | -2.32      |            |            | -4.54            |            |            | -26.69      |            |            | -54.77         |            |            |                |            |            |

As reported in the two tables, none of the coefficients are significantly different from zero ( $p\_value = 1$ ). This suggests that the factors evaluated for the two networks do not significantly impact the aging process of the pipes. However, the lack of statistical significance for some of these factors may be the result of correlations among the variables or correlations between the variables and the age of the pipes (Table 7-5). The following section describes how these correlations were taken into account.

### **7.3.3 Statistical significance of factors in Cox model with consideration of correlations between covariates**

To evaluate the impacts of the correlations between factors on the results of the likelihood ratio test, several other models were tested, referred to as simplified models. These models only integrated the covariates that were not correlated. Thus, based on the previously identified correlations, two models were tested for Network A. The first model only takes into account the covariates diameter, length, and slope. The second model incorporates the covariates network type and material, in the place of the pipe diameter. For Network B, once again based on the previously identified correlations, three models were created: 1) the first includes the diameter and length; 2) the second includes the material and length; and 3) the third includes the type of network and the length. Results of the likelihood ratio tests for the different models for Networks A and B are presented in Table 7-7 (in this table, for all coefficients,  $p\_value = 1$  and  $\chi^2_{0.05} = 3.84$ ;  $\theta_0$ ,  $\theta_1$ , and  $\theta_2$  are the model parameters associated with the residence time respectively in the first, second and third deterioration states).

Table 7-7. Results of likelihood ratio test for the simplified models

| Network A            |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
|----------------------|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|------------|------------|
| Model 1              |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Estimated parameters | Diameter   |            |            | Length           |            |            | Slope            |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ |                |            |            |                |            |            |
|                      | 0.08       | 0.03       | 0.03       | 0.49             | 0.00       | 0.00       | 0.03             | 0.01       | 0.56       |                |            |            |                |            |            |
| $\lambda$            | -43.77     |            |            | -38.53           |            |            | -12.95           |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Model 2              |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Estimated parameters | Length     |            |            | Sewer type $X_1$ |            |            | Slope            |            |            | Material $X_1$ |            |            | Material $X_2$ |            |            |
|                      | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$     | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$     | $\theta_1$ | $\theta_2$ |
|                      | 0.06       | 0.01       | 0.02       | 0.48             | 0.00       | 0.02       | 0.04             | 0.00       | 0.28       | 0.22           | 0.00       | 0.08       | 0.02           | 0.38       | 0.87       |
| $\lambda$            | -22.67     |            |            | -346.56          |            |            | -0.08            |            |            | -207.43        |            |            | -143.32        |            |            |
| Network B            |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Model 1              |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Estimated parameters | Diameter   |            |            | Length           |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | 0.02       | 0.02       | 0.02       | 0.00             | 0.06       | 0.00       |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| $\lambda$            | -0.87      |            |            | -1.93            |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Model 2              |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Estimated parameters | Length     |            |            | Sewer type $X_1$ |            |            | Sewer type $X_2$ |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ |                |            |            |                |            |            |
|                      | 0.00       | 0.08       | 0.00       | 0.20             | 0.14       | 0.00       | 0.15             | 0.65       | 0.00       |                |            |            |                |            |            |
| $\lambda$            | -2.60      |            |            | -34.71           |            |            | -58.03           |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Model 3              |            |            |            |                  |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| Estimated parameters | Length     |            |            | Material $X_1$   |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | $\theta_0$ | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_0$       | $\theta_1$ | $\theta_2$ |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
|                      | 0.00       | 0.07       | 0.00       | 0.19             | 0.00       | 0.00       |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |
| $\lambda$            | -2.54      |            |            | -40.09           |            |            |                  |            |            |                |            |            |                |            |            |

Again, despite the inclusion of correlations between certain covariates of the two networks, the likelihood ratio test demonstrated that none of the covariates except for age were influential in the structural deterioration process of the pipes in these networks (all  $p$ -values = 1). Similar results were obtained by testing models that incorporate only the age of the pipes and one covariate at a time.

Based on these results, the Cox model without covariates was finally used to estimate the probability that a pipe will be in structural state 0, 1, 2-3, or 4-5 as a function of its age, for Networks A and B. Figure 7-2 shows a comparison of the estimated and observed proportions for Network A. This figure

demonstrates the ability of the model to reproduce the current structural condition of the pipes. However, this visual comparison provides only a partial estimation of this ability, because each point represents a different number of pipes. The value of the likelihood function (used previously in the likelihood ratio test to compare the different models) is a better estimator of this ability. A slight overestimation of the probabilities for young pipes to be in state 0 can be noted in Figure 7-2; this is due to the fact that the curve must pass through one for 0-year-old pipes. In addition, the probabilities for older pipes (61-70 years old) to be in deterioration states 0, 2-3, and 4-5 seem to be less well estimated than for other pipe ages; this is due to the limited number of inspected pipes in this age range.

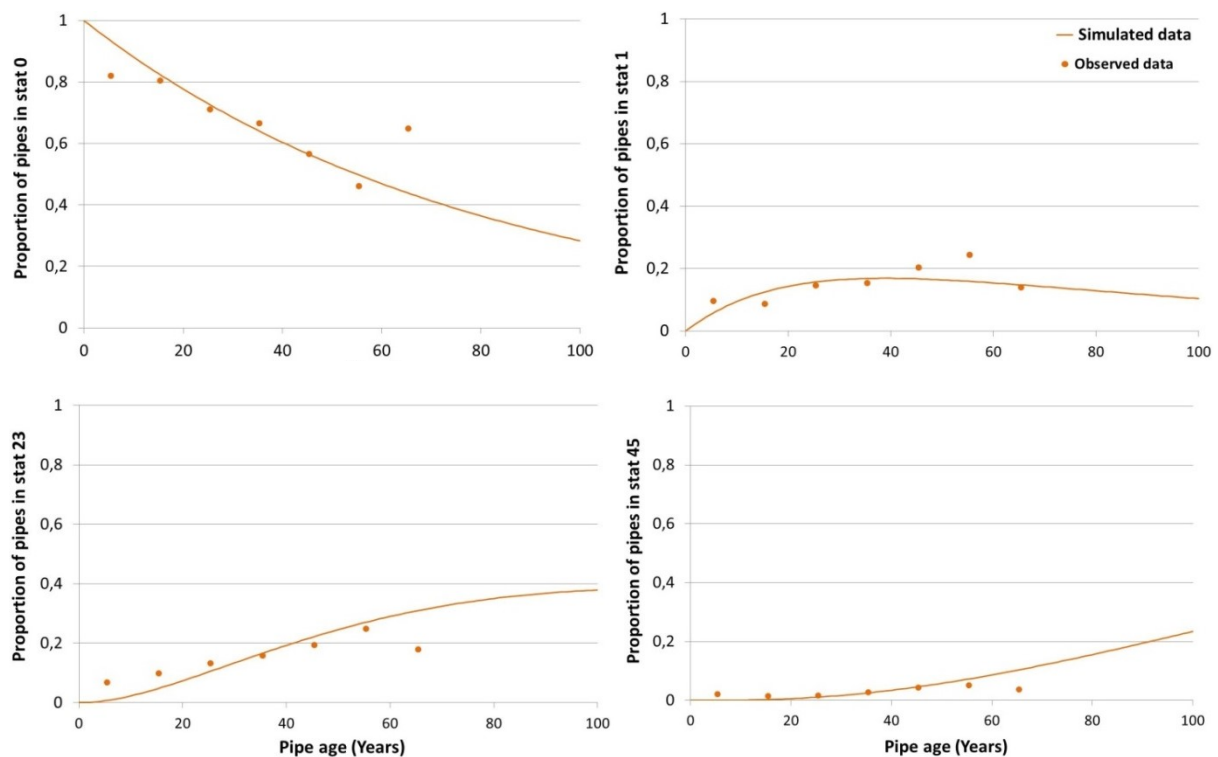


Figure 7-2. Proportion of pipes assigned to structural states 0 (very good), 1 (good), 2-3 (fair), and 4-5 (poor) for Network A.

### 7.3.4 Comparison of structural deterioration of pipes separated according to evaluated factors

The results of the Cox model without covariates, separating the pipes into cohorts, are presented in this section. Because of the large number of cohorts, only the probabilities associated with the final (4-5) state are presented. Figure 7-3 illustrates the probabilities that pipes in Network A will be in state 4-5. Note that in Figure 7-3-b, the probability curves for the two sewer type cohorts overlap, whereas in Figure 7-3-d, the curves corresponding to the pipes with lengths less than 60 m and those with lengths between 60 and 120 m also overlap. Results for Network B are provided in the supplementary material (Figure 7-S-1; in this figure, the probability curves for the combined and stormwater sewers overlap in panel (b) and the two curves overlap in panel (d)).

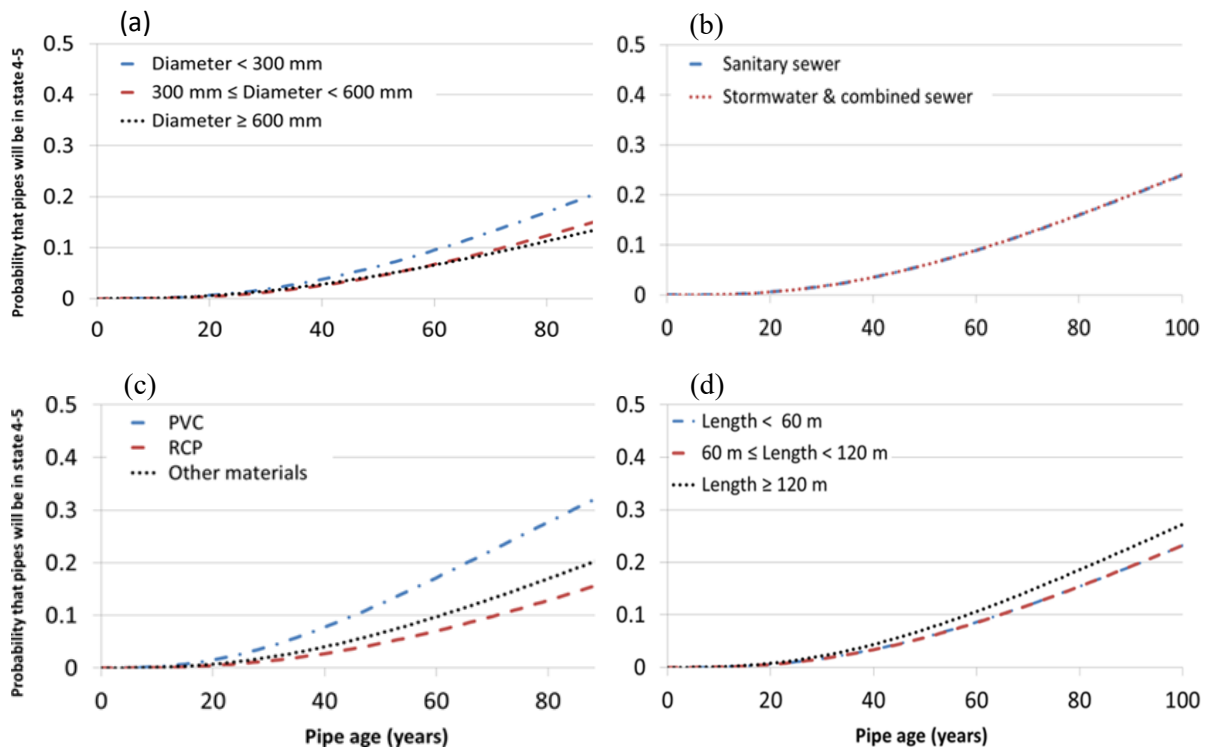


Figure 7-3. Probability that pipes of Network A will be in state 4-5 (poor structural state), classified by (a) diameter, (b) sewer type, (c) material and (d) length

As shown in Figure 7-3, the application of the Cox model without covariates to different cohorts of pipes in Network A demonstrates that the structural conditions of pipes evolve similarly for different cohorts. Older pipes are more likely to be damaged, regardless of either their physical or functional

characteristics. However, for the majority of factors defining the cohorts, slight differences can be noted for the probabilities that pipes will be in state 4-5 over time. Most of these differences are very small. However, the largest differences are found for the type of material for the pipes in Network A (Figure 7-3-c). Therefore, this factor seems to affect the deterioration process in the pipes of Network A, a priori. There are also marked differences for the pipes of Network B, classified by diameter, in relation to the probabilities that the pipes will be in state 4-5 (Figure 7-S-1); the diameter can therefore be considered to be a potentially influential factor for Network B. This evaluation method remains visual (has to be verified by a statistical test) and the results greatly depend on the amount of data for each cohort used for model calibration.

### 7.3.5 Comparison of distributions of factors classified by structural state

Table 7-8 presents the results of the Kruskal-Wallis test for comparison of distributions of the studied factors between very good and poor structural condition states (0 and 4-5) for Networks A and B. Box diagrams showing the distributions of the factors for Networks A and B for the same two structural states, 0 and 4-5, are presented in the supplementary material (Figure 7-S-2).

Figure 7-8. Results of Kruskal-Wallis test for comparison between very good and poor structural condition states

| Network | p_value for the compared factors |          |        |       |
|---------|----------------------------------|----------|--------|-------|
|         | Age                              | Diameter | Length | Slope |
| A       | 1.241E-38                        | 0.215    | 0.094  | 0.013 |
| B       | 0.007                            | 0.965    | 0.931  |       |

Based on a significance threshold of 0.05, it is evident that the pipe age has a significant impact on the structural deterioration process for the pipes in the studied networks ( $p\_value < 0.05$ ; the pipes in state 4-5 tend to be older than those in state 0). This method also highlights the possible impact that a pipe's slope has on the aging of pipes in Network A; the pipes in state 4-5 have greater mean slopes than those in state 0. However, this method, like the preceding one, does not take into account the possible correlations among factors. Additionally, the use of this method is limited by its dependence on the type of available data.

### **7.3.6 Comparison of results obtained from three methods**

All of the assessments performed with the Cox model combined with the likelihood ratio test demonstrate that age alone can explain, in a significant manner, the structural conditions of the pipes in Networks A and B. The addition of other factors as covariates in the Cox model does not improve the prediction of the structural states of these pipes over time. This includes factors that were determined to be influential in the aging process using the two simpler methods. However, the identification of some influential factors with the simpler methods (e.g., the material type for Network A and pipe diameter for Network B) may be the result of correlations among the variables or correlations between the variables and the age of the pipes (Table 7-5). Indeed, the two simpler methods do not take into account the possible correlations among factors. Additionally, the use of a method that compares the distributions of factors among the different structural states (using, for example, the Kruskal-Wallis test) cannot take into account the possible correlation between the age and some influential factors; it is also limited by its dependence on the type of available data (quantitative and continuous). The Cox model method presents the following advantages over the two simpler methods: 1) it does not require grouping data together according to a given characteristic (which in some cases may reduce the amount of data and thus hampering a statistical analysis), and 2) it can treat both quantitative and qualitative data.

The fact that no significant factors other than age were found using this method, including factors that are often identified as important by other researchers and other methods (e.g., diameter, material, and type of network), may be explained by the amounts and types of data available to assess the impact of each of these factors. For example, the majority of the inspected pipes in Networks A and B were made of concrete, which makes it difficult to effectively evaluate the impact of the type of pipe material on the deterioration process of the pipes. If one assumes that Networks A and B, and the data that are available to characterize them, are representative of most Canadian wastewater systems, age would remain the only significant factor that would need to be taken into account to model the structural deterioration of these networks.

## 7.4 .Conclusion

In this article, a new robust and standardized method, based on the use of the Cox model, was proposed to identify the most influential factors, which should be taken into account when modeling the structural deterioration of sewer pipes. To the best of our knowledge, this was the first time that the Cox model has been used to model the structural deterioration of sewer pipes. A calibration method was also proposed to apply the Cox model to the mathematical representation of a series of successive degradation states. Then, the impacts of physical and functional factors on the structural deterioration of pipes of two Canadian sewer networks were assessed using this method and two simpler ones. Results of this comparison highlighted the importance of evaluating interactions and correlations among factors. Use of simpler methods for the identification of the significant influential factors should thus be avoided.

For the two networks examined here, pipe age was unanimously identified by the three methods as the main factor influencing sewer pipe deterioration state. This was particularly evident using the Cox model with covariates, which demonstrated that taking the age alone into account could provide satisfactory predictions of the structural states of the pipes of the studied networks. If databases were available that included, for example, information on the structural states of several pipes made of different types of material and having a wide range of different ages, the results obtained could have been quite different. However, considering that the networks studied are representative of Canadian networks, and the data included variables that are generally available for these networks, it is unlikely that the integration of factors other than age in structural deterioration models would significantly benefit these networks.

The model and assessment methods presented in this article are useful tools for planning the renewal of sewer pipes. In addition to the structural deterioration of the network, this planning should ideally take into account the evolution of the hydraulic performances of sewers, which is all the more critical in the context of climate change. Future work should focus on the integration of these aspects in order to improve renewal procedures, reduce the costs associated with them, and improve the overall performance of sewage systems.



## **Acknowledgements**

The authors wish to thank the Quebec city and another anonymous municipality for providing the data used in this study. The authors are also grateful to Prof. Alain Mailhot from INRS who helped with the development of the likelihood function.

## Supplementary Material.

Table 7-S 1. Material and sewer type coding for Networks A and B

| Network | Factors    | Category of factors           | Indicator $X_i$ |       |
|---------|------------|-------------------------------|-----------------|-------|
|         |            |                               | $X_1$           | $X_2$ |
| A       | Material   | Reinforced concrete           | 1               | 0     |
|         |            | PVC                           | 0               | 1     |
|         |            | Other material                | 0               | 0     |
|         | Sewer type | Sanitary sewer                | 0               | -     |
|         |            | Stormwater and combined sewer | 1               | -     |
| B       | Material   | Concrete pipes                | 1               | -     |
|         |            | Other material                | 0               | -     |
|         | Sewer type | Combined sewer                | 1               | 0     |
|         |            | Stormwater sewer              | 0               | 1     |
|         |            | Sanitary sewer                | 0               | 0     |

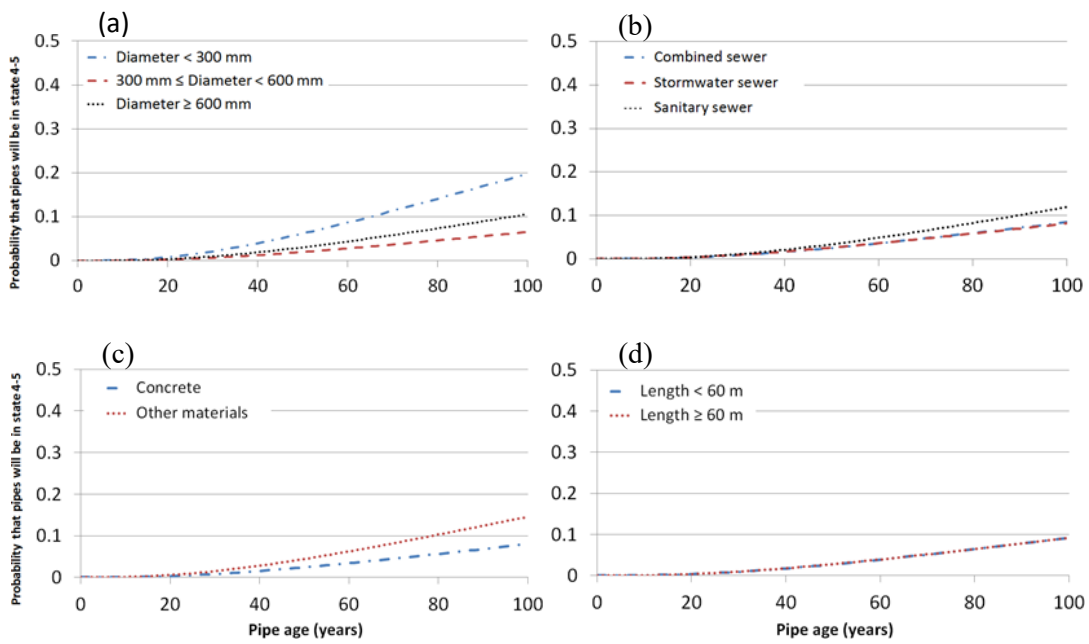


Figure 7-S-1. Probability that pipes in Network B will be in state 4-5 (poor structural state), classified by (a) diameter, (b) sewer type, (c) material, and (d) length.

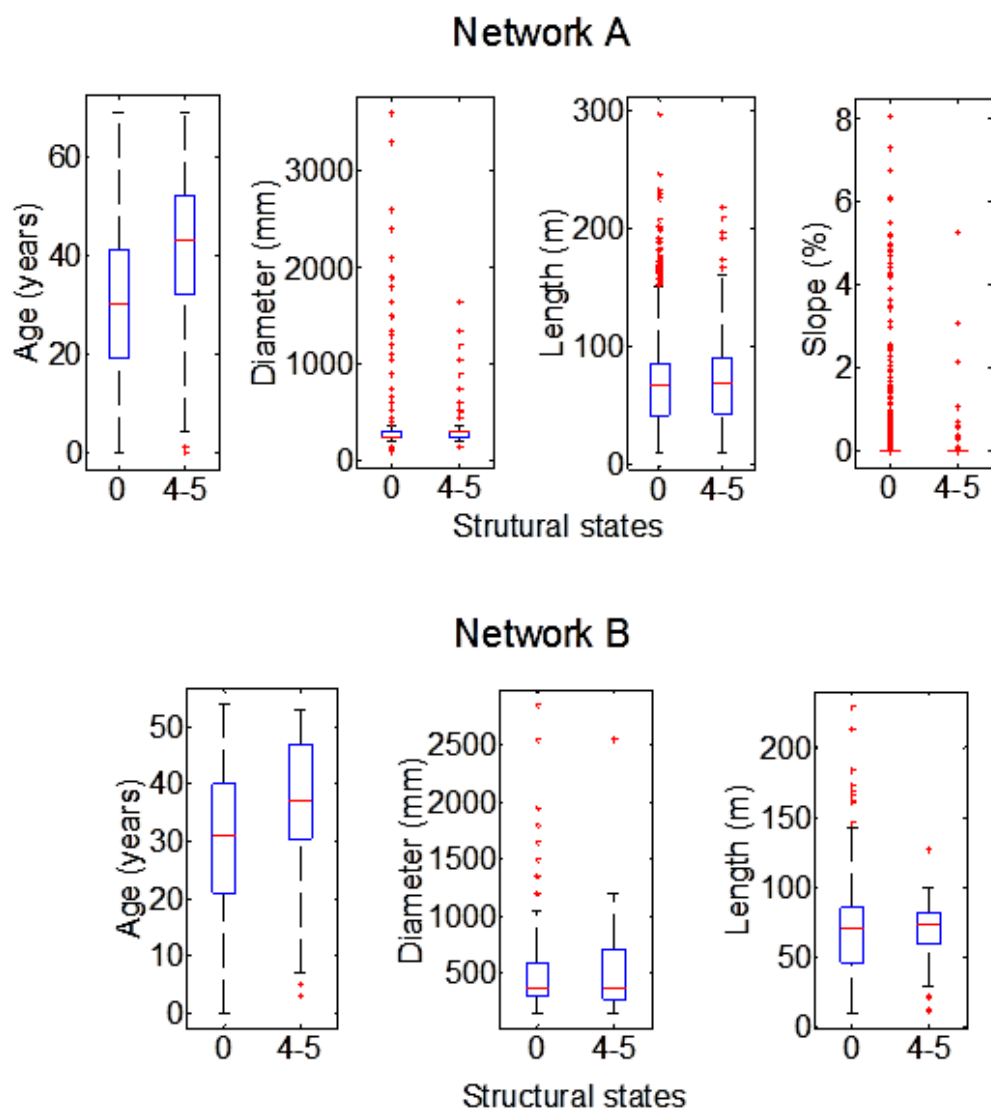


Figure 7-S-2. Distribution of age, diameter, length (Networks A and B), and slope (Network A) for pipes in structural states 0 and 4-5 (very good and poor structural states)



## **8 Article II: Predicting the individual hydraulic performance of sewer pipes in the context of climate change**

—

Prédiction de la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout  
dans un contexte de changement climatique

---

### **Auteurs:**

Hind El-Housni<sup>1</sup>, Sophie Duchesne<sup>1</sup>, and Alain Mailhot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: INRS-ETE, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9, Canada

### **Revue:**

L'article a été accepté au *Journal of Water Resources Planning and Management* (mars 2019)

### **Contribution des auteurs**

L'élaboration de la méthodologie de la modélisation de la performance hydraulique des conduites d'égout dans un contexte de changement climatique a été réalisée par la candidate au doctorat Hind El-Housni sous la supervision de la Pre Sophie Duchesne. La traduction de la méthodologie en algorithme et en langage de programmation informatique, Matlab, a été réalisée par la candidate au doctorat avec l'aide de Guillaume Talbot, assistant de recherche dans l'équipe du Pr Mailhot. Certaines fonctions, en langage Matlab, intégrées dans l'algorithme ont été réalisées par Guillaume Talbot. La vérification et l'interprétation des résultats ainsi que la rédaction de l'article scientifique ont été réalisées par la candidate au doctorat. L'article a été révisé par les Pr Sophie Duchesne et Alain Mailhot. La soumission de l'article a été réalisée par la candidate Hind-El Housni.



## Résumé

Dans cet article, une nouvelle méthode permettant d'évaluer et de prévoir la performance hydraulique individuelle des conduites d'un réseau d'égout est proposée. Elle permet d'identifier les conduites hydrauliquement contraignantes en conditions climatiques actuelles et d'évaluer l'évolution future de leur performance hydraulique dans un contexte de changement climatique (CC). Cette méthode est basée sur des simulations hydrologiques/hydrauliques (HH) utilisant le modèle de gestion des eaux pluviales SWMM avec des événements pluviométriques isolés observés comme intrants. L'évolution de la performance hydraulique des conduites dans le temps est simulée en augmentant l'intensité des événements pluvieux d'un facteur issu des prévisions de CC pour la zone d'étude. La méthode de modélisation de la performance hydraulique des conduites proposée est appliquée à deux réseaux d'égout sanitaire et unitaire canadiens. Son application a permis d'identifier les conduites contraignantes susceptibles de provoquer des dysfonctionnements hydrauliques dans les deux réseaux, dans les conditions climatiques actuelles et futures. Pour les deux réseaux, le nombre de conduites contraignantes dépend de l'événement pluvieux utilisé et devrait augmenter dans le climat futur. Cette méthode peut être appliquée à différents types de réseaux, ce qui en fait un outil utile pour la planification du renouvellement des réseaux de drainage urbain dans un climat en évolution.

**Mots-clés:** Performance hydraulique; Conduites contraignantes; Changement climatique; Modèle SWMM

## Abstract

A new method to identify pipes with insufficient hydraulic capacity is proposed. This method can be applied to assess the future evolution of network performance under climate change (CC). It is based on hydrologic/hydraulic simulations using the Storm Water Management Model (SWMM) and single observed rainfall events. The evolution of the hydraulic performance is simulated by increasing the intensity of these rainfall events by a factor depending on the CC for the study area. The proposed method is applied to two Canadian separated and combined sewer networks. The method identified the constraining pipe sections that could cause hydraulic dysfunctions in the networks, both in



current and future climates. For the two networks, the number of constraining pipes depends on rain events and is anticipated to increase in the future climate. The proposed method can be applied to various types of networks to assess the hydraulic performance of individual pipes over time, making it a useful tool for the planning of drainage network renewal under CC.

**Keywords:** Hydraulic performance; Constraining pipes; Climate change; SWMM model

## 8.1 . Introduction

The design of sewer pipes depends on their intended use (i.e., nature of the water to convey — wastewater, stormwater, or combined) and peak flows they need to convey (Mailhot and Duchesne, 2010; Rosenberg *et al.*, 2010; Mailhot *et al.*, 2007b). More specifically, the diameters of stormwater and combined network pipes are determined to convey a critical flow corresponding to a rainfall event with a given return period, typically varying from two to five years. Increases in the imperviousness of the drained area and/or an increase in the intensity of the rain event corresponding to the design return period may reduce the hydraulic performance of sewer pipes (Kang *et al.*, 2016; Neumann *et al.*, 2015; Berggren *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2011; Kleidorfer *et al.*, 2009; Olsson *et al.*, 2009; Mailhot *et al.*, 2008; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Niemczynowicz, 1982). In recent decades, climate change (CC) has led to an increase in the frequency of intense rainfall events in several regions of the world (see Westra *et al.*, 2015; IPCC, 2013; Ryu *et al.*, 2014; Shephard *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2005), and the available projections of extreme rainfalls suggest that their intensity and frequency will continue to increase over the course of the twenty-first century (see Dale *et al.*, 2017; Kendon *et al.*, 2014; Westra *et al.*, 2014; IPCC, 2013; Mailhot *et al.*, 2012). According to several researchers, including Ruiter (2012), such changes may lead to more-frequent flooding and sewer backups. The development of hydraulic performance assessment tools for sewer networks, therefore, becomes crucial in the CC context. In this study, “hydraulic performance” refers to the possibility that a hydraulic dysfunction (surcharge, sewer backup, or flooding) will occur in a given network for a rainfall event corresponding to a given return period. Existing tools evaluating this performance and its evolution over time are based on two approaches — a statistical approach and hydraulic/hydrological (HH) modeling approach — or a combination of both (Babani *et al.*, 2008).

In the statistical approach, models predict the deterioration of the hydraulic performance of individual sewer pipes (individual pipe section) over time as a function of factors related to the pipe characteristics (e.g., age and diameter) and the environment (e.g., soil type). Included among these models are: 1) fuzzy logic models, used by Hosseini and Ghasemi (2012) to estimate the Manning roughness coefficient to calculate the hydraulic performance values of individual pipes in a separate wastewater sewer; 2) ordered probit models and probabilistic neural-network models (Tran *et al.*, 2010), which express the probability that a pipe (stormwater network) will be in a given hydraulic performance state after a certain period of time depending on several factors (structural state

condition, age of pipe, size, burial depth, slope, and soil type); and 3) Markov models, multiple discriminant analyses, and neural-network models (see Tran, 2007).

Despite their ability to predict the evolution of the hydraulic performance of individual sewer pipes, existing statistical models do not consider the climatic conditions or their changes over time, which are determinant factors in the pipes' hydraulic performance. Indeed, in the studies cited above, only the age of the pipes was modified to evaluate the future hydraulic performance of sewer pipes, and not the possible variation in time of climatic conditions. HH modeling can, however, address this issue.

An HH model can simulate the main processes involved in urban hydrology considering climatic conditions and urban development (Berggren *et al.*, 2012; Kleidorfer *et al.*, 2009; Olsson *et al.*, 2009; Niemczynowicz, 1989). In previous studies, future rainfall events representing climatic conditions were constructed using different methods. The simplest method is to apply a relative increase to the intensity of a given design storm, the value of this increase being generally based on available climatic projections (Kirshen *et al.*, 2015; Huong and Pathirana, 2013; Olsson *et al.*, 2013; Kleidorfer *et al.*, 2009; Watt *et al.*, 2003; Waters *et al.*, 2003; Niemczynowicz, 1989). A second method uses projections from climate models to modify observed rainfall series (Dale *et al.*, 2017; Berggren *et al.*, 2012; Olsson *et al.*, 2009; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Mailhot *et al.*, 2007b; He *et al.*, 2006). Another is based on the simulation of either future rainfall series or design storms derived by downscaling the output series from climate models (Kang *et al.*, 2016; Osman, 2015). Finally, Dale *et al.* (2017) relied on the climate analog approach to estimate future changes in rainfall intensities.

Unlike studies using statistical models, most of those based on HH models assess the hydraulic performance of the whole sewer system, or of some part of it, but not the hydraulic performance of individual pipes (see Section 8.2 for more details). Only a few studies have, to our knowledge, developed methodologies based on HH modeling capable of attributing a hydraulic performance condition to each pipe. This is the case for Bennis *et al.* (2003), who developed an index relating the hydraulic performance of a pipe to the height of maximum surcharge in the node located immediately upstream, for a given rainfall, and to the depth at which the pipe is buried. This performance index was also used in Tagherouit *et al.* (2011). In both of these studies, the CC impact was not considered.

To include the impact of CC, and in response to an increasingly urgent need for tools to assist in the planning of sewer renewal, a method is proposed in this study for the evaluation and prediction of the individual hydraulic performance of stormwater and combined sewer pipes in a changing climate. This method aims at identifying the pipes that should be upgraded to avoid hydraulic dysfunctions for specific rainfall events, under current and future conditions. It is based on: 1) the identification of the sections of pipe having a current unsatisfactory hydraulic performance, causing hydraulic dysfunctions (surcharge) in the network, and (2) the assessment of the evolution of the hydraulic capacity of pipes over time, as a function of the projected changes in rainfall intensities. The main originality of the proposed method is that it targets individual pipes that are responsible for current and future hydraulic dysfunctions in a CC context, pipes that could be replaced to maintain adequate long-term hydraulic performance. Such a strategy would allow managers to prioritize and better plan pipe renewals.

The proposed method is based on HH modeling using the SWMM model (Rossman, 2008) with single observed rainfall events (SOREs), modified to represent future climatic conditions over several future horizons. Applications are presented for two real networks. Further details about the methodology are given in Section 8.3, and results are introduced and discussed in Section 8.4.

## **8.2. Review of previous studies evaluating the impact of CC on the hydraulic performance of sewer networks using HH models**

The aim of this review is to show the diversity of HH models and CC projections that can be used. In several of these studies, conducted particularly in Europe, the MOUSE model (a component of the upgraded version MIKE URBAN; DHI, 2013) was used to evaluate the hydraulic performance of several sewer systems in relation to CC (Berggren *et al.*, 2014; Olsson *et al.*, 2013, 2009; Semadeni-Davies *et al.*, 2008). In these studies, the CC impact was assessed by adjusting rainfall intensity according to the season, and particularly according to the predicted results of different climate models conducted with several greenhouse gas (GHG) emission scenarios. Berggren *et al.* (2014), for example, used two distinct methods to obtain future rainfall intensities. The first applied a constant adjustment factor, derived from climate model results, to the intensity of the entire rainfall (design storm). The second was based on the delta change (DC) approach that estimates a distribution of DC factors (DCFs), which are the ratios between some percentiles of the future rainfall

intensity distribution and the same percentiles in the current climate for the same season (Olsson *et al.*, 2009). In Berggren *et al.* (2014), the distribution of DCFs was applied to observed time series to define future rainfall event series, from which intense single rainfall events were extracted. Olsson *et al.* (2013) increased the intensity of a 1-h to 10-year return period design storm (by 23.6% between the 10<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> minutes and by 22.6% for the rest of the rain) to obtain a future rainfall event (horizon 2071-2100). The HH simulations of the network under future conditions were subsequently carried out using the MOUSE model with this modified design storm. These authors showed large deficiencies of the studied sewer pipes (located in Arvika, Sweden) in a future climate. Previously, for the sewer system of Kalmar (Sweden), Olsson *et al.* (2009) reported an increase of approximately 45% in the number of surface flooding events caused by the increase in intense precipitation intensities (20% and 30% in the summer and 50% to 60% in the autumn for the SRES-A2 scenario) by the end of the 21<sup>st</sup> century. These authors adjusted a continuous time series of precipitation, observed between 1991 and 2004, using the DC method.

Also in Sweden, Berggren *et al.* (2012) simulated the hydraulics and hydrology of a suburban sewer drainage system using the MIKE URBAN model. To this end, future rainfall series were created from observed rainfall series using the DC method. This analysis demonstrated that the number, frequency, and duration of floods and sewer backups should increase significantly in a future climate for the studied area.

The SWMM model was used to assess and predict the hydraulic performance of North American, European, and Asian urban sewer systems in different studies (Mikovits *et al.*, 2017; Kang *et al.*, 2016; Kirshen *et al.*, 2015; Huong and Pathirana, 2013; Kleidorfer *et al.*, 2009; Denault *et al.*, 2006; Watt *et al.*, 2003; Waters *et al.*, 2003; Niemczynowicz, 1989). Mikovits *et al.* (2017) evaluated, using SWMM, the combined impact of urban development and CC on flooding volumes from a combined sewer network in Innsbruck, Austria. They showed that the impact of CC, i.e., more-intense heavy precipitation during summer, could be either compensated or amplified by urban development, depending on the spatial distribution of urban growth. For this evaluation, they used design rainfalls of various durations and return periods, which were modified using an empirical statistical downscaling method to produce future conditions for four GHG emission scenarios. Kirshen *et al.* (2015) applied SWMM to compute flooding volumes for the 3-month, 10-year, and 100-year design storms in Sommerville, U.S., for three-time horizons: 2011, 2040, and 2070. The future design rainfalls were those developed by Powell (2008) for the case study area, applying a relative change

factor to the intensities of historical design storms; these factors were derived from the outputs of 20 global climate models using two GHG emission scenarios.

Dale *et al.* (2017) applied the InfoWorks HH model (Innovyze, 2018) to four sewer networks in the U.K. They used as inputs to these models critical design storms, which were modified by applying percentages of change to rainfall depth to represent future climate. These percentages of change were computed by combining the results of two methods. The first one was based on climate analogues, in which UKCP09 CC projections (Murphy *et al.*, 2009) were used to identify the future mean summer temperature for the four study sites in 2030, 2050, and 2080. These temperatures were then used to select European cities (named contemporary climatological analogs) with similar mean summer temperatures in the current climate. Rainfall for 2- to 30-year return periods, for various durations, were computed using observed rainfall series in these contemporary analogs, and those were assumed to represent the future climate in the four studied cities. The second one compared rainfall intensities associated with various return periods, for the current and future climates, as computed with hourly precipitation data simulated during the very high-resolution (1.6-km grid boxes) CONVEX Project climate model experiment. For the four U.K. study sites, Dale *et al.* (2017) computed increases varying from 11% to 113% in sewer flooding volumes, which are higher than the increases in rainfall (7% to 50%), as well as increases in the number, frequency, and volume of combined sewer overflows.

### **8.3 . Methodology**

#### **8.3.1 Case studies**

The proposed method was applied to two sewer networks located in the province of Quebec (Canada), referred to as networks A and B for reasons of confidentiality. Network A corresponds to a mixed separated stormwater and combined sewer with a total pipe length of 46 km (0.125 to 1.8 m in diameter) that drain an area of 378-ha (23% impervious). Network B is a 70-km combined sewer network draining 475 ha (36% impervious), with pipe diameters varying from 0.15 to 3.8 m. The components of these two networks, as modeled using SWMM, are illustrated in Figure 8-1. The calibrated SWMM models for these two areas were provided by the network managers. Their calibration used the following information: 1) for Network A, five rainfall events (of recurrence up to five years), recorded by two rain gauges within the sector, and flow measurements collected

between July and August 2011 (Fortier, V., Gagnon, J.F., Pugin, S., Trudel, L., Rapport final: Modélisation, calibration, diagnostic, solutions conceptuelles et études préparatoires (in French), Unpublished report); and 2) for Network B, two campaigns of flow measurements carried out over two distinct periods (from September 17 to October 16, 2014, and from August 25 to September 23, 2015) and observed rainfall data for these same periods (according to communications with the Municipality B).



Figure 8-1. SWMM hydraulic models of Networks B (left) and A (right)

### 8.3.2 Rainfall events

Modeling the hydraulic performance of pipes was carried out using observed SOREs, which were modified to take into account CC, considering a dry network and unsaturated soil as initial

conditions. Using such events allowed for: 1) more-realistic temporal distributions and intensities, as opposed to design storms; 2) targeting events that are likely to lead to sewer surcharge, backups, and flooding (Ruiter, 2012); and 3) reducing simulation time, which can become an issue when simulating continuous rainfall series (Notaro *et al.*, 2016).

From 5-min rainfall series recorded from 1943 to 1994 and from 1961 to 1976 at two meteorological stations located in southern Quebec, 400 events were extracted. Each rainfall event was characterized according to its return period for nine durations ranging from 5 min to 24 h. This characterization was based on the intensity–duration–frequency curves created by Mailhot and Talbot (2011) and by Villeneuve *et al.* (2007) using maximum annual precipitation series recorded at the same meteorological stations between 1943 and 1994. For the current analysis, only SOREs with return periods ranging from two to five years for at least one of the selected durations (5 min to 24 h), and without any return period higher than five years for these same durations, were selected. The 2 to 5 years return period criterion was retained, because it corresponds to the design criterion of pipes for the studied areas (consequently, surcharges should be avoided for the events corresponding to this design criterion). Only six of the 400 recorded events fulfilled this selection criterion. Figure 8-2 gives the rainfall profiles for these six SOREs, while Table 8-1 summarizes their characteristics. The selected SOREs show durations ranging from 1 to 24 h and variable temporal distributions. As shown in Figure 8-2, their maximum intensity occurs either at the beginning, in the middle, or at the end of the event. To assess the impact of CC on the hydraulic performance of sewers, these SOREs were modified as described in the next section.



Table 8-1. Characteristics of the selected six rainfall events, with return periods of two to five years for durations ranging from 5 min to 24 h

| Events | Event characteristics |                                     |                    | Recurrence per duration (years) |        |        |        |        |        |        |        |      |
|--------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|        | Total height (mm)     | Maximum intensity over 5 min (mm/h) | Total duration (h) | 5 min                           | 10 min | 15 min | 30 min | 1 h    | 2 h    | 6 h    | 12 h   | 24 h |
| 1      | 20.1                  | 91.5                                | 0.92               | 2 to 5                          | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2    | < 2    | < 2    | < 2    | < 2  |
| 2      | 28.9                  | 103.7                               | 1.67               | 2 to 5                          | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2    | < 2    | < 2    | < 2  |
| 3      | 53.0                  | 54.9                                | 9.17               | < 2                             | < 2    | < 2    | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2    | < 2  |
| 4      | 29.4                  | 61.0                                | 2.08               | < 2                             | < 2    | < 2    | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2    | < 2    | < 2  |
| 5      | 42.0                  | 62.7                                | 24.00              | < 2                             | < 2    | < 2    | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2    | < 2  |
| 6      | 48.7                  | 47.6                                | 23.42              | < 2                             | < 2    | < 2    | < 2    | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | 2 to 5 | < 2  |

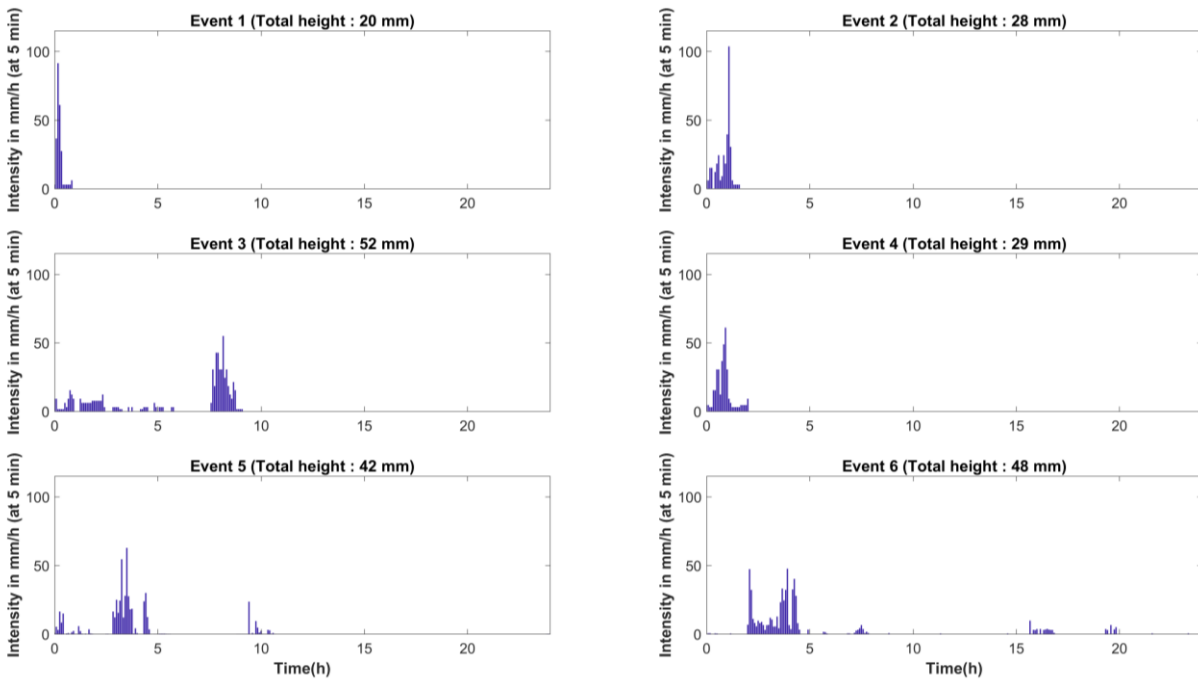


Figure 8-2. Rainfall series (5-min time step) of the six rainfall events used in the analyses

### 8.3.3 Climate change impact

According to Mailhot *et al.* (2007a), the intensity of extreme rainfall events of durations ranging from 1 to 24 h for less than 20-year return periods could increase by 15% in the future (2041-2070) compared to the current period (1961-1990) in southern Quebec. These results were obtained based on CRCM (Canadian Regional Climate Model) simulations for the SRES A2 scenario (Christensen *et al.*, 2007). More recently and for the same region, Mailhot *et al.* (2012) showed that the intensity of maximum annual precipitation for 6-, 12-, 24-, 72-, and 120-h durations and for 2-, 6-, 10-, and 20-year return periods (simulated by several regional climate models, driven by different global models and considering historic greenhouse gas concentrations for historical climate and the SRES A2 scenario for future periods) should increase by 10% to 20% between past (1968-2000) and future (2041-2070) periods.

Based on these conclusions, an increase of 15% in intensity over the next 25 years was chosen for the six selected SOREs. The rainfall intensity at each 5-min time step of the SOREs was multiplied by a factor to construct rainfall events representing the future climate. It was assumed that this factor varies linearly over the coming 25 years, so the future rainfall intensities were computed with:

$$I(t) = I_0 + (I_k - I_0) \frac{t - t_0}{t_k - t_0} \quad (8-1)$$

where  $I(t)$  = rainfall intensity at year  $t$ ,  $I_0$  = rainfall intensity at year  $t_0$  (reference period; original SORE),  $I_k$  = rainfall intensity at year  $t_k$  ( $I_k = 1.15 I_0$  in our case), and  $t_k$  = year of climate forecasts ( $t_k - t_0 = 25$  years in our case).

The hypothesis of linearity of the evolution of rain intensities over time for the same return period has been already adopted by Mailhot and Duchesne (2010). Moreover, the linearity hypothesis can be justified because the planning horizon is relatively short compared with the time scale over which the signal of CC will emerge.

#### **8.3.4 Method to assess the current and future hydraulic performance of sewer pipes**

As mentioned, hydraulic performance refers to the pipes' capacity to fulfill their role of draining stormwater from an event with a given return period without any backup or flooding. Pipe surcharge generally has an impact on upstream flow, raising the hydraulic grade line. Beyond a critical level, the rise of the hydraulic grade line can cause backups in basements and, eventually, flooding at the surface.

The proposed method identifies the constraining pipes that are responsible for hydraulic dysfunction (HDSf) in the network, for a specific rain event, through three main steps.

*Step 1: Localization of all HDSf in the network, based on the SWMM hydraulic simulation results.* As shown in Figure 8-3, an HDSf occurs when the water height at a node exceeds the crown level of the neighboring downstream pipe.

*Step 2: Delimitation of a perimeter of influence (PI) for each detected dysfunction.* A PI is defined as the set of adjacent surcharged pipes. Each PI stops at the first upstream and downstream nodes that are not surcharged, as shown in Figure 8-3.

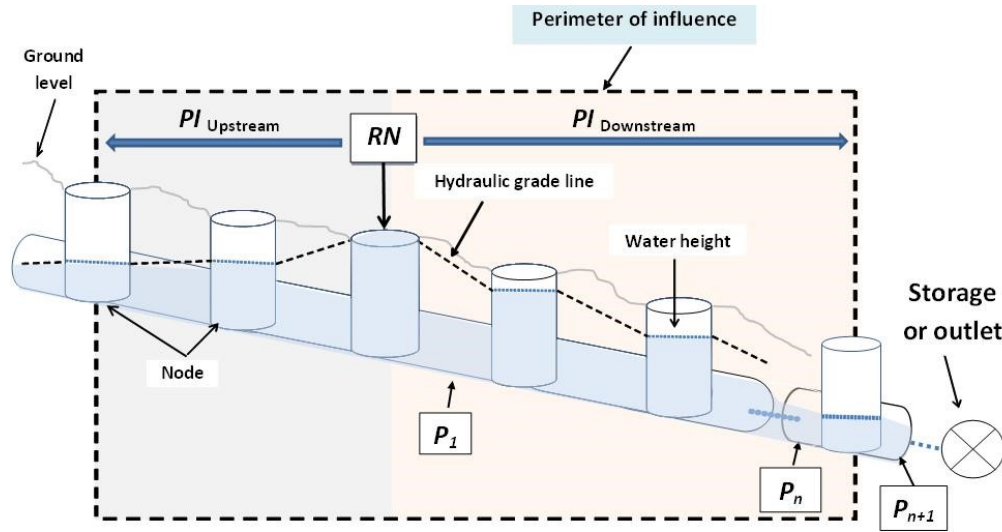


Figure 8-3. Perimeter of influence of hydraulic dysfunctions

Step 3 (Figure 8-4): Identification of the pipe(s) that are responsible for the hydraulic dysfunctions in each PI.

- i. A reference node (RN) is first identified (Figure 8-4, Block 1) as well as the pipes that *could* be responsible for the HDsf in the studied PI (referred here as “potentially constraining pipes,” PCPs). As shown in Figure 8-3, RN corresponds to the node with the highest water level in the PI. PCPs are necessarily located downstream of the RN (as shown in Figure 8-3,  $PCP = \{P_1; P_2; \dots; P_n\}$ , ordered from upstream to downstream, where  $P_n$  is the pipe located at the downstream end of PI, and  $P_1$  is the pipe immediately downstream of RN). In the proposed method, a matrix containing all possible combinations of potentially constraining pipes ( $M\_PCP$ ) is first constructed (Figure 8-4, Block 1). The number of rows ( $n$ ) in  $M\_PCP$  equals the number of pipes in PCP.

$$M\_PCP = \begin{bmatrix} P_1 & \cdot & \cdot & P_{n-2} & P_{n-1} & P_n \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n-2} & P_{n-1} & P_n & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n-1} & P_n & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_n & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

- ii. Starting with PCP, the pipes that are responsible for the HDsf in PI (the constraining pipes) are identified (Figure 8-4, Block 2). This is done in a loop, for which, during each iteration, the pipes that are analyzed to determine whether they are constraining are called the evaluated pipes, EP. As shown in Figure 8-4, for the first

iteration,  $EP = \{P_n\}$  (the most downstream pipe in  $PI$ ), i.e., the last row in  $M\_PCP$ , and then, if required, the identification of the constraining pipes is performed for each row of  $M\_PCP$  in decreasing order. To estimate whether the  $EP$  are constraining, all their respective hydraulic capacities (diameters) are progressively increased until the dysfunction disappears or until the diameter of the smallest pipe immediately downstream of  $P_n$  ( $P_{n+1}$ ) is reached. When the dysfunction disappears after increasing the diameter of the pipe(s) in  $EP$ , without reaching the diameter of the pipe downstream of  $P_n$ , these pipes are identified as constraining, i.e., responsible for the HDsf (Figure 8-4, Block 2-a). In the opposite case (Figure 8-4, Block 2-b), i.e., if the diameter of the pipe downstream of  $P_n$  is reached and a surcharge still subsists, pipes in  $EP$  are considered not to be the sole constraining pipes for the HDsf, and the pipes in the preceding row in  $M\_PCP$  ( $EP = M\_PCP_{n-1}$ ) are considered. This process is repeated until the dysfunction disappears or until the first row of  $M\_PCP$  is reached ( $EP = M\_PCP_1 = \{P_1; \dots; P_{n-1}; P_n\}$ ). When the HDsf persists despite increasing the diameter of all pipes in  $M\_PCP_1$  (Figure 8-4, Block 2-c),  $PCP$  is expanded to contain  $P_{n+1}$ , the pipe downstream of  $P_n$ , which becomes the last pipe of the new  $PCP$  (new  $P_n$ ). If one or more pipes downstream of the new  $P_n$  have the same diameter as this new  $P_n$ , these pipes ( $P_{DW}$  in Figure 8-4: vector of a whole series of pipes downstream of the new  $P_n$  having the same diameter as  $P_n$ ) are included in the new  $PCP$ , and the most downstream pipe of  $P_{DW}$  becomes the new  $P_n$ . The identification of constraining pipes is then carried out using the new  $PCP$ . In the case  $P_{n+1}$  is an outlet or storage pipe, no pipe is identified as constraining for the HDsf in the  $PI$  (Figure 8-4, Block 2-d).

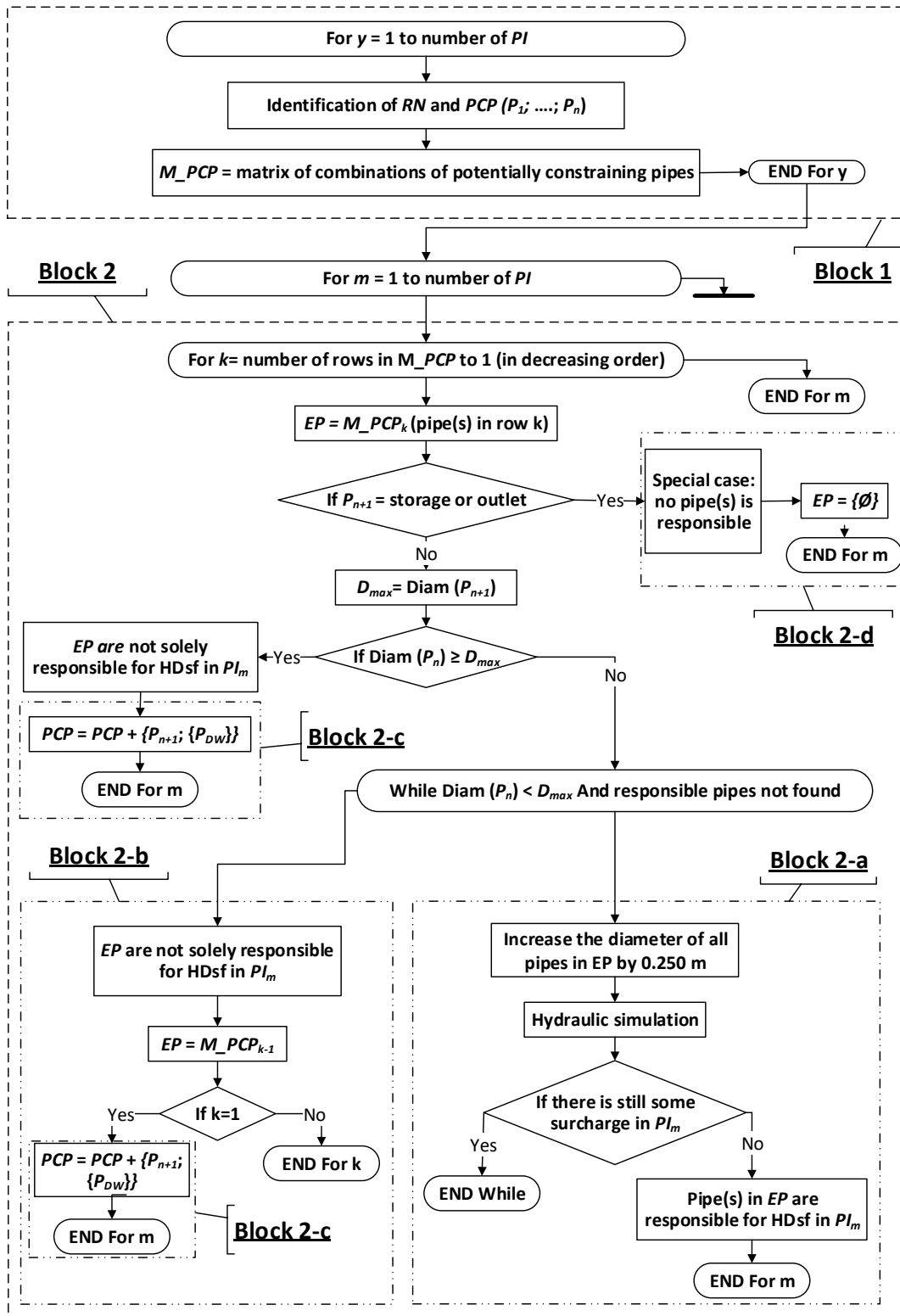


Figure 8-4. Method for identifying the pipes responsible for a hydraulic dysfunction (constraining pipes)

The projected change in hydraulic performance caused by CC was simulated for each selected SORE (Table 8-1 and Figure 8-2) at regular intervals of five years, as shown in Figure 8-5. Five-year intervals were chosen, as that interval is characteristic of the period generally considered by networks managers for carrying out priority interventions (see MAMROT, 2013).

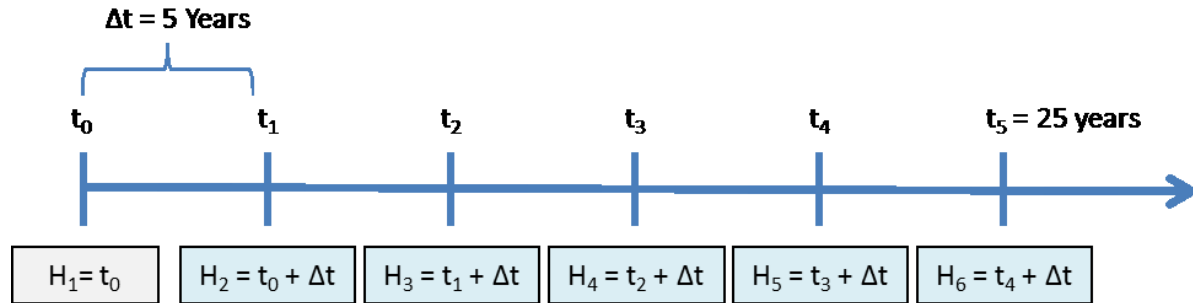


Figure 8-5. Horizons for the evaluation of the hydraulic performance in the context of CC

At each time step, Equation 8-1 is used to modify the rainfall intensities to obtain events corresponding to each of the six time horizons, from the first or current horizon ( $H_1$ ) to the last one ( $H_6$ ), 25 years later, and the constraining pipes are identified for each of these horizons.

#### 8.4. Results and discussion

Using the selected SOREs, the proportions of surcharged nodes (SNs) and those that are at risk of flooding (NRFs, i.e., for which the maximum water level is less than 1 m below the ground level) in Networks A and B in their current state (i.e., without any modification in their pipes' diameters) are given in Table 8-2 for the first and last horizons. Table 8-2 shows that increasing rainfall intensities over the time horizons, from  $H_1$  to  $H_6$ , leads to increases in the proportion of SNs and NRFs. According to the results in Table 8-2, the proportions of nodes that are currently ( $H_1$ ) surcharged or at risk of flooding vary slightly (from 1% to 7%) from one event to the other for Network A, but strongly depend on the event for Network B. These differences could be caused by the varying density of nodes in different parts of the networks (e.g., many nodes in areas that become surcharged for some events, but are not for the others). For Networks A and B, a Spearman rank correlation test (Sheskin 2003) showed no relationship between these three SORE characteristics — i) duration, ii) maximal intensity over 5 min ( $I_{max\_5min}$ ), and iii) total height — and the proportions of SN, NRF, and total length of constraining pipes (TLCP) for the six events. The same result is obtained

for the six horizons, except for the fifth one, where a possible dependency is obtained between event duration and the proportion of TLCP.

**Table 8-2. Proportion of surcharged nodes and nodes at risk of flooding in Networks A and B for the six selected rainfall events and the short-term (H1) and long-term (H6) horizons**

| Events | Network A                               |                |                                                   |                | Network B                               |                |                                                         |                |
|--------|-----------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|----------------|
|        | Proportion of surcharged nodes - SN (%) |                | Proportion of nodes at risk of flooding - NRF (%) |                | Proportion of surcharged nodes - SN (%) |                | Proportion of nodes at risk of flooding nodes - NRF (%) |                |
|        | H <sub>1</sub>                          | H <sub>6</sub> | H <sub>1</sub>                                    | H <sub>6</sub> | H <sub>1</sub>                          | H <sub>6</sub> | H <sub>1</sub>                                          | H <sub>6</sub> |
| 1      | 6                                       | 8              | 3                                                 | 4              | 11                                      | 20             | 3                                                       | 7              |
| 2      | 7                                       | 9              | 3                                                 | 5              | 20                                      | 43             | 7                                                       | 24             |
| 3      | 5                                       | 10             | 2                                                 | 7              | 57                                      | 85             | 28                                                      | 71             |
| 4      | 4                                       | 6              | 2                                                 | 4              | 10                                      | 18             | 2                                                       | 4              |
| 5      | 3                                       | 5              | 1                                                 | 2              | 7                                       | 16             | 2                                                       | 3              |
| 6      | 2                                       | 3              | 1                                                 | 1              | 9                                       | 34             | 2                                                       | 11             |

When applied to Networks A and B, the proposed method (see Figure 8-4) identified the constraining pipes that are responsible of each surcharge, either in current or in future conditions. These pipes have an insufficient hydraulic capacity, and the presented method proposes the required pipe diameters to ensure free surface flow in the entire network for the selected six SOREs (recurrence less than five years).

Figure 8-6 shows how constraining pipes are identified for some HDsf in Network A, for the first horizon (H<sub>1</sub>), and for Event 1. In this example, as for the other events and horizons, the SNs are first grouped by *PI*, represented by green polygons in Figure 8-6. Then the constraining pipes for each *PI* are identified (red pipes in Figure 8-6). The constraining pipes can be identified either: i) during the first iteration of the method (see Figure 8-4) (in this case the constraining pipes are in the vicinity of the SN) or ii) after the increase of the diameters of some other pipes located downstream of the SN. Therefore, no surcharge is illustrated in Figure 8-6 close to some of the constraining pipes.

As illustrated in Figure 8-6, one single pipe can be responsible (constraining) for a surcharge area including several nodes and pipes, such as in Case 1. Case 2 (Figure 8-6) gives an example of pipes that were considered constraining, even if they were not located in the surcharge zone (*PI*), because their diameter is the same as the diameter of the most downstream pipe in the *PI*, and, thus, their diameter needs to be increased to eliminate the HDsf in this *PI*. Figure 8-6 also shows an example of



an HDsf located upstream of an outlet or storage (Case 3), which is considered a special case where the surcharge is allowed and does not require any modification in the network.

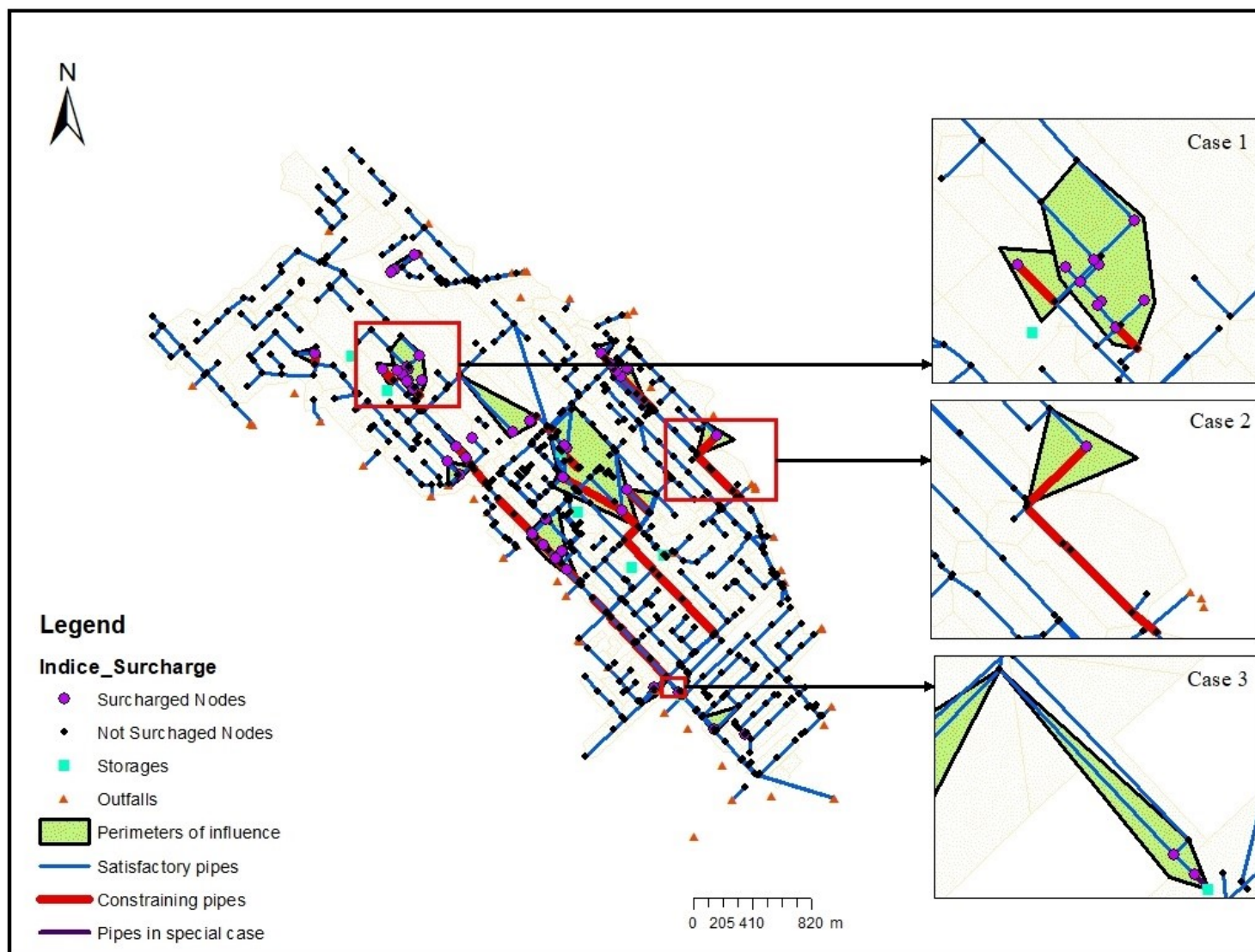


Figure 8-6. Identified constraining pipes for HDsf caused by Event 1 at the first horizon (H1) in Network A

Table 8-3 gives an example of some of the constraining pipes, their current diameters, and the proposed diameters to eliminate the HDsf, for the six considered horizons of the most problematic events (MPEs, which cause the largest number of surcharges) for Networks A and B, namely, Events 2 and 3, respectively. Network A is characterized by smaller and more impermeable subcatchments than Network B. This may explain why: 1) Network A is more sensitive to Event 2, which has the highest maximal intensity over 5 min and occurs over a shorter duration (in this case, runoff is quicker and more important), and 2) surcharges in Network B are more important for Event 3, which generates the largest volume and lasts longer (in this case, surcharges are more sensitive to soil saturation).

In Network A in its current form (no pipes replaced), from 10% to 12% of the total length of pipes was identified as constraining, or responsible, for the HDsf (and, thus, would eventually need to be replaced by larger pipes) between  $H_1$  and  $H_6$  of the MPE (Event 2, see Figure 8-7a). For Network B, 14% to 23% of the total length of pipes (with diameter between 150 mm and 3.5 m) has an insufficient hydraulic capacity (Event 3, Figure 8-7b). The samples of pipes presented in Table 8-3 cover a wide range of diameters and give only some examples of pipes that become constraining with time. Some pipes have an insufficient current ( $H_1$ ) hydraulic capacity, such as pipes UNI\_154697 and 70820 of Network A and B, respectively, while others will be constraining only at the sixth horizon, such as the pipes PLU\_1062127 (Network A) and 108287 (Network B). In some cases, one or more pipes can be identified as being constraining at a given horizon and not at following time horizons (e.g., pipe DOM\_153912 of Network A and 70821 of Network B). Moreover, some of the identified constraining pipes require less hydraulic capacity at future horizons than at earlier ones (e.g., pipe 70820 in Network B). These last two situations can be explained by the fact that constraining pipes located downstream of the initial ones may be identified when rainfall intensity is increased at future time horizons. These increases can result in surcharges farther downstream of initially considered constraining pipes. Increasing the hydraulic capacity of downstream pipes therefore eliminates the surcharges in the most upstream pipes.

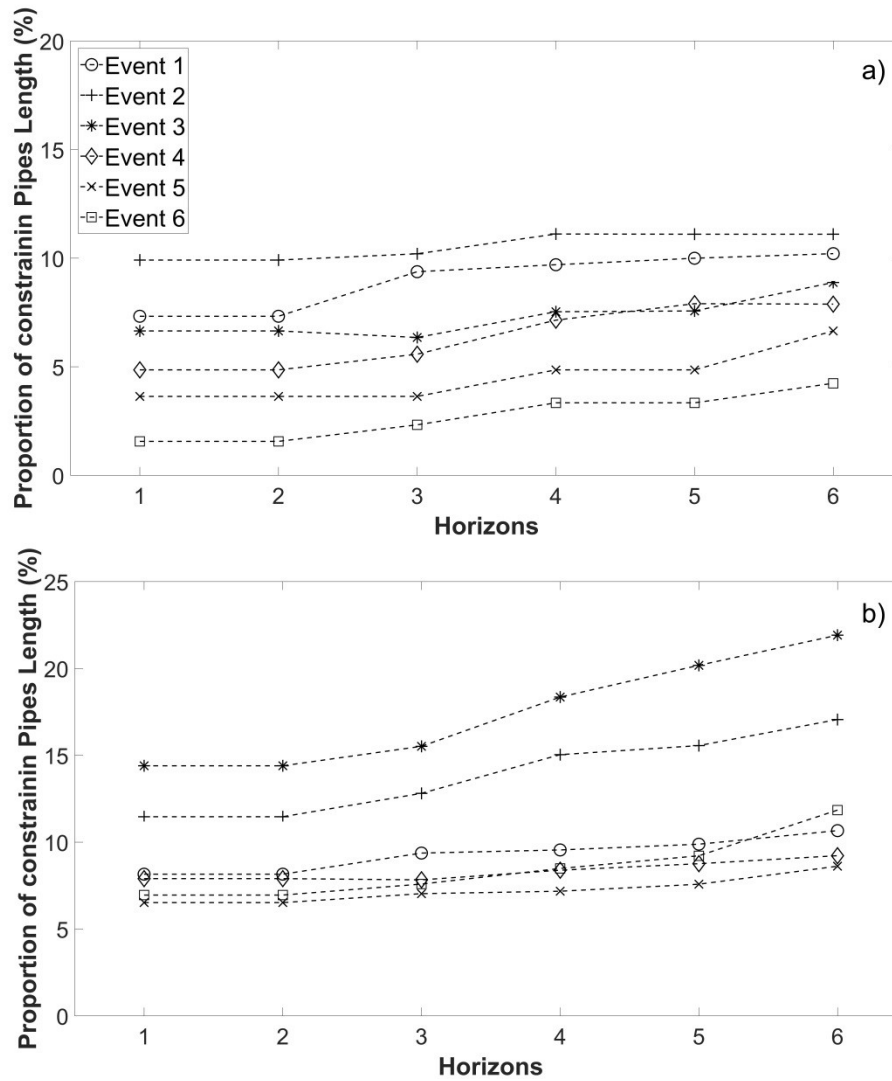
In both networks, the diameter of constraining pipes can be slightly or greatly upgraded, depending on rainfall events. The upgraded diameter can, in some cases, be more than four times the current one, as for pipe PLU\_296060 in Network A, or slightly larger, as for pipe UNI\_157023 in Network A. Moreover, the proposed diameters might not change, in some cases, over the six horizons (from  $H_1$

to  $H_6$ ); on the contrary, they may increase with the increase in rainfall intensity for some horizons (e.g., pipe 70947 in Network B).

**Table 8-3. Partial list of constraining pipes with their current and upgraded diameters for the six horizons for Network A (Event 2) and for Network B (Event 3) (~ means that the current diameter is adequate)**

| Network | Event | Pipe name   | Current diameter (m) | Proposed diameter (m) |                |                |                |                |                |
|---------|-------|-------------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         |       |             |                      | H <sub>1</sub>        | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> | H <sub>5</sub> | H <sub>6</sub> |
| A       | 2     | PLU_1062127 | 0.900                | ~                     | ~              | ~              | ~              | ~              | 1.000          |
|         |       | UNI_154189  | 0.300                | ~                     | ~              | ~              | 0.375          | 0.375          | 0.375          |
|         |       | UNI_157023  | 0.200                | ~                     | ~              | 0.250          | 0.250          | 0.250          | 0.250          |
|         |       | PLU_33940a  | 0.375                | ~                     | 0.625          | 0.625          | 0.625          | 0.625          | 0.625          |
|         |       | UNI_154697  | 0.450                | 0.600                 | 0.600          | 0.750          | 0.600          | 0.600          | 0.600          |
|         |       | PLU_296060  | 0.200                | 0.950                 | 0.950          | 0.950          | 0.950          | 0.950          | ~              |
|         |       | DOM_153912  | 0.600                | ~                     | ~              | 0.750          | ~              | ~              | ~              |
|         |       | DOM_157235  | 0.250                | 0.375                 | ~              | ~              | 0.375          | 0.375          | ~              |
|         |       | 108287      | 1.350                | ~                     | ~              | ~              | ~              | ~              | 1.600          |
|         |       | 70737       | 0.525                | ~                     | ~              | ~              | ~              | 1.150          | 1.150          |
| B       | 3     | 70744       | 0.600                | ~                     | ~              | ~              | 2.050          | 1.150          | 1.150          |
|         |       | 73138       | 1.200                | ~                     | ~              | 1.600          | 1.450          | 1.450          | 1.450          |
|         |       | 71362       | 2.850                | ~                     | 3.350          | 3.350          | 3.100          | 3.350          | 3.350          |
|         |       | 70821       | 0.375                | ~                     | 0.700          | ~              | 0.700          | ~              | 0.625          |
|         |       | 70820       | 0.300                | 0.375                 | 0.700          | 0.375          | 0.700          | 0.375          | 0.625          |
|         |       | 70947       | 0.450                | 0.950                 | 0.950          | 0.950          | 1.200          | 1.450          | 1.450          |

Figure 8-7 shows the evolution of the proportion of constraining pipes over the six horizons and for the six events. According to this figure and to the results in Table 8-2, the first three events (1, 2, and 3) are those that cause the largest number of surcharges, either in Network A or Network B. The first two events are characterized by the highest  $I_{max\_5min}$ , and the largest part of their total height occurs over a short period (from 1.0 h to 1.5 h, see Figure 8-2). As for Event 3, it has the highest total height.



**Figure 8-7. Proportion of total length constraining pipes for the six events and over the six horizons for Networks A (a) and B (b)**

Likewise, for both networks, there is an obvious increase in the proportions of SN and NRF, and, consequently, in proportions of TLCP, with increasing rainfall intensity, i.e., from  $H_1$  to  $H_6$ . In the case of Network A, these proportions, as well as their evolution in time, are slightly different from one SORE to the other. Regarding the proportion of TLCP, despite the largest increase for the last three SOREs, one can see higher proportions for the first three events in Network A. For this network, the proportion of TLCP increases by 25% (reaching 12%) for the MPE between  $H_1$  and  $H_6$ . In the case of Network B, still for the MPE, this proportion of TLCP increases by 61% from  $H_1$  to  $H_6$ . Constraining pipes represent 23% of the total length of pipes at the sixth horizon in Network B, which is almost double that of Network A. This is because Network B is highly surcharged, even in the current climate ( $H_1$ ). Thus, even a small increase in rainfall intensity leads to a sharp increase in the proportions of SN

and TLCP. The recorded variability in the proportions of SN, NRF, and TLCP as a function of SORE could be explained by the variability in these event distributions.

Figures 8-8 and 8-9 give the locations of constraining pipes in Networks A and B for the first and sixth horizons using the MPE for each network.

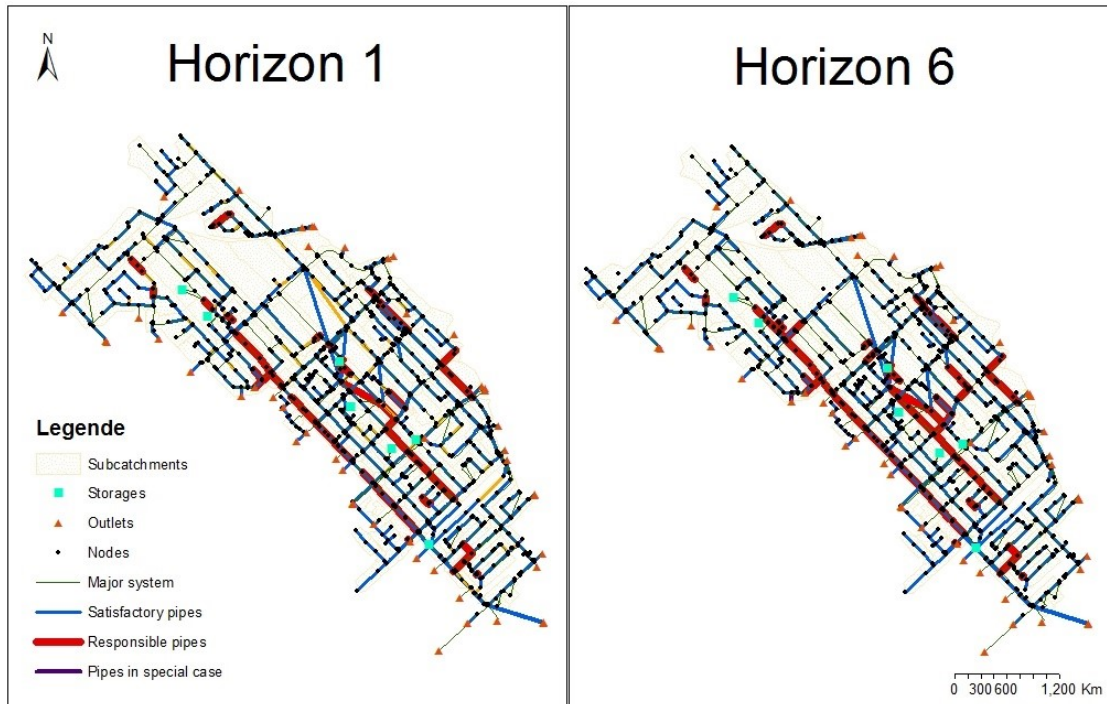


Figure 8-8. Identified constraining pipes (in red) for the first and the sixth horizons using Event 2 for Network A

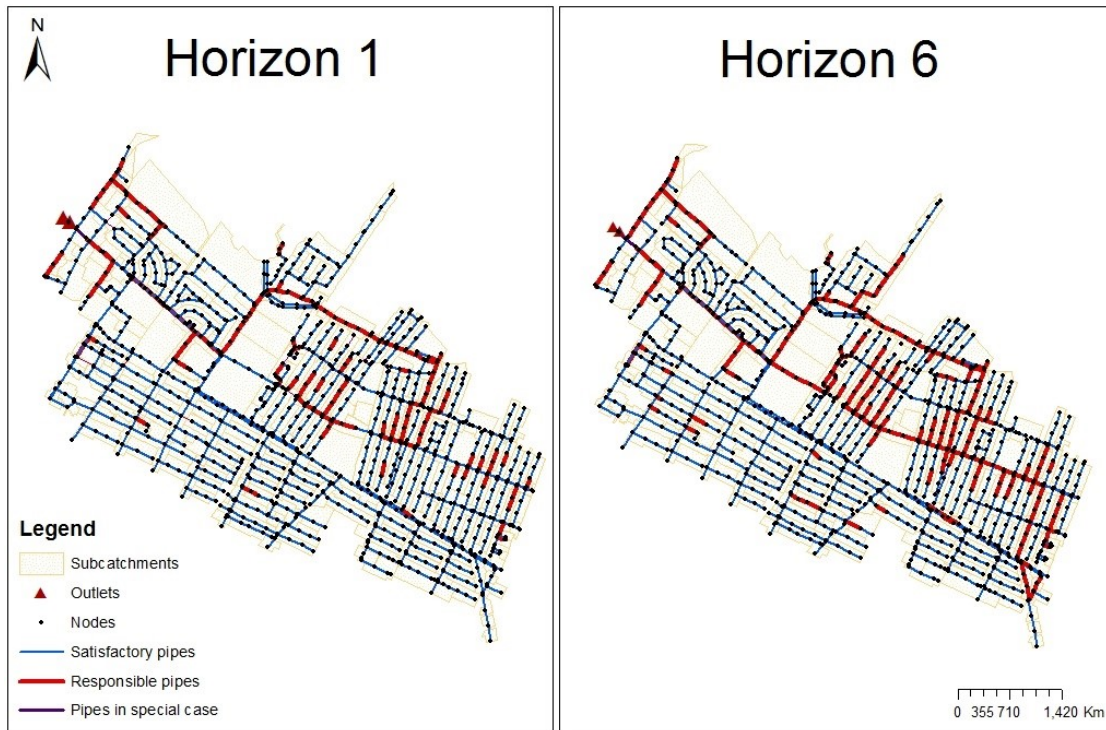


Figure 8-9. Identified constraining pipes (in red) for the first and the sixth horizons using Event 3 for Network B

Given the variability of results between each SORE, constraining pipes obtained with the MPE (Event 2 for Network A and Event 3 for Network B) were first considered to identify the pipes to be replaced in Networks A and B. Afterward, it was verified whether the replacement of these pipes led to the elimination of all surcharge problems with the five other events and for all six time horizons. For Network A, three additional constraining pipes had to be added to those determined with the MPE, whereas, for Network B, the replacement of the constraining pipes determined with the MPE was sufficient to eliminate all surcharges with the six SOREs and the six time horizons.

## 8.5 . Conclusion

In this research, a novel method was proposed to assess and predict the hydraulic performance of individual sewer pipes in current and future climates. This method is based on hydraulic and hydrologic modeling with single observed extreme events, representing a specified design recurrence (from two to five years in this case) and a wide range of durations, time distributions, and intensities. The proposed method consists of locating hydraulic dysfunctions, isolating them, and identifying the pipe or pipes that are constraining for these dysfunctions. The identification of the

constraining pipes was carried out by increasing their hydraulic capacity until the dysfunction disappeared. The evolution in time of the sewer pipes' hydraulic performance was simulated by increasing the intensity of the rainfall events used as inputs for the simulations. This method was applied to two different areas of Canadian sewer systems. In both cases, the proposed method made it possible to: 1) identify the constraining pipe(s) for the hydraulic dysfunctions caused by rainfall events representing each evaluated horizon and 2) propose the required diameters to maintain an acceptable level of service for the studied networks. This application showed that Networks A and B reacted differently to the same events. More surcharges and pipes to be replaced were identified for Network B, even for less intense events. This network is also the one that is the most sensitive to CC, because it is already highly surcharged under current climate conditions. Moreover, Network B is more sensitive to events having larger total heights, while Network A is more sensitive to events with the higher maximal intensities over 5 min. These variations of results for the two studied networks and between rainfall events show the importance of considering various rainfall events for the design and analysis of drainage networks, either under current climate or in a CC context.

The presented method, steps detailed in Figure 8-4, is automated and can be easily applied to other and different types of networks using any desired input rainfall to predict the individual pipes' hydraulic performance over time, making it a useful tool for planning of drainage network renewal. Future work will show how the simultaneous consideration of structural and hydraulic deterioration processes, as well as the integration of different adaptation measures (installation of best management practices, replacement of pipes, retrofitting, etc.), makes it possible to reduce the total costs of renewal interventions while improving the overall performance of sewer networks.

## **Acknowledgements**

The authors wish to thank the two municipalities for providing the SWMM networks model used in this study. The authors are also grateful to Guillaume Talbot for his help in programming.





## **9 Article III: Integrated renewal planning for sewer networks in a climate change context**

—

Planification intégrée du renouvellement des conduites d'égout dans un contexte de  
changement climatique

---

### **Auteurs:**

Hind El-Housni<sup>1</sup>, Sophie Duchesne<sup>1</sup>, Xavier Chartrand<sup>1</sup> and Alain Mailhot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: INRS-ETE, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9, Canada

### **Revue:**

L'article est prêt à soumettre au *Journal of Water Resources Planning and Management*, *Journal of Hydrologic Engineering*, ou *Urban Water Journal*

### **Contribution des auteurs**

L'élaboration de la méthodologie de planification du renouvellement a été réalisée par la candidate au doctorat Hind El-Housni sous la supervision de la Pre Sophie Duchesne. L'élaboration de l'algorithme et sa traduction en langage de programmation informatique, Matlab, ont été réalisées par la candidate au doctorat Hind El-Housni. La programmation informatique d'une partie de l'algorithme de l'ajout de mesure de contrôle à la source au réseau d'égout a été réalisée par le stagiaire Xavier Chartrand sous la supervision de la candidate Hind El-Housni. Cette partie a été révisée par la candidate. La vérification et l'interprétation des résultats ainsi que la rédaction de l'article scientifique ont été réalisées par la candidate au doctorat. La révision de l'article ainsi que la supervision de l'ensemble des étapes citées précédemment ont été réalisées par la Pre Sophie Duchesne.



## Résumé

Dans cette étude, une méthode de planification intégrée du renouvellement (PIR) des conduites d'égout est proposée. Cette méthode de planification repose sur la modélisation simultanée des performances structurale et hydraulique dans un contexte de changement climatique (CC). Elle comprend la sélection et la planification des meilleures options de renouvellement parmi le remplacement des conduites et l'installation de mesures de contrôle à la source (CS), ou les deux. Cela dans le but de maintenir un niveau de performance structurale et hydraulique acceptable du réseau sur une période de 25 ans au moindre coût. La modélisation de la performance hydraulique est basée sur des simulations hydrologiques/hydrauliques utilisant le modèle de gestion des eaux pluviales SWMM et un événement de pluie observé comme intrant. Cette modélisation consiste à : i) isoler les dysfonctionnements hydrauliques, identifier les conduites contraignantes qui en sont responsables et identifier la capacité hydraulique adéquate pour toutes les conduites contraignantes; et/ou ii) identifier l'emplacement et la superficie de pratique de contrôle à la source (PCS) nécessaires pour éliminer ces dysfonctionnements. La modélisation de la performance structurale, quant à elle, est basée sur le modèle de Cox, qui estime le temps de résidence d'une conduite dans un état structural donné en fonction de son âge. La méthode PIR proposée a été appliquée à un réseau d'égout unitaire canadien et ses résultats ont été comparés à ceux d'une approche de renouvellement traditionnelle. L'application de la méthode PIR a permis d'identifier et de localiser tous les dysfonctionnements structuraux et hydrauliques et de choisir l'option de renouvellement la moins chère pour chacun d'entre eux. Pour le réseau d'égout examiné, il a été démontré que l'installation de PCS n'est pas toujours l'option de renouvellement la plus économique. Toutefois, par rapport à l'approche de renouvellement traditionnelle, la méthode PIR réduit de près de la moitié le coût total moyen associé aux options de renouvellement. La méthode proposée, étant automatisée, peut être appliquée à d'autres réseaux d'égout.

**Mots clés :** Planification du renouvellement, Performance structurale, performance hydraulique, PCS, Biorétention, Changement climatique, Gestion des réseaux d'égout

## **Abstract**

In this study, a new integrated renewal planning method (IRPM) is proposed to identify the best interventions and their moment of implantation for effective sewer network management. This planning method is based on simultaneous structural and hydraulic performance modeling under climate change. It comprises selecting and planning the best renewal options, such as pipe replacement, installation of stormwater source control (SSCs) practices, or both, to maintain an acceptable structural and hydraulic performance of the network over 25-years at minimal cost. Hydraulic performance modeling is based on hydrologic/hydraulic (HH) simulations using the Storm Water Management Model (SWMM) and a single observed rainfall event. It consists of the following. First, isolates hydraulic dysfunctions. Second, it identifies: i) the constraining pipes that are responsible for the dysfunctions and the adequate hydraulic capacities for all constraining pipes; and/or ii) the SSC's location and area required to eliminate these dysfunctions. Structural performance modeling is based on a Cox model, which estimates the residence time of an individual pipe in a given structural state according to its age. The proposed IRPM was applied to a Canadian combined sewer network, and the results were compared to those of a more traditional renewal approach. The IRPM application helped identify and locate all structural and hydraulic dysfunctions and choose the least expensive renewal option for each of them. For the examined sewer network, it has been demonstrated that installation of SSCs is not always the economical renewal option. Furthermore, as compared to the traditional renewal approach, the IRPM reduces the mean total cost of the renewal options by almost half. Because the proposed IRPM is automated, it could be applied to various other sewer networks in the future.

**Key Words:** renewal planning, structural performance, hydraulic performance, SSC, bioretention, climate change, sewer network management.

## 9.1 .Introduction

In many parts of the world, underground sewer pipes are becoming increasingly old and maintaining their structural integrity is a major challenge for municipalities, even more so in the context of budget constraints. In addition, most of these infrastructures were designed using historical climate conditions and patterns that were considered stationary. However, in recent decades, several studies have revealed an upward trend in the intensity and frequency of extreme rainfall events in several regions of the world (Westra *et al.*, 2015; IPCC, 2013; Ryu *et al.*, 2014; Shephard *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2005). Furthermore, climate projections reveal increase in precipitation characteristics (Dale *et al.*, 2017; Kendon *et al.*, 2014; Westra *et al.*, 2014; IPCC, 2013; Mailhot *et al.*, 2012). In an urbanizing context, the evolution of rainfall patterns threatens the performance level of sewer pipes from a hydraulic perspective (Westra *et al.*, 2015; IPCC, 2013; Ryu *et al.*, 2014; Shephard *et al.*, 2014; Groisman *et al.*, 2005); consequently, it may accentuate problems related to their structural and/or functional integrity, such as road collapses, sewer backups, floods, and increased volumes of wastewater discharge to receiving environments (Roudier *et al.*, 2016; Ruiter 2012; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Denault *et al.*, 2006). These problems pose a risk to citizen safety, economic development, and the ecosystems quality, forcing responsible authorities to adopt management strategies based on a preventive and integrated approach to better adapt to the projected climate change (CC). Several tools were proposed in previous studies to assist in the planning of sewer pipe networks. Halfawy *et al.* (2006) provided a survey of tools or infrastructure asset management systems used in the 2000s by municipalities in North America based on deterioration modeling, prioritization, and capital planning activities. Among those used for urban sewer networks, we can cite Synergen, CityWorks, MIMS, Hansen, RIVA, Infrastructure 2000, and Harfan (the description each system is given in Halfawy *et al.*, 2006). Authors have qualified most of these systems as reactive, and they do not consider long-term renewal planning. More advanced or proactive tools are also reported in the literature, covering all or a part of the management stages defined by Lemer (2000): 1) data collection and analysis; 2) performance modeling; 3) generation of scenarios and management alternatives; 4) decision analysis; and 5) information management and reporting. The most comprehensive tools are CARE-S (Computer-assisted Rehabilitation of Sewer Networks; Saegrov, 2006), Hydroplan (De Gueldre *et al.*, 2007), AWARE-P (AWARE-P, 2009), and CapPlan Sewer (capital planning tool for sewer system) (Innovyze, 2018). These three previous tools,

used in Europe, are not widely used because of the large amount of data that their implementation requires and their complex architecture. CapPlan also integrates hydraulic performance modeling to prioritize the rehabilitation and replacement of sewer pipes, using decision tree algorithms (Vladeanu and Matthews, 2018; Innovyze, 2018).

Other tools exist that are less complete than the abovementioned ones, such as 1) AQUA-WertMin (Baur and Herz, 2002), which is a tool for planning televisual inspection, rehabilitation, and new constructions of sewer systems based on a survival model to estimate the structural state of pipes over time and on an economic analysis comparing the costs of the rehabilitation strategies; 2) PRISM (Proactive Rehabilitative Infrastructure Sewer Management) developed by Ariaratnam and McLeod (2002) to plan and optimize the allocation of financial resources for the rehabilitation of sewer pipes in Edmonton, Canada; 3) APOGEE (Rommel *et al.*, 1989), which is a tool used in France for the annual planning of operations and rehabilitation of sewer networks that is comparable to PRISM; 4) RERAU (Rehabilitation of Urban Sanitation Networks; Le Gauffre *et al.*, 2004) and INDIGAU (Performance Indicators for Heritage Management of Urban Sanitation Networks, Le Gauffre *et al.*, 2010), which are tools that aim at defining inspection and rehabilitation priorities for pipe sections based on hydraulic and structural performance indicators (Ibrahim, 2008); and 5) other equivalent tools such as the Ben Tagherouit model (Ben Tagherouit *et al.* 2011) and the Hasegawa model (Hasegawa *et al.*, 1999). One should note that the models mentioned in points 4 and 5 only include data collection, data analysis, and performance modeling.

Other tools are based on optimization approaches using either: 1) evolutionary algorithms and genetic algorithms (Halfawy *et al.*, 2008 and 2009; Vojinovic *et al.*, 2014; Yazdi *et al.*, 2017a and 2017b; Yazdi, 2018; Diogo, 2018); 2) resilience-based approaches (Mohammadiun *et al.*, 2018); 3) stochastic approaches (Van Riel, 2017; Mohammadiun *et al.*, 2018); or 4) machine learning (Baah *et al.*, 2015).

Most of the previous renewal tools exclusively proposed the replacement or repair of problematic pipes (e.g. Yazdi *et al.*, 2017a and 2017b). There are, however, other tools using stormwater source control (SSCs) measures, such as bioretention, permeable pavement, green roofs, infiltration trenches, vegetated swales, and retention ponds, to improve the overall hydraulic performance of stormwater networks (e.g. Buckland *et al.*, 2015; Winston *et al.*, 2013 and 2016). The enthusiasm for this type of practice is not new and is becoming increasingly valued, with or without consideration of the CC impact, because of their effectiveness in many situations. Indeed, Buckland *et al.* (2015)

showed decreased peak flows and runoff volumes in some urban watersheds of Blacksburg, Virginia, by using bioretention retrofits for a 10-year design storm event. In a previous study of Winston *et al.* (2016), bioretention has shown great potential for runoff volume reduction, even in poorly drained soils, with the inclusion of internal water storage. However, in agreement with other studies (Bhatt, 2017; Davis, 2008; Hatt *et al.*, 2009), Winston *et al.* (2016), pointed to lower capacity of bioretention systems in peak flow mitigation for high volume and high-intensity events.

To minimize the installation cost of SSCs and improve their selection and placement, and to maximize the overall hydraulic performance of sewer networks, some researchers applied optimization methods (Cano and Barkdoll, 2017; Sebti *et al.*, 2015/2016; Yazdi and Neyshabouri, 2014; Perez-Pedini *et al.*, 2005). Cano and Barkdoll (2017) proposed a multi-objective method that included social aspects (probability that the landowners will maintain the SSC), economic factors (SSC cost), and technical factors (knowledge on operation and maintenance) to optimize the selection and location of infiltration trenches, vegetated swales, and retention ponds. Sebti *et al.* (2015) used linear programming optimization to identify the best combination of SSCs combination among retention ponds, infiltration trenches, rain gardens, and green roofs to maintain free-surface flow in the pipes and reduce the frequency of discharges of polluted waters from a combined sewer network. Sebti *et al.* (2015) concluded that the use of SSCs maintains an acceptable level of hydraulic performance of a combined network located in the Greater Montreal region. With similar perspectives, Sebti *et al.* (2016-b) compared linear programming to two other nonlinear optimization methods (genetic algorithm and simulated annealing), which gave different results in terms of combinations of SSCs and total costs. They noted the possibility of combining optimization methods to provide an optimal solution and reduce calculation time, particularly by using the linear programming results as a starting point for the genetic algorithm model.

Despite the use of advanced techniques to improve or even optimize the rehabilitation of sewer systems, none of the tools cited above mutually consider the structural and hydraulic deterioration processes while accounting for the continually evolving climate conditions and the installation of SSCs as alternative or complementary practices to pipe replacement. Indeed, some of them considered only the structural (Baah *et al.*, 2015; Halfawy *et al.*, 2008 and 2009) or hydraulic (Yazdi *et al.*, 2017a and 2017b; Vojinovic *et al.*, 2014) deterioration process, while others considered both processes but without evaluating the impact of CC on the hydraulic performance (Diogo *et al.*, 2018; Mohammadiun *et al.*, 2018; Yazdi, 2018; Halfawy *et al.*, 2008 and 2009). As for the tools evaluating



the use of SSCs to improve the hydraulic performance of stormwater networks, they did not consider the structural deterioration of pipes.

In this context, an original integrated renewal planning method (IRPM) for sewer pipes, which simultaneously considers modeling of the structural state and hydraulic performance deterioration in a CC context, is proposed in this paper. The objective is to verify to which extent the simultaneous consideration of structural and hydraulic deterioration processes in a CC context makes it possible to: i) improve the choice of renewal interventions, ii) reduce the costs associated with them, and iii) improve the overall performance of stormwater networks.

## **9.2 .Materials and methods**

### **9.2.1 Integrated renewal planning method**

The proposed IRPM aims at identifying the economical interventions and their time of implantation to maintain an acceptable level of both the hydraulic and structural performances of the network. It is performed by integrating both structural and hydraulic performance modeling in a CC context. Future performance modeling is conducted over the next 25 years to maintain an acceptable level of accuracy in terms of structural deterioration prediction and CC projections. The IRPM can be repeated at regular intervals of 5 years to: 1) integrate the new knowledge regarding the rainfall regime evolution due to CC; 2) consider the new information on pipe structural conditions; and 3) consider the period generally examined by network managers for carrying out priority interventions (see e.g. MAMROT, 2013). Here, an acceptable level of hydraulic performance is defined as the capacity of the network to convey water flows for a given design rainfall event, representing the current or future conditions, without any pipe surcharge or flooding in the network. Furthermore, an acceptable structural performance is attained when no pipe in the network is in a structural condition state that requires immediate intervention.

As shown in Figure 9-1, the proposed IRPM includes three steps. The first step consists of assessing the current hydraulic and structural performance (HSP) of each pipe in the network. The second is to assess the future HSP of each pipe in a CC context. The final step is the selection and scheduling of the best renewal option, considering the results of the first two steps, based on the cost of interventions and their impact on the current and future HSP of pipes. Interventions can either be pipe replacement (with or without increasing their hydraulic capacity), installation of SSCs, or both.

The chosen intervention options should maintain the structural and hydraulic performances of the network over the 25-year horizon at a minimal cost.

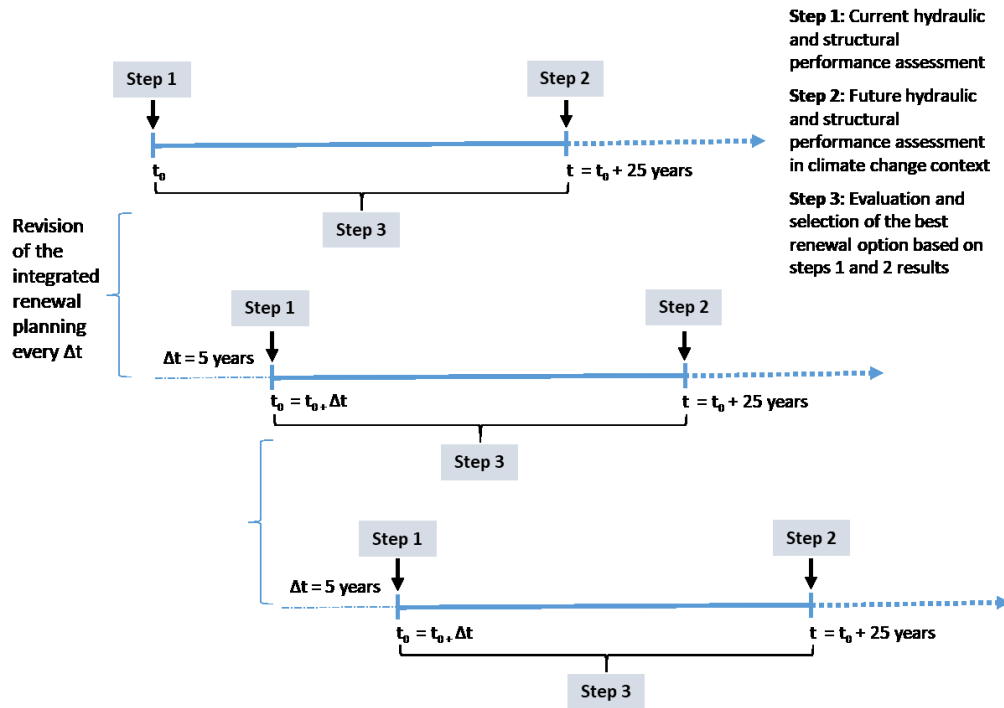


Figure 9-1. Horizons for the prediction of the structural and hydraulic performance and the planning of renewal interventions

### 9.2.2 Hydraulic performance modeling

Hydraulic performance modeling consists of separately identifying 1) pipes that should be replaced (constraining pipes) and their respective diameters; and 2) area and location of SSCs, to avoid any surcharge in the network during the design rainfall event. The pipe(s) identified for replacement and the SSCs identified for installation are subsequently used separately and/or combined in the renewal planning according to their costs.

#### Identification of pipes to be replaced

The method proposed by El Housni *et al.* (2018b) was applied to identify the constraining pipes, i.e., those that should be replaced, and their diameters to avoid surcharges or hydraulic dysfunctions in the network, which occur when the water height at a node exceeds the crown level of the

neighboring downstream pipe. According to this method, constraining pipes are identified through three main steps: 1) localization of all surcharges in the network for the design rainfall event, based on an SWMM (Rossman, 2008) hydraulic simulation; 2) delimitation of surcharge zones (SZ), which group all adjacent surcharged nodes and pipes; and 3) identification of the constraining pipe(s) that are responsible for the surcharges in each SZ and their adequate hydraulic capacity. For each SZ, the identification of the new hydraulic capacity of the constraining pipes is performed by considering all modifications made in the network, according to the other SZs. Further details are given in El Housni *et al.* (2018b).

#### Identification of SSCs locations and numbers

A new method is proposed, as part of the proposed IRPM, to identify the locations and areas of SSCs required to eliminate all pipe surcharges for the design rainfall event. First, all the surcharges for the design rainfall event are localized based on an SWMM simulation. Second, an SZ is delimited for each detected surcharge. Thereafter, the locations and areas of the SSCs required to eliminate surcharge are identified successively and individually for each SZ. This implies that the SSC cells retained for a given SZ are removed from the network during the identification of the other SSC's locations and areas required.

##### **• Location of SSCs**

Subcatchments that may host SSCs that could have a significant impact on the elimination/reduction of surcharges are identified for each SZ by first identifying all subcatchments located upstream of the SZ area. Then the impact of each of these potential host subcatchments is evaluated individually by temporarily adding SSCs that represent up to 20 % of the impervious area of each subcatchment and simulating this virtual situation with SWMM. Only those subcatchments for which adding SSCs reduces the maximal surcharge in the identified SZ by 50 % or more are finally retained as potential host subcatchments (HS). HS are ranked in order of importance, that is, from the one that requires the least SSCs area to the one that needs the most area to obtain the same reduction in the piezometric head at the surcharge location.

##### **• Required SSC area**

After the potential HS are identified, the required areas of SSCs to be added in each HS to eliminate surcharges in the network are computed. This is done by progressively adding SSCs cells to each HS, one at a time according to their order of importance, until the hydraulic dysfunction disappears or

until the SSC area reaches 20 % of the impervious area of the subcatchment. This chosen maximum threshold of the proportion of SSC is considered reasonable so as not to sacrifice the other uses on the subcatchment.

### 9.2.3 Structural state modeling

In a previous study, El Housni *et al.* (2018a) evaluated the significance of some physical and functional factors (age, diameter, length, material and sewer type) in the structural deterioration process of sewer pipes by using a Cox model (survival model) and the likelihood ratio test. They concluded that, for the case study sewer network (the same as here), only the age of the pipes has a statistically significant impact on the structural condition classification of each pipe. A Cox model considering only the age of pipes was thus applied to estimate the residence time in each of four considered structural states. The structural states of pipes of the network were classified based on the observed defects by using the WRc (1994) system on a scale of 0 to 5. For this study, the sewer in condition states 2 and 3, and condition states 4 and 5, were grouped together, giving 4 state classes: 1) first state (state 0 = no structural defect observed); 2) second state (state 1 = only minor structural defects observed); 3) third state (state 2–3 = moderate deterioration); and 4) fourth state (states 4–5 = one or more severe structural defects observed). Only the first three residence times  $t$  are estimated as once a pipe has entered the fourth and final state it will remain in this state until it is replaced or repaired. Consequently, the residence time in the final state does not need to be modeled. The probability density functions (pdf) of the three residence times,  $f_j(t)$ , are expressed by exponential functions (see Duchesne *et al.*, 2013). Consequently, the pdfs of the residence times are expressed as given in Equation 9-1. More details about the model are given in El Housni *et al.* (2018a).

$$f_j(t) = k_j e^{-k_j t} \quad (9-1)$$

where  $t$  = the residence time in structural state  $j$  ( $j$  = first, second or third structural states) and  $k_j$  = the model parameters corresponding to structural state  $j$ .

### 9.2.4 Renewal planning steps

Figures 9-2 and 9-3 give the diagram of the IRPM. At the current horizon ( $t_0$ ) of the IRPM application, the structural state of all pipes of the network should be known. The proposed IRPM is applied to all

pipes in the network sequentially based on their current and future (in 25 years) individual HSPs (estimated as described in sections 9.2.2 and 9.2.3). This allows consideration of all possibilities or types of dysfunction that will occur up to 25 years and identification, considering the future HSP modeling, of the possible renewal options to undertake during the current horizon. Four cases or types of dysfunctions are possible: 1) Case 1: a pipe with insufficient hydraulic capacity (constraining pipe) that is also in the last structural state condition (state 4), both in current conditions; 2) Case 2: a constraining pipe in an adequate structural state under current conditions; 3) Case 3: a pipe in structural condition state 4 with adequate hydraulic performance under current conditions; and 4) Case 4: a pipe with adequate hydraulic and structural performances under current conditions. The evaluation steps and the identification and choice between the possible intervention options in each of the cases are as follows:

- a) Case 1 (pipe with hydraulic and structural deficiencies under current conditions): for the current horizon, inspection results are assumed to be available, while for the future conditions, the structural state of the evaluated pipe (pipe *P*), as well as for other pipes, is predicted using the statistical model presented above. This is necessary as, in Case 1, pipe *P* is a constraining one from a hydraulic point of view, and the intervention option to be adopted should consider, at the same time and in the same manner, all its adjacent constraining pipes belonging to the same SZ. Indeed, as described in El Housni *et al.* (2018b), a pipe may be the sole constraining pipe or be a part of a set of constraining pipes for a given SZ. The intervention options for all pipes in the SZ depend on the hydraulic dysfunction location and on whether or not there is the possibility, of eliminating surcharges in the SZ with SSCs. Three scenarios are possible:
  - First scenario (Block-a in Figure 9-3): Some surcharges can be tolerated in specific locations, e.g., upstream of an outlet or a storage node (El Housni et al., 2018b). In this case, only one option of renewal is considered, which is to replace pipe *P* with the same hydraulic capacity, as this pipe requires emergency intervention because of its poor structural state.
  - Second scenario (block-b in Figure 9-3): This occurs when SSCs alone, with the maximal constraints of 20 % of the impervious area replaced by SSCs on each subcatchment, are not able to eliminate surcharge in the SZ to which *P* belongs. In this case, all constraining pipes in SZ must be replaced with larger ones having a sufficient hydraulic capacity to eliminate surcharges under current and future climates (25 years ahead). The SSC option is not retained in this case.

- Third scenario: This provides two possible renewal options. The first one (Option 1; Block-c1 in Figure 9-3) relies only on pipe replacement to eliminate the hydraulic dysfunctions, while the second option (Option 2; Block-c2 in Figure 9-3) also involves the installation of SSCs. In the second option, pipes to be replaced due to their structural deterioration are replaced by new ones having the same hydraulic capacity (diameter), and the hydraulic performance of the network is upgraded by the installation of SSCs. The locations and areas of SSCs to eliminate surcharges up to future conditions are selected here. The least expensive option between Option 1 and Option 2 is finally chosen.
- b) Case 2 (pipe with hydraulic deficiency but in an adequate structural state under current conditions): In this case, the first, second, and third scenarios stated above for Case 1 can be encountered. For the third scenario, the future structural state of all constraining pipes in the *SZ* to which *P* belongs is predicted up to future conditions by using the deterioration model. If no structural deficiency is predicted in an *SZ* in the future, then Option 2 consists of only the installation of SSCs (Block-c3 in Figure 9-3). Otherwise, Option 2 involves the combination of pipe replacement and SSCs installation (Block-c2 in Figure 9-3).
- c) Case 3 (pipe with current structural deficiency but no hydraulic deficiency under current conditions): In this case, the future hydraulic performance of *P* is evaluated up to 25 years. If no hydraulic deficiency is predicted in future conditions, then pipe *P* is replaced by a new one having the same diameter (Block-a in Figure 9-3). Otherwise, the same options as those described for Case 1 are considered.

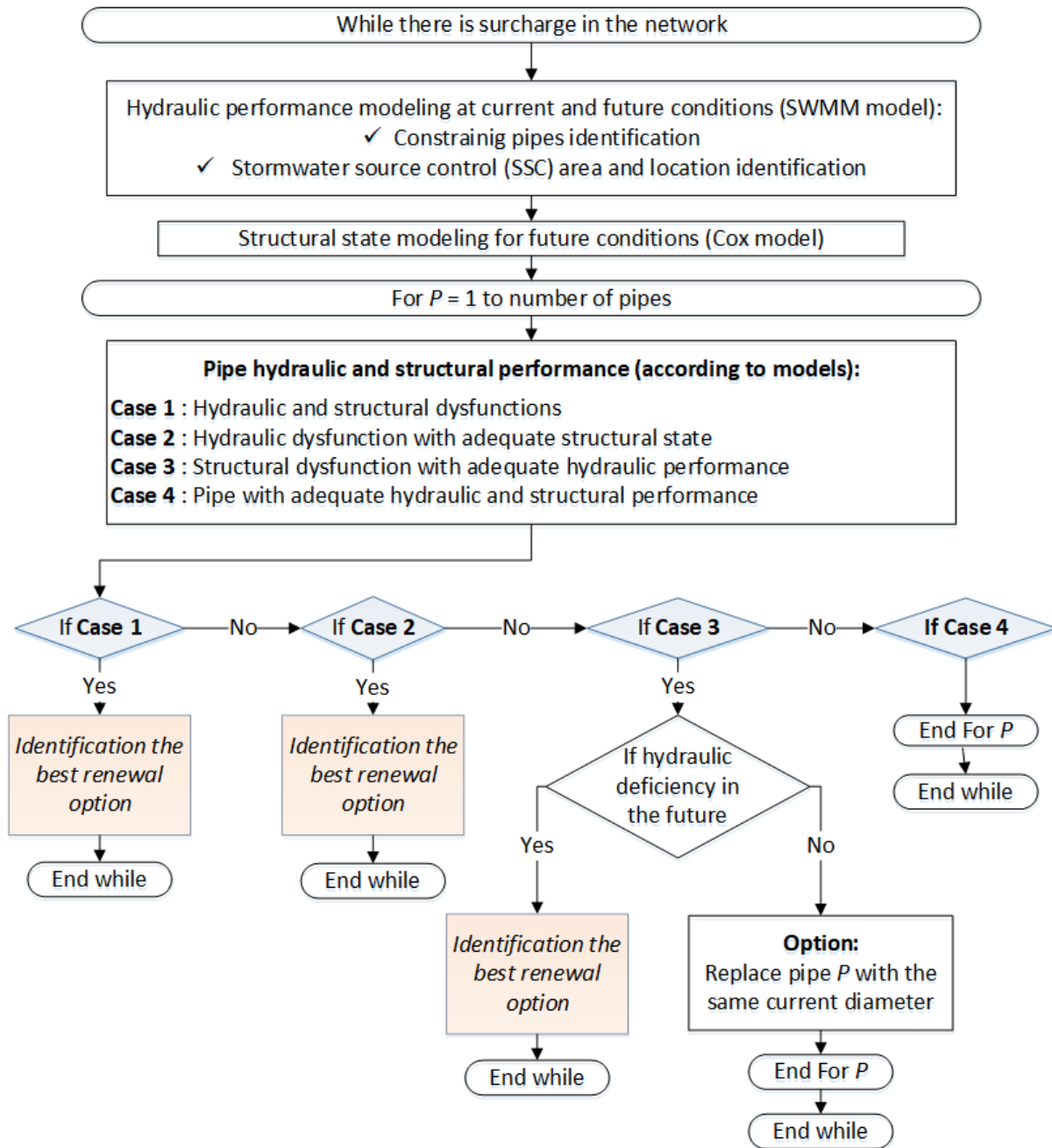


Figure 9-2. Diagram showing the methodology used and the steps considered in the proposed integrated sewer renewal planning

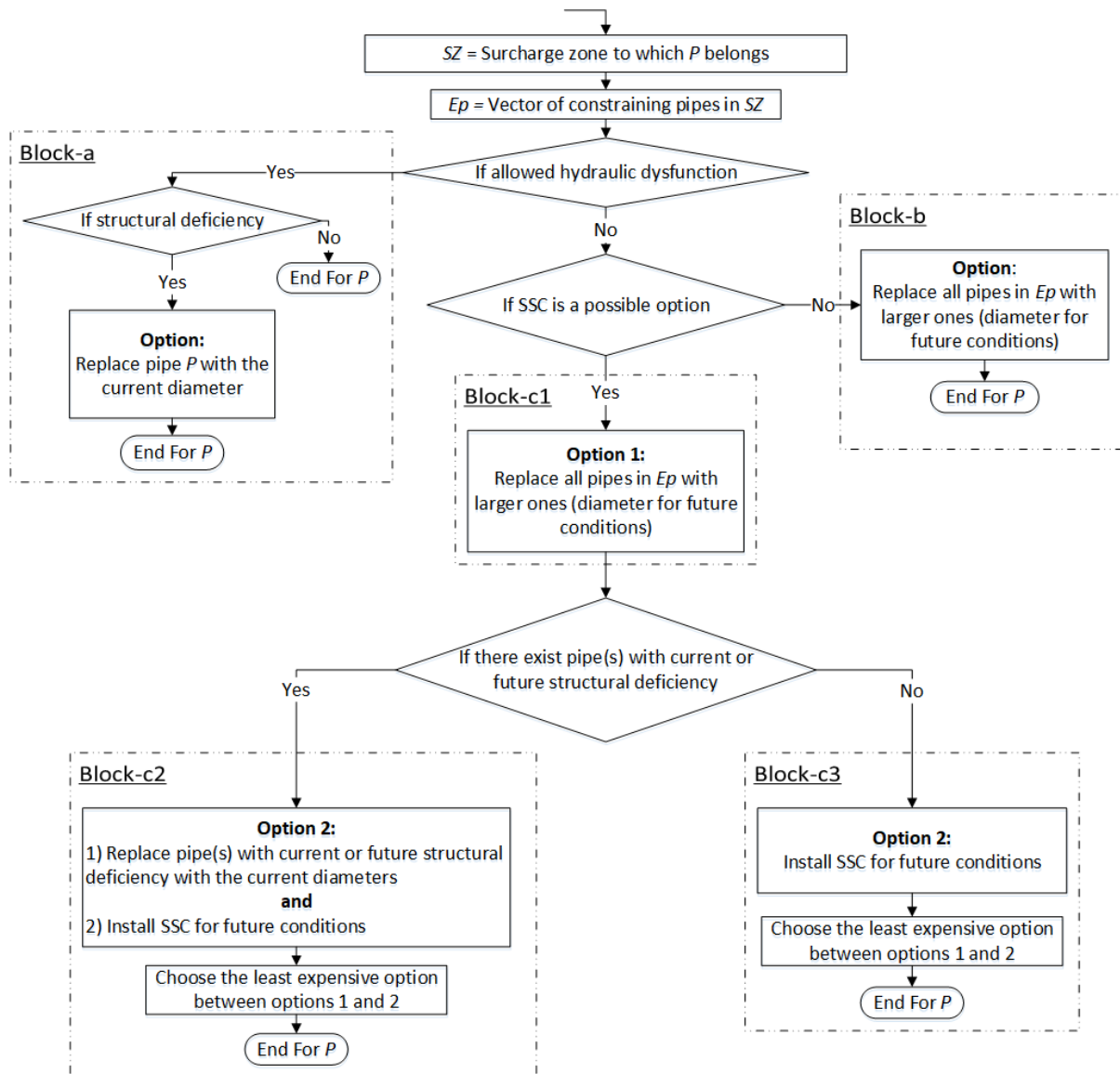


Figure 9-3. Diagram of the steps to identify the best renewal option in Figure 9-2

### 9.2.5 Renewal planning performance and usefulness evaluation

The proposed IRPM should: i) improve the choice of renewal interventions, ii) reduce the associated costs, and iii) improve the overall performance of stormwater networks. To verify these assumptions and evaluate the IRPM performance, costs for the IRPM application are compared with those for the traditional reactive approach. The latter is considered by several researchers as unsafe and non-optimal from an economic point of view (e.g., Ana and Bauwens, 2010; Wirahadikusumah, 2001). The traditional approach consists of emergency replacement of pipes currently having severe



structural or hydraulic performance deterioration. In this case, the structural and hydraulic deterioration processes are considered separately excluding the future conditions. In our evaluation, the SSCs are also an option of renewal for the traditional reactive approach. As shown in Figure 9-3, the renewal option for proposed IRPM application is chosen according to: i) the current and future HSPs of the evaluated pipe(s), ii) the feasibility of the option, and iii) associated costs. In these applications of IRPM and the reactive traditional approach, only the statistical modeling results, using the Cox model proposed by El Housni *et al.* (2018a), were used to verify the structural state of the pipes under current and future conditions. Furthermore, the SWMM model is used to assess the current and future hydraulic performance of the evaluated pipe(s), as is done for the reactive traditional approach application, and to evaluate the feasibility of the renewal options: pipe(s) replacement, SSC(s) installation, or both.

The assessment of the usefulness and benefits of the proactive IRPM approach versus the traditional reactive approach was carried out by comparing their associated mean total costs (MTCs) corresponding to renewal options required to upgrade the structural and hydraulic performances of the network over 25 years. Figure 9-4 illustrates how the total MTC for the traditional reactive approach is computed. First, MTCs related to the needed renewal options for the current climate conditions are calculated. Thereafter, MTCs corresponding to renewal options required to eliminate dysfunctions expected to occur in the upgraded network within 25 years, are calculated and added to the MTCs of the current renewal options. The MTCs calculation for the traditional reactive approach for each horizon is based on the mean cost of: 1) the SSCs total area, identified for the SZs eligible for this option. For the traditional reactive approach, unlike the IRPM, a global SSCs area and location identification are considered. To do this, all SSC cells identified for one or more SZs are maintained in the network when evaluating other SZs; 2) the total length of constraining pipes to be replaced to eliminate the remaining hydraulic dysfunctions; and 3) the total length of pipes replaced for structural dysfunctions, excluding pipes replaced because of hydraulic dysfunctions. In the cases where the SSCs option cannot be considered, the MTCs for the classical method corresponds to the costs of the total length of pipes to be replaced for hydraulic and structural dysfunctions.

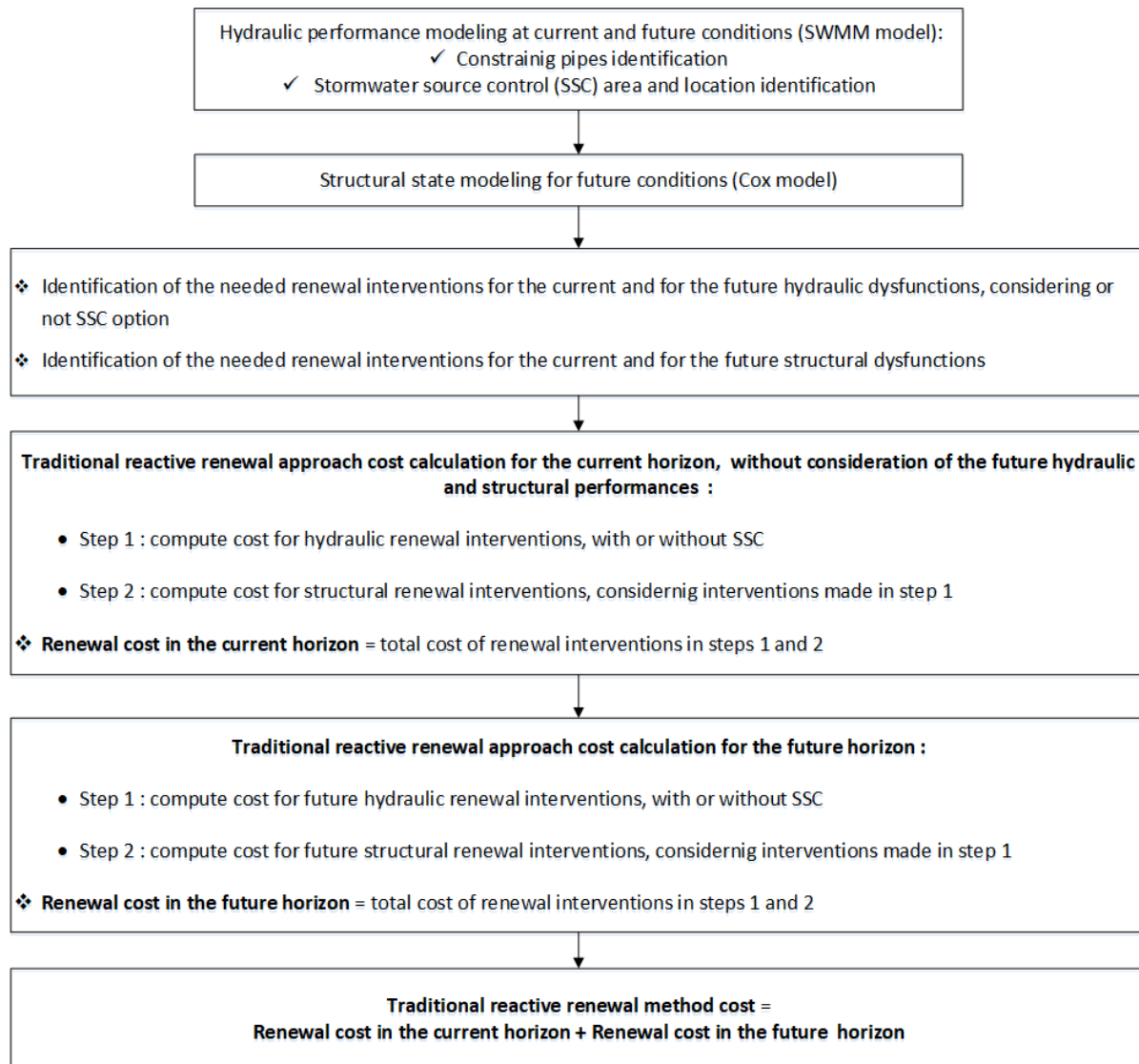


Figure 9-4. Cost calculation for the traditional reactive renewal approach

To compare the results of the IRPM with those of the traditional reactive method, these two approaches were applied to a mixed separated stormwater and combined sewer network using a rainfall event corresponding to the recurrence design, described hereafter.

### 9.2.6 Case study area

The sewer network of application, located in Canada, contains a double drainage system, with approximately 30 km of stormwater pipes and 15 km of combined sewer pipes. It drains a 378-ha area, which is 23 % impervious (see more details in El Housni *et al.*, 2018b). Approximately one-third

of its pipes' total length was previously inspected for structural defects with a camera. Approximately 40 % of the inspected pipes in the case study network are in an intermediate structural condition state (state 3) and 13 % are in a critical condition state (state 4) requiring immediate intervention. A calibrated SWMM model for this network, illustrated in Figure 9-5, was provided by the responsible municipality (see El Housni *et al.*, 2018b for more details).

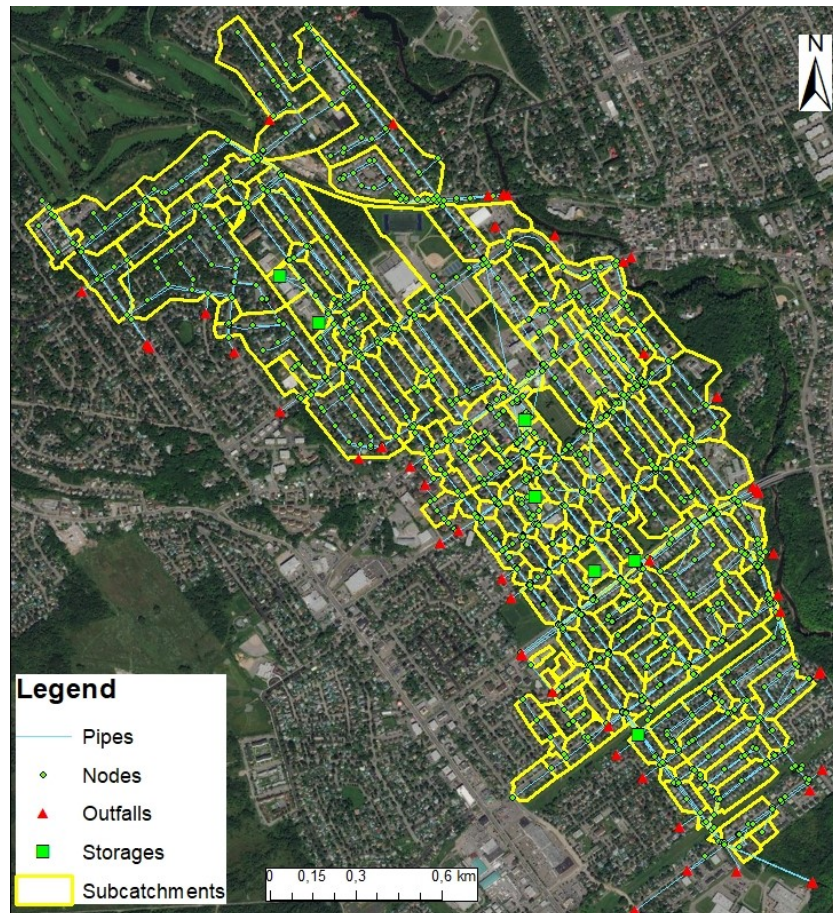


Figure 9-5. SWMM model of the case study network

### 9.2.7 Rainfall events

For the design criteria of stormwater/combined sewer pipes and the limited capacity of SSCs during intense rainfall events (Winston *et al.*, 2016), a single observed rainfall event (SORE) with a return period between 2 and 5 years was used for the application presented here. It was selected following the results obtained by El Housni *et al.* (2018b); they assessed the hydraulic capacity of pipes of the same network using six observed rainfall events with return periods varying from 2 to 5 years. The

selected rainfall event (event 2 of table 8-1) is characterized by a total height of 28.9 mm; maximum intensity over 5 min, 103.7 mm/h; and duration, 1.67 h. To take into account the impact of CC in the renewal planning and to construct a rainfall event representing the future climate in 25 years, all 5 min rainfall intensities of the selected event were multiplied by 1.15 (Figure 9-6). The choice of this increasing factor was based on the results obtained by Mailhot *et al.* (2007 and 2012) regarding the evolution of rainfall intensity for event durations ranging from 1 to 120 h and return periods from 2 to 20 years in many regions of Canada (these authors computed 10 to 20 % increases in extreme rainfall intensities between past (1968–2000) and future (2041–2070) periods).

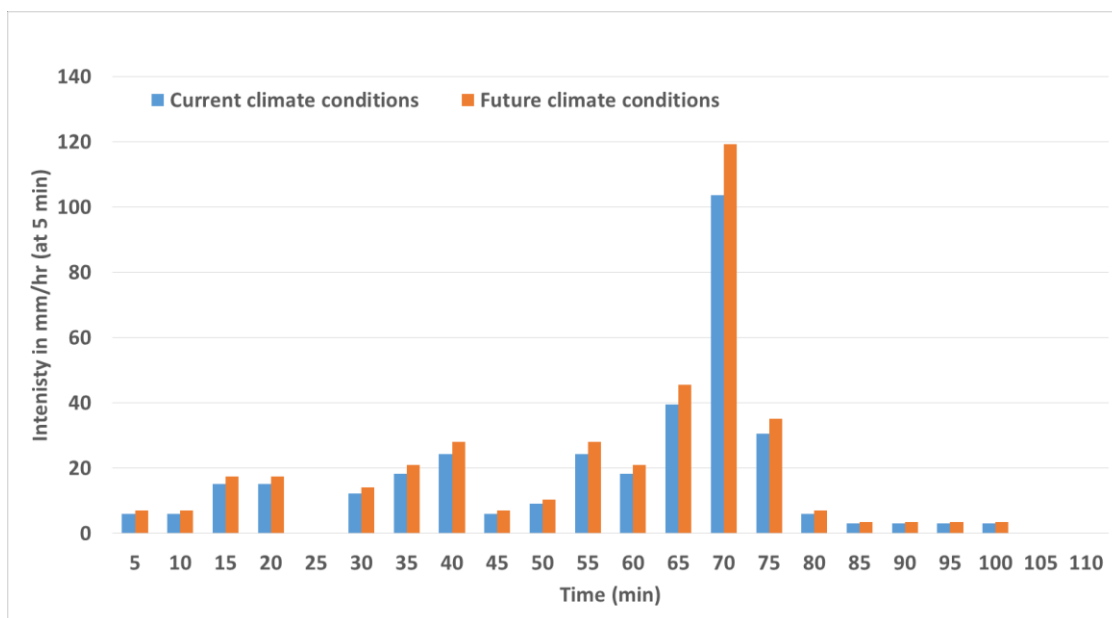


Figure 9-6. Rain events representing current and future climate conditions

### 9.2.8 Stormwater source control parametrization

Because of their effectiveness, and because they can be installed along sidewalks in limited spaces, bioretention systems are considered in this study as possible SSCs to evaluate the performance of the proposed IRPM. However, any other type of SSC could be taken into account for the proposed IRPM. To add bioretention in the evaluated network, a standard bioretention cell was first edited in the SWMM model using the SSC Control Editor (Rossman, 2008) to design its surface soil and storage layers. No underdrain was integrated, in our application, to maximize the infiltration process. All runoff from the impervious areas of the subcatchment where the SSC is installed is first directed towards the bioretention and, if overflow from the bioretention system occurs, this overflow is

drained to the sewer underground pipes. The parameters of the SSC layers were selected based on the results of Makungu (2018). Table 9-1 gives the selected parameters values for each layer.

**Table 9-1. Parameter values of the bioretention cell layers in the SWMM model**

| Surface layer                 |      | Soil layer                       |        | Storage layer       |           |
|-------------------------------|------|----------------------------------|--------|---------------------|-----------|
| Storage depth (mm)            | 200  | Thickness (mm)                   | 450    | Thickness (mm)      | 450       |
| Vegetative volume (fraction)  | 0.1  | Porosity (volume fraction)       | 0.437  | Void ratio          | 0.75      |
| Surface roughness (Manning n) | 0.24 | Field capacity (volume fraction) | 0.062  | Seepage Rate (mm/h) | 11.4<br>3 |
| Surface slope (%)             | 0.5  | Wilting point (volume fraction)  | 0.024  | Clogging factor     | 0         |
|                               |      | Conductivity (mm/h)              | 120.34 |                     |           |
|                               |      | Conductivity slope               | 10     |                     |           |
|                               |      | Suction head (mm)                | 49.02  |                     |           |

## 9.2.9 Costs

Cost calculations related to the different possible options was based on unit construction costs only. The unit costs considered range from 105 to 851 \$CAD/m<sup>2</sup> for bioretention and from 1,500 to 5,250 \$CAD per linear meter for pipe replacement (the mean values of costs are used for comparison); these values correspond to the minimum and maximum values compiled from documents about current practices in the Quebec province (Duchesne et al., 2017; Dabrowski, 2015; Simard, 2008). The broad range of costs for bioretention and pipe replacement can be explained by the various possible implementation conditions.

## 9.3 .Results and discussion

### 9.3.1 Hydraulic and structural performance of the sewer pipes network

#### Hydraulic performance

According to the hydraulic simulations realized using the SWMM model and chosen SORE, the proportion of surcharged nodes is approximately 7 % in current conditions and reaches 9.6 % in the

future (in 25 years). Approximately half of these surcharged nodes, even in current or future conditions, are at risk of flooding (nodes for which the maximum water level is less than 1 m below the ground level). Based on the hydraulic performance modeling method described in section 9.2.2, all adjacent surcharged nodes are grouped together providing 20 SZs in the current horizon against 27 in the future. When SSCs are considered, fifteen of these SZs can be eliminated by adding bioretention cells. Location and area of the required bioretention cells are identified independently for each SZs. Table 9-2 gives the total area of bioretention cells needed in each subcatchment to eliminate the 15 SZs under the current and future conditions. When SSC is not considered, constraining pipes and their adequate hydraulic capacity are identified. These represent, respectively, 2630 m and 3634 m total length of pipes to be replaced under current and future conditions, respectively. Alternatively, for the option where SSCs are not taken into account, a total of 4513 m and 5639 m of hydraulic constraining pipes that need to be replaced are identified for the current and future climate conditions, respectively.

**Table 9-2. Bioretention areas and locations required to eliminate some perimeter of influence under current and future climate conditions**

| Subcatchments | SSCs needed for current climate conditions |                                                | SSCs needed for future climate conditions |                                                |
|---------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
|               | Area (m <sup>2</sup> )                     | Proportion of subcatchment impervious area (%) | Area (m <sup>2</sup> )                    | Proportion of subcatchment impervious area (%) |
| S22           | 2712                                       | 3.80                                           | 2712                                      | 3.80                                           |
| S50           | 2095                                       | 4.40                                           | 2095                                      | 4.40                                           |
| S56           | 2753                                       | 8.80                                           | 2753                                      | 8.80                                           |
| S153_Pseudo   | 82                                         | 3.00                                           | 158                                       | 5.80                                           |
| S30           | 116                                        | 0.66                                           | 250                                       | 1.44                                           |
| S4            | 61                                         | 0.37                                           | 272                                       | 1.65                                           |
| S52           | 507                                        | 1.24                                           | 667                                       | 1.64                                           |
| S16           | 548                                        | 1.49                                           | 658                                       | 1.79                                           |
| S102          | 1695                                       | 15.00                                          | 0                                         | 0.00                                           |
| S242          | 33                                         | 0.25                                           | 0                                         | 0.00                                           |
| S187          | 0                                          | 0.00                                           | 7                                         | 0.07                                           |
| S204          | 0                                          | 0.00                                           | 89                                        | 0.93                                           |
| S7            | 0                                          | 0.00                                           | 310                                       | 0.73                                           |
| S103          | 0                                          | 0.00                                           | 688                                       | 4.95                                           |
| S60           | 0                                          | 0.00                                           | 28                                        | 0.15                                           |
| Total         | 10602                                      | 39.02                                          | 10687                                     | 36.15                                          |



Figure 9-7 shows the renewal options required to upgrade the evaluated network performance under the current climatic conditions: a) considering SSCs and pipe replacement options, and b) considering only the pipe replacement renewal option.

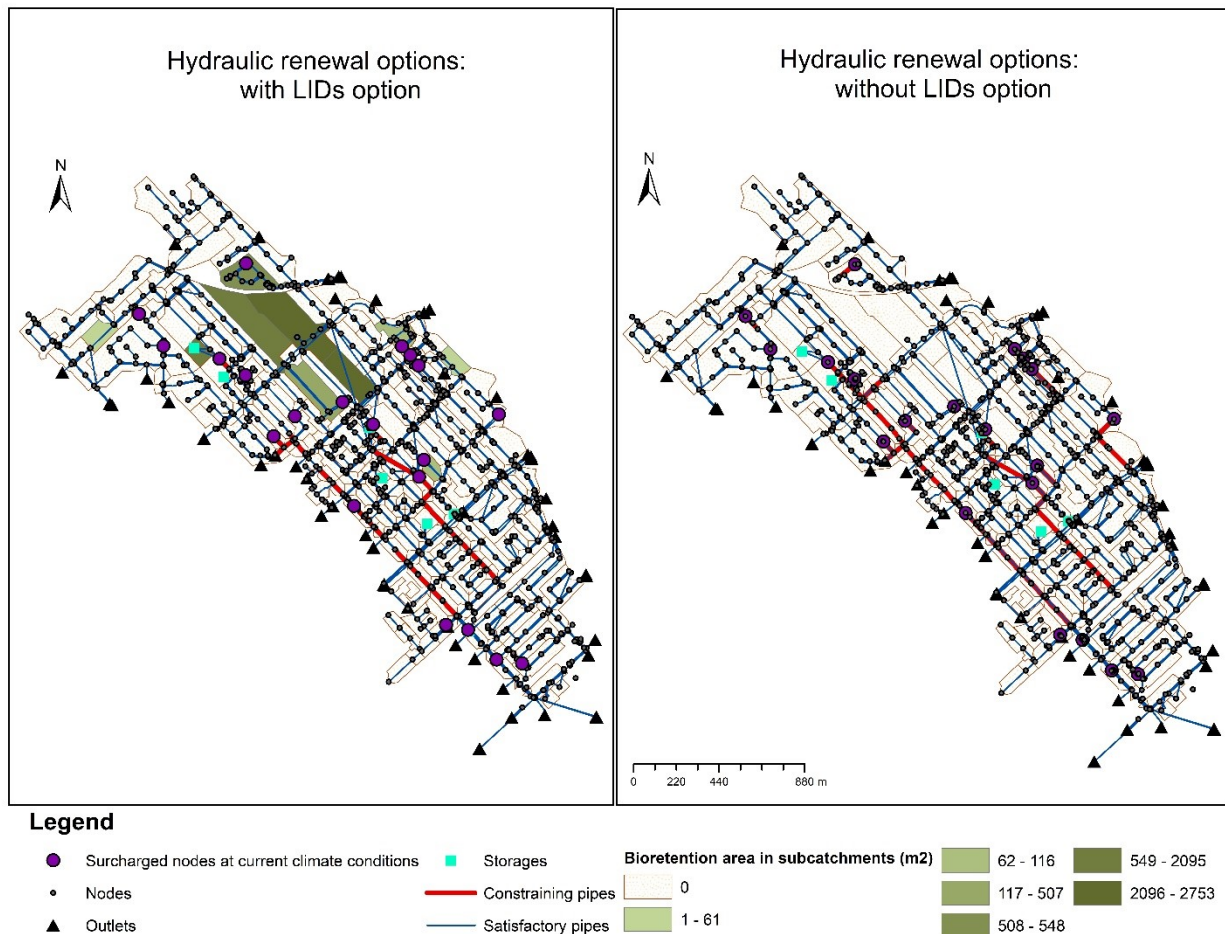


Figure 9-7. Renewal options identified for hydraulic dysfunctions with or without SSCs for the studied network under current climatic conditions

### Structural performance

Under the current climate conditions, a total of 4538 m of pipes of the evaluated network require immediate replacement, because they are in a poorer structural state (state 4). Approximately 20 % of the total length of the structurally deficient pipes is also constraining, from a hydraulic point of view. Similarly, the structural performance modeling, using the Cox model (section 9.2.3), identified approximately 8159 m of pipes to be in structural state 4 within 25 years. In the future climatic conditions, 1602 m of these pipes are also expected to be hydraulically constraining. Figure 9-8 (right

side) gives the location of pipes currently in structural state 4. It also gives the locations of pipes that are likely to be in structural state 4 in the future (left side of figure 9-8).

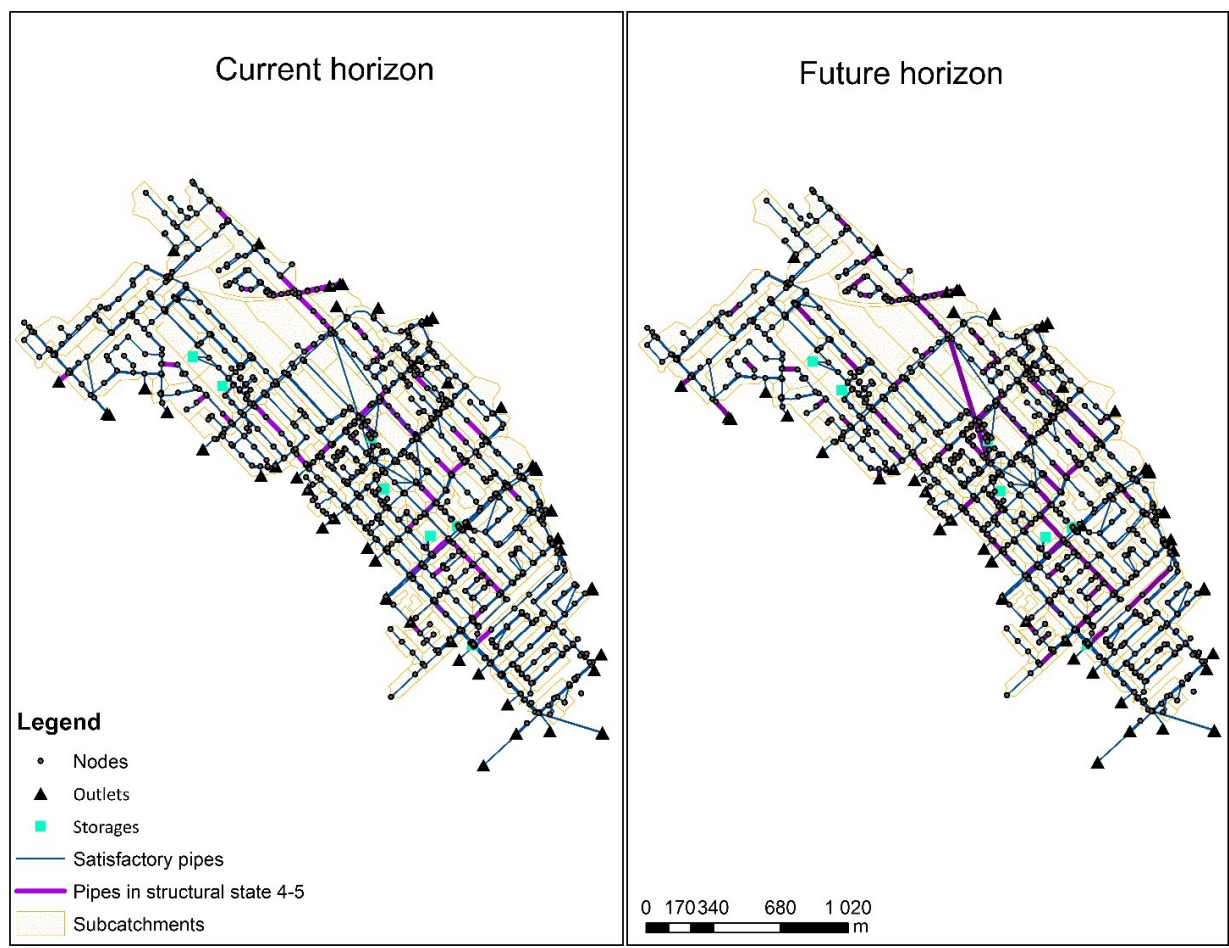


Figure 9-8. Pipes of the studied network in structural state 4 in current and future conditions

### 9.3.2 Proactive approach usefulness compared with the traditional reactive approach

Table 9-3 summarizes renewal options and their corresponding MTCs for the traditional reactive approach and for the IRPM, with and without SSCs options. One should be reminded that: i) for the traditional reactive approach, MTCs correspond to the renewal options needed to upgrade the structural and hydraulic performances under current climate conditions as well as those required to eliminate dysfunctions expected to occur in the modified network within 25 years; ii) for the IRPM, MTCs are considered for only the structural and hydraulic renewal options required to maintain an acceptable level of performance under future climate conditions. These take into account the two



performance types simultaneously in a non-stationary climate and include interventions that can maintain the performance of the network in current conditions.

**Table 9-3. Renewal options, to maintain an acceptable level of overall sewer performance over 25 years, and their total costs according to the traditional reactive and IRPM proactive approaches**

|                                        | Current climate conditions                                              |                                                    |                                                                                | Future climate conditions                                               |                                                                       |                                                                             | Total<br>mean cost<br>(million<br>\$CAD) |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                        | Total length of pipes to<br>be replaced for hydraulic<br>deficiency (m) | Required<br>bioretention<br>area (m <sup>2</sup> ) | Total length of<br>pipes to be<br>replaced for<br>structural<br>deficiency (m) | Total length of pipes to<br>be replaced for hydraulic<br>deficiency (m) | Required<br>bioretention<br>area (m <sup>2</sup> )                    | Total length of pipes<br>to be replaced for<br>structural deficiency<br>(m) |                                          |
| Traditional<br>approach with SSC       | 2630                                                                    | 10601                                              | 3875                                                                           | 1003                                                                    | 1778                                                                  | 3254                                                                        | 42.2                                     |
| Traditional<br>approach without<br>SSC | 4513                                                                    | 0                                                  | 3648                                                                           | 1230                                                                    | 0                                                                     | 3017                                                                        | 41.9                                     |
| Integrated renewal<br>planning         | Current and future climate conditions                                   |                                                    |                                                                                |                                                                         |                                                                       |                                                                             | Total<br>mean cost<br>(million<br>\$CAD) |
|                                        | Total length of pipes to be replaced for<br>hydraulic deficiency (m)    |                                                    | Required bioretention area (m <sup>2</sup> )                                   |                                                                         | Total length of pipes to be replaced<br>for structural deficiency (m) |                                                                             |                                          |
|                                        | 4499                                                                    |                                                    | 2314                                                                           |                                                                         | 3636                                                                  |                                                                             | 28.6                                     |



According to results introduced in Table 9-3, we can note that the proactive IRPM approach is more beneficial than the traditional reactive approach. It represents an economy of approximately 14 million \$CAD compared with the traditional reactive approach adopting the SSCs option. As described above, for the IRPM, the individual SZ renewal options (pipe replacement or bioretention) are chosen based on a preliminary cost comparison for each SZ. The application of the IRPM, unexpectedly, showed that adding bioretention cells is not always the best option economically. This is because the elimination of some hydraulic dysfunctions requires large areas of bioretention. This finding is specific to the studied network, unit costs considered, and method that was applied to identify the bioretention areas and locations—individually for each SZ. However, other results not presented herein demonstrated that even when globally identified (i.e., without the removal of previously identified bioretention cells for other SZs during the evaluation of the required area for each SZ), the bioretention option is not always the most economical. This result may or may not have been different if bioretention options were identified using an optimization algorithm, which is not the case in the proposed IRPM. Another reason that could explain the choice of the pipe replacement option instead of the SSC option for some SZs, is the consideration of the two types of performances (structural and hydraulic) over 25 years. Indeed, pipe replacement is a unique option when the hydraulic constraining pipe needs to be immediately replaced. This is because, for the evaluated network and for reasons of structural dysfunctions only, fewer pipe replacements (240 m less) are needed when adopting the IRPM as compared with the traditional reactive approach.

The other benefit that IRPM provides to municipal managers is the possibility to use it to schedule the current needed renewal options considering CC impact. This allows the managers to: 1) take into account the updated climate projections and their possible changes according to the actions to fight global warming; and 2) schedule the renewal options over an extended period when the evaluated network is larger.

For example, Figure 9-9 gives the locations for the renewal options chosen to eliminate the current structural and hydraulic dysfunctions. These options are chosen based on the current knowledge about CC and the current and future performance of the pipes.

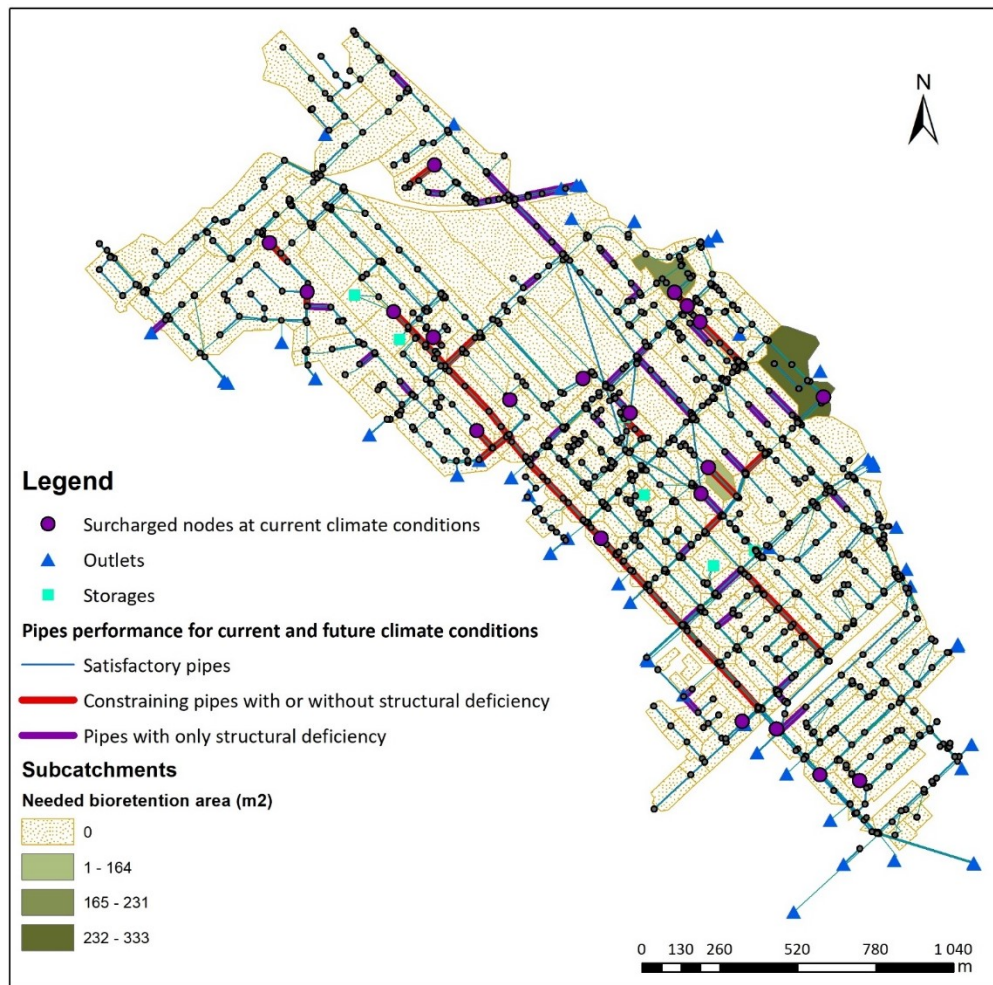


Figure 9-9. Current renewal option locations according to the integrated renewal planning

## 9.4. Conclusion

Management of urban drainage networks is becoming a growing concern for municipalities and responsible authorities. This is owing to the aging of the networks' components, particularly underground pipes, the costs of their maintenance, and the impact of CC. An integrated renewal planning method was proposed in this study to help improve the management of stormwater and combined sewer renewal. This renewal planning method is based on a proactive approach, considering the structural and hydraulic deterioration of pipes in a context of CC and adopting source control practices simultaneously. The objective of this study was to verify how this type of approach can improve the choice of renewal interventions, reduce the costs associated with these interventions, and improve the overall performance of the networks. Integrated planning

consists of identifying several possible pipe renewal options and choosing the least expensive option to obtain the required structural and hydraulic performance under current and future climate conditions. This study involved three stages: 1) modeling the current and future structural performances of the pipes in the network; 2) evaluating the hydraulic performance of pipes under current and future climatic conditions; and 3) identifying possible renewal options based on the results of the first two steps and choosing the best option based on their cost. In the proposed renewal planning, pipe replacement and SSC installation were considered as possible renewal options and CC adaptation measures. This method was applied to a sewer network located in the province of Quebec, Canada, and the resulting costs were compared with the costs of a traditional reactive sewer renewal approach, where structural and hydraulic performance are considered independently and where future climatic conditions are not taken into account in the selection of interventions. This comparison highlighted the importance, when planning the renewal of sewer pipes, of: i) taking the climate evolution into account and ii) considering simultaneously the hydraulic and structural performances. For the studied network, the economic gain of the integrated planning is approximately half the budget required for the traditional reactive approach. For the studied network and depending on its recorded dysfunctions types and locations, the IRPM showed that the SSCs option is not automatically more economical compared with the pipe replacement option.

Furthermore, the additional benefit of the IRPM is the possibility to schedule the currently required renewal interventions given the current knowledge about CC and the current performance of the sewer network. This allows managers to take advantage of knowledge advances related to climatic predictions and consider the government's actions to address this problem. It also allows better planning of the renewal of large networks, which may require a more extended period of intervention. This method is automated and can easily be applied to other sewer systems, despite the calculation time. However, as part of the proposed IRPM, renewal options are only chosen on the basis of cost comparison and without use of an optimization algorithm. The adoption of a method for optimizing the choice of renewal options as part of the IRPM could be the subject of further study. This could also reduce the calculation time of the proposed method. Furthermore, discount rate needs to be used to discount future costs, since it has not been considered here. However, its addition should not change the results obtained as to the advantage of adopting an integrated renewal planning methodology compared to the use of a traditional approach.

## **Acknowledgements**

The authors wish to thank the anonymous municipality for providing the SWMM networks model used in this study. The authors are also grateful to Maxim Ouellet for his help in programming.

## Références

- Ackerman, D., & Stein, E.D., 2008. Evaluating the effectiveness of best management practices using dynamic modeling. *Journal of Environmental Engineering*, **134**(8), 628-639. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:8(628).
- Ana, E.V., and Bauwens, W., 2010. Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods. *Urban Water Journal*, **7**(1): 47-59. doi: 10.1080/15730620903447597.
- Ana, E.V., Bauwens, W., 2007. Sewer network asset management decision-support tools: a review. Dans : Proceedings of the International Symposium on New Directions in Urban Water Management, UNESCO, Paris, 8 pages.
- Ana, E.V., Bauwens, W., Pessemier, M., Thoeye, C., Smolders, S., Boonen, I., and De Guedre, G., 2009. An investigation of the factors influencing sewer structural deterioration. *Urban Water Journal*, **6**(4): 303-312. doi: 10.1080/15730620902810902.
- Ana, E.V., Bauwens, W., Pessemier, M., Thoeye, C., Smolders, S., Boonen, I., and De Guedre, G., 2008. Investigating the effects of specific sewer attributes on sewer ageing—a Belgian case study. In 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK. 31 August - 5 September 2008.
- Andreou, S.A., Marks, D.H., and Clark, R.M., 1987a. A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory. *Advances in Water Resources*, **10**(1): 2-10. doi: 10.1016/0309-1708(87)90002-9.
- Andreou, S.A., Marks, D.H., and Clark, R.M., 1987b. A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications. *Advances in Water Resources*, **10**(1): 11-20. doi: 10.1016/0309-1708(87)90003-0.
- Ariaratnam, S.T., El-Assaly, A., and Yang, Y., 2001. Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models. *Journal of Infrastructure Systems*, **7**(4): 160-165. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:4(160).
- Ariaratnam, S.T., MacLeod, C.W., 2002. Financial outlay modeling for a local sewer rehabilitation strategy. *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**: 486-495. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(486).
- Arnbjerg-Nielsen, K., 2011. Past, present, and future design of urban drainage systems with focus on Danish experiences. *Water Science and Technology*, **63**(3): 527-535.
- Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Gregersen, I.B., Madsen, H., Nguyen, V.T.V., 2013. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review. *Water Science and Technology*, **68**: 16-28.
- Aquadata, 2013. [http://www.aquadata.com/].
- AWARE-P, 2009. "AWARE-P Software". {http://www.aware-p.org/np4/software/} (March 20 2018).
- Baah, K., Dubey, B., Harvey, R., & McBean, E., 2015. A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management. *Science of the Total Environment*, **505**, 1011-1017. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.040.
- Babani, J., Adams, B.J., and Wilson, B.G., 2008. "Integrating hydraulic and environmental performance assessments in asset management of wastewater collection networks." *Proc., 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Baik, H.S., Jeong, H.S., and Abraham, D.M., 2006. Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems. *Journal of*



- Water Resources Planning and Management, **132**(1): 15-24. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:1(15).
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., 2008 (eds). Climate Change and Water. Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Genève, Suisse.
- Baur, R., Herz, R., 2002. Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. *Water Science and Technology*, **46**(6-7): 389-96. doi.org/10.2166/wst.2002.0704
- Baur, R., Zielichowski-Haber, W., and Kropp, I., 2004. Statistical analysis of inspection data for the asset management of sewer networks. In Proceedings of the 19<sup>th</sup> EJSW on Process Data and Integrated Urban Water Modeling, Lyon, France. March 2004.
- Bédard, N., 2010. Villes vertes, Eau bleue, Guide d'introduction à la gestion écologique des eaux de pluie. Union Saint-Laurent Grands Lacs, Montréal, Québec.
- Ben Tagherout, W.B., Bennis, S., Bengassem, J., 2011. A fuzzy expert system for prioritizing rehabilitation of sewer networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **26**(2):146-52. doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00673.x.
- Bengassem, J., 2001. Élaboration d'un système d'aide au diagnostic hydraulique et structural des réseaux d'assainissement urbains. École de technologie supérieure, Université du Québec, 164 pages.
- Bennis, S., Bengassem, J., and Lamarre, P. 2003. "Hydraulic performance index of a sewer network". *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(7), 504-510. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003).
- Berggren, K., Olofsson, M., Viklander, M., Svensson, G., and Gustafsson, A.M. 2012. "Hydraulic impacts on urban drainage systems due to changes in rainfall caused by climatic change." *J. Hydrol. Eng.*, 17(1), 92-98. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000406.
- Berggren, K., Packman, J., Ashley, R., and Viklander, M., 2014. "Climate changed rainfalls for urban drainage capacity assessment." *Urban Water Journal*, 11(7), 543-556. doi: 10.1080/1573062X.2013.851709.
- Bertrand, F., Maumy, M., 2011. Comparaisons multiples. Application. Test de Kruskal-Wallis. IRMA, Université de Strasbourg, Strasbourg, France.
- Bhatt, A., 2017. A Case Study Based Cradle-to-Grave Environmental Assessment of Low-Impact-Development (LID) Stormwater Management Approach (MA Sc. Thesis). University of Guelph, 74 p.
- Boucher, I., 2010. La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, Coll. « Planification territoriale et développement durable », Québec, 118 pages.
- Brière, F.G., 2006. Distribution et collecte des eaux. Deuxième édition, revue et corrigée, Presses internationales Polytechnique, Montréal, 422 pages.
- Buckland, B. A., Dymond, R. L., & Hodges, C. C., 2015. Using Bioretention Retrofits to Meet Virginia's New Stormwater Management Regulations: A Case Study. *Environment and Natural Resources Research*, doi: 10.5539/enr.v5n2p135, **5**(2), 135.
- Burn, D.H., Taleghani, A., 2013. Estimates of changes in design rainfall values for Canada. *Hydrological Processes*, **27**: 1590-1599.
- Cano, O. M., & Barkdoll, B. D., 2016. Multiobjective, socioeconomic, boundary-emanating, nearest distance algorithm for stormwater low-impact BMP selection and placement. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **143**(1), 05016013. doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000726,

- Capéraà, Ph., Van Custem, B., 1988. Méthode et modèles en statistique non paramétrique. Presses de l'Université de Laval : Bordas, Paris, 358 pages.
- CERIU, 2004. Manuel de standardisation des observations - Inspections télévisées des conduites et regards d'égout (in French). Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, Montréal, Canada.
- Chen, M., Mao, H., Talbot, R., Pollard, D., 2005. Changes in precipitation characteristics over North America for doubled CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, **32**: L19716.
- Cheng, C.S., Auld, H., Li, Q., Li, G., 2012. Possible impacts of climate change on extreme weather events at local scale in south-central Canada. *Climate Change*, **112**: 963-979.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, X., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V.M., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. and Whetton, P., 2007. "Regional Climate Projections." In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Chughtai, F., and Zayed, T., 2008. Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **22**(5): 333-341. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:5(333).
- Dabrowski, A., 2015. Quelles infrastructures vertes pour la gestion des eaux de ruissellement? Division de la gestion durable de l'eau, service de l'eau Montréal, Canada, 43 p. (in French)
- Dale, M., Luck, B., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Gill, E., Bennett, J., Kendon, E. and Chan, S., 2017. "New climate change rainfall estimates for sustainable drainage." *Proc. Inst. Civ. Eng.: Engineering Sustainability*, 170(ES4), 214-224, in press. doi:10.1680/jensu.15.00030.
- Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Khedun, C. P., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., Zechman, E. M., 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management. *Journal of the American Water Resources Association*, **46**(5): 907-918.
- Davis, A. P., 2008. Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13:2(90), **13**(2), 90-95. doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008).
- De Guedre, G., Van Herzele, F., Boonen, I., Thoeys, C., Van De Steene, B., 2007. Hydroplan-EU: An integrated approach for sewer asset management. NOVATECH'2007, Lyon, France, 8 pages.
- Denault, C., Millar, R.G., and Lence, B.J., 2006. "Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 42(3), 685-697. doi: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb04485.x.
- DHI [Computer software], 2013. "MIKE URBAN - Modeling Water in the City." {<http://mikebydhi.com/Products/Cities/MIKEURBAN.aspx>} (June 15 2017)
- Diogo, A. F., Barros, L. T., Santos, J., & Temido, J. S., 2018. An effective and comprehensive model for optimal rehabilitation of separate sanitary sewer systems. *Science of The Total Environment*, **612**, 1042-1057. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.315.
- Duchesne, S., Beardsell, G., Villeneuve, J.-P., Toumbou, B., and Bouchard, K. 2013. A survival analysis model for sewer pipe structural deterioration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **28**(2): 146-160. doi: 10.1111/j.1467-8667.2012.00773.x.
- Duchesne, S., Gérardin, L., & Proteau, K., 2007. "Suivis de pratiques de gestion optimale des eaux Pluviales au Québec". Rapport N° R1758, Ministère De l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, Canada, 25 p. (in french)

- Duchesne, S., Villeneuve, J.-P., Beardsell, G., Toumbou, B., and Bouchard, K., 2011. Modélisation de la détérioration structurale des conduites d'égout de la ville de Québec (in French). Research Report No R1287. Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Québec, Canada.
- El-Housni, H., Ouellet, M., & Duchesne, S., 2018a. Identification of most significant factors for modeling deterioration of sewer pipes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **45**(3), 215-226. , doi:10.1139/cjce-2015-0293.
- El-Housni, H., Ouellet, M., & Duchesne, S., 2018b. Predicting the individual hydraulic performance of sewer pipes in the context of climate change. (submitted paper).
- Elmasry, M., Hawari, A., & Zayed, T., 2017. Defect based deterioration model for sewer pipelines using Bayesian belief networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **44**(9), 675-690. doi.org/10.1139/cjce-2016-0592.
- Ennaouri, I., 2010. Modélisation de la dégradation hydraulique et structurale des réseaux sanitaires et pluviaux. École polytechnique de Montréal, Université de Montréal, 93 pages.
- Ennaouri, I., Fuamba, M., 2013. New integrated condition-assessment model for combined storm-sewer systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **139**: 53-64.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C., 2007. Review: linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*, **27**: 1547-1578.
- Fuchs-Hanusch, D., Günther, M., Möderl, M., and Muschalla, D., 2015. Cause and effect oriented sewer degradation evaluation to support scheduled inspection planning. *Water Science and Technology*, **72**(7): 1176-1183. doi: 10.2166/wst.2015.320.
- Gibbons, R.D., and Coleman, D.E., 2001. Statistical methods for detection and quantification of environmental contamination. *John Wiley and Sons, Wiley, New York*.
- GIEC (IPCC), 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), Genève, Suisse, 103 pages.
- Groisman, P.Y. and Coauthors, 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change*, **42**: 243-283.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C., and Razuvaev, V.N., 2005. "Trends in intense precipitation in the climate record." *Journal of Climate*, **18**(9), 1326-1350. doi: 10.1175/JCLI3339.1.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Karl, T.R., Easterling, D.R., Sun, B., Lawrimore, J.M., 2004. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations. *Journal of Hydrometeorology*, **5**: 64-85.
- Grum, M., Jørgensen, A.T., Johansen, R.M., Linde, J.J., 2006. The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulations. *Water Science and Technology*, **54** (6-7): 9-15.
- Halfawy, M. R., Dridi, L., & Baker, S., 2008. Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **22**(6), 360-372. doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2008)22:6(360).
- Halfawy, M. R., Dridi, L., & Baker, S., 2009. A multi-objective optimization decision support model for renewal planning of sewer networks. In *Proceedings of international stormwater and urban water systems modeling conference* (pp. 1-14).
- Halfawy, M. R., Newton, L. A., & Vanier, D. J., 2006. Review of commercial municipal infrastructure asset management systems. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, **11**, 211-224.

- Harvey, R.R., and McBean, E.A., 2014. Predicting the structural condition of individual sanitary sewer pipes with random forests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **41**(4): 294-303. doi: 10.1139/cjce-2014-0037.
- Hasegawa, K., Wada, Y., Hiroyuki, M., 1999. New Assessment System for Premeditated Management and Maintenance of Sewer Pipe Network. Dans : Proceedings of the 8th International Conference on Urban Storm Drainage, 30 août -3 septembre 1999, Sydney, Australie: 586-593.
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D., & Deletic, A., 2009. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology*, **365**(3-4), 310-321. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.001.
- He, J., Valeo, C., and Bouchart, F.C., 2006. "Enhancing urban infrastructure investment planning practices for a changing climate." *Water Science Technology*, **53**(10), 13-20. doi: 10.2166/wst.2006.292
- Hlavinek, P., Kubik, J., Prax, P., Simcikova, P., Sulcova, V., 2006. Application of decision support system for sewer network rehabilitation. Dans: Hlavinek, P., Kukharchyk, T., Marsalek, J., Mahrikova, I., (Eds.), *Integrated urban water resources management*. Springer, Dordrecht, Pays-Bas, 159-170.
- Horold, S., and Baur, R., 1999. Modelling sewer deterioration for selective inspection planning: Case study Dresden. In *Proceedings of the 13<sup>th</sup> European Junior Scientist Workshop*. Switzerland. 8-12 September 1999.
- Hosseini, S.M., and Ghasemi, A., 2012. "Hydraulic performance analysis of sewer systems with uncertain parameters." *Journal of Hydroinformatics*, **14**(3), 682-696. doi: 10.2166/hydro.2011.129.
- Huong, H.T.L., and Pathirana, A., 2013. "Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho City, Vietnam." *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**: 379-394. doi: 10.5194/hess-17-379-2013.
- Ibrahim, 2008. *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous* (Phd thesis in French), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 194p.
- Innovyze, 2018. "Innovyze InfoWorks CS (Collection Systems) – Overview." {[http://www.innovyze.com/products/infoworks\\_cs/](http://www.innovyze.com/products/infoworks_cs/)} (March 19 2018).
- IPCC, 2013. "Climate Change 2013: The Physical Science Basis." *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 1535 pp.
- Jobin D., 2001. *Impact and Adaptation of Drainage Systems, Design Methods and Policies*. Natural Resources Canada - Climate Change Action Fund: Impacts and Adaptation Contribution Agreement A330. Kije Sipi, Gloucester, Canada, 117 pages.
- Jung, I.W., Chang, H., and Moradkhani, H., 2011. "Quantifying uncertainty in urban flooding analysis considering hydro-climatic projection and urban development effects." *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**(2), 617-633. doi: 10.5194/hess-15-617-2011.
- Kang, N., Kim, S., Kim, Y., Noh, H., Hong, S.J., and Kim, H.S., 2016. "Urban drainage system improvement for climate change adaptation." *Water*, **8**(268), w8070268. doi: 10.3390/w8070268 .
- Kendon, E.J., Roberts, N.G., Fowler, H.J. Roberts, M.J. Chan, S.C., and Senior, C.A., 2014. "Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model." *Nature Climate Change*, **4**, 570-576. doi: 10.1038/nclimate2258.

- Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X., Hegerl, G.C., 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, **20**: 1419-1444.
- Kirshen, P., Caputo, L., Vogel, R.M., Mathisen, P., Rosner, A., and Renaud, T., 2015. "Adapting urban infrastructure to climate change: a drainage case study." *Journal of Water Resources Planning Management*, 141(4). doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000443.
- Kleidorfer, M., Möderl, M., Sitzenfrei, R., Urich, C., and Rauch, W., 2009. "A case independent approach on the impact of climate change effects on combined sewer system performance." *Water Science Technology*, doi: 10.2166/wst.2009.520, 60(6), 1555-1564.
- Klein, J.P., and Moeschberger, M.L., 2003. *Survival Analysis: Techniques for Censored and Truncated Data* - 2<sup>nd</sup> edition. Springer, New York, NY.
- Kleiner, Y., Sadiq, R., and Rajani, B., 2006. Modelling the deterioration of buried infrastructure as a fuzzy Markov process. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **55**(2): 67-80. doi: 10.2166/aqua.2006.074.
- Konig, A., 2005. CARE-S WP2 External Corrosion Model Description. SINTEF Technology and Society, Trondheim, Norway.
- Le Gat, Y., 2008. Modelling the deterioration process of drainage pipelines. *Urban Water Journal*, **5**(2): 97-106. doi: 10.1080/15730620801939398.
- Le Gauffre, P., Cherqui, F., de Massiac, J.C., Joannis, C., Werey, C., Rozan, A., 2010. Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Rapport INDIGAU, PGCU, Lyon, France, 112 pages.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Breysse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J., 2004. *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique*, Lavoisier Tec and Doc, Paris, 395 pages.
- Lemer, A., 2000. Advancing infrastructure-asset management in the GASB 34 age: Who's driving the train? Dans: APWA International Public Works Congress, NRCC/ CPWA Seminar Series, Innovations in Urban Infrastructure, Kentucky, É-U. (pp. 57-64).
- Lubini, A. T., & Fuamba, M., 2011. Modeling of the deterioration timeline of sewer systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**(12), 1381-1390. doi.org/10.1139/111-103.
- Madanat, S., Mishalani, R., Ibrahim, W.H.W., 1995. Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data. *Journal of Infrastructure Systems*, **1**(2): 120-125.
- Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., and Mikkelsen, P.S., 2009. "Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark: tendency towards increased storm intensities." *Atmospheric Research*, 92(3), 343-349. doi: 10.1016/j.atmosres.2009.01.013.
- Mailhot A., Duchesne S., and Villeneuve J.-P., 2007b. "Les changements climatiques : enjeux et perspectives en matière d'infrastructures urbaines." *Contact Plus*, 62: 20-26. (in French)
- Mailhot, A., and Duchesne, S., 2010. "Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change." *Journal of Water Resources Planning Management*, 136(2), 201-208. doi: 10.1061/ASCEWR.1943-5452.0000023.
- Mailhot, A., and Talbot, G., 2011. "Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome II-Résultats." *Research Report No R-1259, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Quebec, Canada 285 p. (in French)*
- Mailhot, A., Beauregard, I., Talbot, G., Caya, D., and Biner, S., 2012. "Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations." *International Journal of Climatology*, 32(8), 1151-1163. doi: 10.1002/joc.2343

- Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Khedhaouiria, D., 2013. Gestion des eaux pluviales et changements climatiques. Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Québec, 410 pages.
- Mailhot, A., Duchesne, S., 2005. Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain, *VertigO*, Hors-série, **(1)**: 1-9.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., and Talbot, G., 2007a. "Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM)." *Journal of Hydrology*, 347(1), 197-210. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.019.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Larrivée, C., Pelletier, G., Bolduc, S., Rondeau, F., Kingumbi, A., and Talbot, G., 2008. "Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques." Research Report No. R920, *Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Quebec*, Canada, 170 p. (in French)
- Mailhot, A., Duchesne, S., Musso, E., and Villeneuve, J.-P., 2000. Modélisation de l'évolution de l'état structural des réseaux d'égout: application à une municipalité du Québec (in French). *Canadian Journal of Civil Engineering*, **27**(1): 65-72.
- Makungu, L. A. J., 2018. Comparaison des coûts de diverses mesures d'adaptation des réseaux de drainage urbain (MAsc. Thesis, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- MAMROT, 2013. "Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égouts et des chaussées." *Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines et Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec, Montreal, Canada*, 87 p. (in French)
- McDonald, S., 1998. Durabilité et performance des conduites à écoulement libre : pratiques actuelles. Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada, 46 pages.
- MDDEP et MAMROT, 2011. Guide de gestion des eaux pluviales. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec. Consulté le 1<sup>er</sup> juin 2012. URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>.
- Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Tebaldi, C., 2005. Understanding future patterns of precipitation extremes in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, **32**: L18179.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.-C., 2007. Global climate projections. Dans: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Micevski, T., Kuczera, G., and Coombes, P., 2002. Markov model for storm water pipe deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, **8**(2): 49-56. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2002)8:2(49).
- Mikovits, C., Tscheikner-Gratl, F., Jasper-Tönnies, A., Einfalt, T., Huttenlau, M., Schöpf, M., Kinzel, H., Rauch, W., and Kleidorfer, M., 2017. "Decision support for adaptation planning of urban drainage systems." *Journal of Water Resources Planning Management*, 143(12), 04017069. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000840.
- Min, S.K., Zhang, X., Zwiers, F.W., and Hegerl, G.C., 2011. "Human contribution to more-intense precipitation extremes." *Nature*, 470(7334), 378-381. doi: 10.1038/nature09763

- Mladjic, B., Sushama, L., Khaliq, M.N., Laprise, R., Caya, D., Roy, R., 2011. Canadian RCM projected changes to extreme precipitation characteristics over Canada. *Journal of Climate*, **24**: 2565-2584.
- Mohammadiun, S., Yazdi, J., Salehi Neyshabouri, S. A. A., & Sadiq, R., 2018. Development of a stochastic framework to design/rehabilitate urban stormwater drainage systems based on a resilient approach. *Urban Water Journal*, **15**(2), 167-176. doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424218.
- Murphy, J.M., Sexton, D.M.H., Jenkins, G.J., Boorman, P., Booth, B., Brown, K., Clark, R., Collins, M., Harris, G. and Kendon, L., 2009. "UK Climate Projections Science Report: Climate Change Projections." Met Office, Hadley Centre, Exeter, UK.
- Neumann, J. E., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., Jones, R., Smith, J. B., Perkins, W., Jantarasami, L., and Martinich, J., 2015. "Climate change risks to US infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage." *Climate Change*, 131(1), 97-109. doi: 10.1007/s10584-013-1037-4.
- Niemczynowicz, J., 1982. "Areal intensity-duration-frequency curves for short term rainfall events in Lund." *Hydrology Research*, 13(4), 193-204.
- Niemczynowicz, J., 1989. "Impact of the greenhouse effect on sewerage systems—Lund case study." *Hydrol. Sci. J.*, 34(6), 651-666. doi: 10.1080/02626668909491373.
- Notaro, V., Fontanazza, C.M., La Loggia, G., and Freni, G., 2016. "Flood frequency analysis for an urban watershed: comparison between several statistical methodologies simulating synthetic rainfall events." *Journal of Flood Risk Management*, 11, S559-S574. doi: 10.1111/jfr3.12283, 26, 3904-3918.
- Olsson, J., Amaguchi, H., Alsterhag, E., Dåverhög, M., Adrian, P.E., and Kawamura, A., 2013. "Adaptation to climate change impacts on urban storm water: A case study in Arvika, Sweden." *Climate Change*, 116(2), 231-247. doi: 10.1007/s10584-012-0480-y.
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M., and Viklander, M., 2009. "Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden." *Atmospheric Research*, 92(3), 364-375. doi: 10.1016/j.atmosres.2009.01.015.
- Osman, Y.Z., 2015. "Monitoring the future behaviour of urban drainage system under climate change: a case study from north-western England." *Open Engineering*, 5(1), 1-5. doi: 10.1515/eng-2015-0003.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. F., and Vogel, R. M., 2005. Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *Journal of water resources planning and management*, **131**(6), 441-448. Doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:6(441)
- Philip, R., Anton, B., Loftus, A.C., 2011. SWITCH raining kit. Integrated urban water management in the city of the future, Module 4. Stormwater exploring the options, ICLEI, Freiburg, Allemagne.
- Powell, A., 2008. "An analysis of the change of design storms due to future climate predictions." M.S. thesis, University of Colorado, Boulder, CO, 95 p.
- Rakotomalala, R., 2008. Comparaison de populations : Tests non paramétriques, version 1.0. Université Lumière Lyon 2, Lyon, France, 201 pages.
- Rokstad, M.M., and Ugarelli, R.M., 2015. Evaluating the role of deterioration models for condition assessment of sewers. *Journal of Hydroinformatics*, **17**(5): 789-804. doi: 10.2166/hydro.2015.122.
- Rommel, Y., Bouyssou, D., MacGilchrsit, R., 1989. Planning rehabilitation works on a sewer network. Dans : Proceedings of the 6th Conference on Computing in Civil Engineering -

- Computers in Engineering Practice. Éditeur: T.O. Barnwell Jr. *American Society of Civil Engineers*, New York. pp. 108-115.
- Rosenberg, E.A., Keys, P.W., Booth, D.B., Hartley, D., Burkey, J., Steinemann, A.C., and Lettenmaier, D.P. (2010). "Precipitation extremes and the impacts of climate change on stormwater infrastructure in Washington State." *Climate Change*, 102(1), 319-349. doi: 10.1007/s10584-010-9847-0.
- Ross, S.M., 2000. Introduction to probability models - 7<sup>th</sup> ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Rossman, L.A., 2008. Storm Water Management Model User's Manual, version 5.0. *National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency*, Cincinnati, OH, USA.
- Roudier, P., Andersson, J. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., and Ludwig, F., 2015. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2 °C global warming, *Climate Change*, **135**, 341-355.
- Ruiter, A., 2012. "Delta-change approach for CMIP5 GCMs." *Trainee Report, Royal Netherlands Meteorological Institute*.
- Ryu, J., Lee, H., Yu, S., and Park, K., 2014. "Statistical evaluation on storm sewer design criteria under climate change in Seoul, South Korea." *Urban Water Journal*, 11(5), 370-378. doi: 10.1080/1573062X.213.801498.
- Saegrov S. (Ed.), 2006. CARE-S - Computer Aided Rehabilitation for Sewer and Storm Water Networks, IWA Publishing, London, UK, 160 pages.
- Salman, B., and Salem, O., 2012. Modeling failure of wastewater collection lines using various section-level regression models. *Journal of Infrastructure Systems*, **18**(2): 146-154. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000075.
- Sebti, A., Bennis, S., & Fuamba, M., 2016-a. Optimization of the restructuring cost of an urban drainage network. *Urban Water Journal*, 13(2), 119-132. doi.org/10.1080/1573062X.2014.923918.
- Sebti, A., Carvalho Aceves, M., Bennis, S., & Fuamba, M., 2016-b. Improving nonlinear optimization algorithms for BMP implementation in a combined sewer system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **142**(9), 04016030. doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000669.
- Sebti, A., Fuamba, M., & Bennis, S., 2015. Optimization model for BMP selection and placement in a combined sewer. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **142**(3), 04015068. doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000620.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L.G., 2008. "The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system." *Journal of Hydrology*, 350(1), 100-113. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.05.028
- Semenov, V.A., Bengtsson, L., 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, **19**: 123-140.
- Serpente, R.F., 1994. Understanding the modes of failure for sewers. *In Urban Drainage Rehabilitation Programs and Techniques; Selected Papers on Urban Drainage Rehabilitation from 1988-1993 Water Resource Planning and Management Division Conference Sessions. Edited by W.A. Macaitis. ASCE, New York, NY*, pp. 86-100.
- Shephard, M.W., Mekis, E., Morris, R.J., Feng, Y., Zhang, X., Kilcup, K., and Fleetwood, R., 2014. "Trends in Canadian short-duration extreme rainfall: Including an intensity-duration-frequency perspective." *Atmosphere-Ocean*, 52(5), 398-417. doi: 10.1080/07055900.2014.969677.
- Sheskin, D.J. 2003. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures. 3<sup>rd</sup> ed. *Chapman and Hall/CRC*, New York, NY.



- Sheskin, D.J., 2003. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures: Third Edition. Chapman & Hall/CRC, New York, NY.
- SIARA., 2008. Étude de modélisation hydraulique des réseaux intercommunaux d'assainissement. Syndicat Intercommunal d'Assainissement de la Région d'Albertville, Nanterre, France.
- Simard, M., C., Dion, Y., &, 2008. "Évaluation des coûts unitaires des mesures d'adaptation aux hangements climatiques en drainage urbain". Rapport final : CSOB828 (60ET), Ville de Montréal, Montreal, Canada. (29 p). (in french)
- Sunyer, M.A., Madsen, H., Ang, P.H., 2012. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*, **103**: 119-128.
- Tagherout, W.B., Bennis, S., and Bengassem, J., 2011. "A fuzzy expert system for prioritizing rehabilitation of sewer networks." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(2), 146-152. doi: 10.1111/j.1467-8667.2010.00673.x.
- Tebaldi, C., Mearns, L.O., Nychka, D., Smith, R.L., 2004. Regional probabilities of precipitation change: A Bayesian analysis of multimodel simulations. *Geophysical Research Letters*, **31**: L24213.
- Telliez, M., 2010. EPA SWMM 5 : Manuel d'initiation. 28 pages.
- Thiombiano, T., 2013. Économétrie des modèles dynamiques : 2<sup>e</sup> édition (in French). L'Harmattan, Paris, France.
- Timsit, J.-F., Alberti, C., Chevret, S., 2005. Le modèle de Cox. Revu des Maladies Respiratoire, Service de Réanimation Médicale, CHU A Michallon, Grenoble, France.
- Tran, D.H., 2007. "Investigation of Deterioration Models for Stormwater Pipe Systems." Ph.D. thesis. *School of Architectural, Civil and Mechanical Engineering, Victoria University, Melbourne, Australia*, 219 p.
- Tran, D.H., Ng, A.W.M., Perera, B.J.C., Burn, S., and Davis, P., 2006. Application of probabilistic neural networks in modelling structural deterioration of stormwater pipes. *Urban Water Journal*, **3**(3): 175-184. doi: 10.1080/15730620600961684.
- Tran, D.H., Perera, B.J.C., and Ng, A.W.M., 2010. "Hydraulic deterioration models for storm-water drainage pipes: ordered probit versus probabilistic neural network." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(2), 140-150. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000020.
- Tscheikner-Gratl, F., Mikovits, C., Rauch, W., and Kleidorfer, M., 2014. Adaptation of sewer networks using integrated rehabilitation management. *Water Science and Technology*, **70**(11): 1847-1856. doi: 10.2166/wst.2014.353.
- Lubini, A. T., 2010. Établissement des courbes de dégradation des conduites des réseaux sanitaires : méthodologie et étude de cas à Verdun et St-Hyacinthe au Québec, Canada. École Polytechnique de Montréal, Montréal, 78 pages.
- Ugarelli, R.M., Selseth, I., Le Gat, Y., Rostum, J., and Krogh, A.H., 2013. Wastewater pipes in Oslo: from condition monitoring to rehabilitation planning. *Water Practice and Technology*, **8**(3-4): 487-494. doi: 10.2166/wpt.2013.051.
- Van Riel, W., Post, J., Langeveld, J., Herder, P., & Clemens, F., 2017. A gaming approach to networked infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, **13**(7), 855-868. doi.org/10.1080/15732479.2016.1212902.
- Van Vuuren, D. P., & Carter, T. R., 2014. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. *Climatic Change*, 122(3), 415-429. DOI 10.1007/s10584-013-0974-2.

- Villeneuve, J.-P., Duchesne, S., and Mailhot, A., 2007. "Analyse de la pluviométrie récente sur le territoire de la ville de Québec et pronostics d'évolution dans un contexte de changements climatiques." Research Report R-911f, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Quebec, Canada, 156 p. (in French)
- Vladeanu, G., & Matthews, J. C., 2018. Analysis of risk management methods used in trenchless renewal decision making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **72**, 272-280. doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.025.
- Vojinovic, Z., Sahlu, S., Torres, A. S., Seyoum, S. D., Anvarifar, F., Matungulu, H., ... & Kapelan, Z., 2014. Multi-objective rehabilitation of urban drainage systems under uncertainties. *Journal of Hydroinformatics*, **16**(5), 1044-1061. doi.org/10.2166/hydro.2014.223.
- Waters, D., Watt, W.E., Marsalek, J., and Anderson, B.C., 2003. "Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change." *Journal of Environmental planning and Management* 46(5), 755-770. doi: 10.1080/0964056032000138472.
- Waters, D., Watt, W.E., Marsalek, J., Andreson, B.C., 2003. Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change. *Journal of Environmental Planning and Management*, **46**: 755-770.
- Watt, W.E., Waters, D., and McLean, R., 2003. "Climate Change and Urban Stormwater Infrastructure in Canada: Context and Case Studies." *Toronto-Niagara Region Study Report and Working Paper Series Rep. No. 2003-1, Meteorological Service of Canada, Waterloo, Canada*.
- Westra, S., Alexander, L. V., and Zwiers, F. W., 2015. "Global increasing trends in annual maximum daily precipitation." *Journal of Climatology*, 26(11), 3904-3918. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00502.1
- Westra, S., Fowler, H.J., Evans, J.P., Alexander, L.V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E.J., Lenderink, G., and Roberts, N.M., 2014. "Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall." *Reviews of Geophysics*, **52**, 522-555. doi: 10.1002/2014RG000464.
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., Nguyen, V.T.V., 2012. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, **103**: 106-118.
- Winston, R. J., Dorsey, J. D., & Hunt, W. F., 2016. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of the Total Environment*, **553**, 83-95. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081.
- Winston, R. J., Hunt, W. F., Kennedy, S. G., Merriman, L. S., Chandler, J., & Brown, D., 2013. Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds. *Ecological Engineering*, **54**, 254-265.
- Wirahadikusumah, R., Abrahamm D., and Iseley, T., 2001. Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. *Journal of Infrastructure Systems*, **7**(2): 77-84. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:2(77).
- WRc, 1994. Manual of Sewer Condition Classification – 3<sup>rd</sup> Edition. Water Resources Center, Swindon, UK.
- WRc, 2004. Manual of Sewer Condition Classification – 4<sup>th</sup> Edition, Water Resources Center, Swindon, R.-U.
- Yazdi, J., 2018. Rehabilitation of Urban Drainage Systems Using a Resilience-Based Approach. *Water Resources Management*, **32**(2), 721-734. doi.org/10.1007/s11269-017-1835-y.

- Yazdi, J., & Neyshabouri, S. S., 2014. Adaptive surrogate modeling for optimization of flood control detention dams. *Environmental modelling & software*, **61**, 106-120. doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.007.
- Yazdi, J., Sadollah, A., Lee, E. H., Yoo, D. G., & Kim, J. H., 2017a. Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks. *Journal of Flood Risk Management*, **10**(3), 326-338. doi.org/10.1111/jfr3.12143.
- Yazdi, J., Yoo, D. G., & Kim, J. H., 2017b. Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic rehabilitation of urban drainage networks. *Urban Water Journal*, **14**(5), 483-492. doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223319.
- Younis, R., and Knight, M.A., 2010. A probability model for investigating the trend of structural deterioration of wastewater pipelines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(6): 670-680. doi: 10.1016/j.tust.2010.05.007.
- Zhao, J.Q., 1998. Trunk sewers in Canada. Dans: APWA International Public Works Congress Seminar Series, American Public Works Association, Las Vegas, 75-89.
- Zhao, J.Q., McDonald, S., Kleiner, Y., 2001. Guidelines for Condition Assessment and Rehabilitation of Large Sewers. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- Zhou, Q., Mikkelsen, P.S., Halsnæs, K., and Arnbjerg-Nielsen, K., 2012. "Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits." *Journal of Hydrology*, 414, 539-549. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.031.
- Zhou, Q., Panduro, T.E., Thorsen, B.J., Arnbjerg-Nielsen, K., 2013. Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system: an integrated hydrological cost-benefit analysis. *Environmental Management*, **51**: 586-601.
- Zwiers, F. W., and W. H. Ross, 1991. An alternative approach to the extreme value analysis of rainfall data, *Atmosphere-Ocean*, **29**: 437-461.
- Zwiers, F. W., Kharin, V.V., 1998. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO<sub>2</sub> doubling. *Journal of Climate*, **11**: 2200-2222.

## **Annexe A :**

**Résumé des études scientifiques concernant l'évaluation des facteurs d'impact  
sur le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout**



Tableau 1-A. Tableau récapitulatif des travaux concernant l'évaluation des facteurs d'impact sur le processus de la détérioration structurale des conduites d'égout

| Auteurs                                | Modèle                                       | Ville d'application          | Facteurs évalués                                                                                                                                                                                                                         | Facteurs influents                                                                                                              | Méthode d'évaluation                                                               |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ARIARATNAM <i>et al.</i> (2001)</b> | Régression logistique                        | Edmonton * (Canada)          | Âge; Diamètre; Profondeur d'enfouissement; Type de réseau; Matériau; Interaction entre les facteurs (Âge; Diamètre; Type de réseau)                                                                                                      | Âge; Diamètre; Type de réseau                                                                                                   | Wald<br>Ratio de vraisemblance                                                     |
| <b>MICEVSKI <i>et al.</i> (2002)</b>   | Modèle de Markov                             | Newcastle ** (Australie)     | Diamètre; Matériau; Type de sol; Classification d'exposition (distance du littoral); Performance hydraulique                                                                                                                             | Diamètre; Matériau; Type de sol; Classification d'exposition                                                                    | Chi-2                                                                              |
| <b>BAUR et HERZ (2002)</b>             | Modèle de survie par cohorte                 | Dresde* (Allemagne)          | Période de construction; Matériau; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (réseau routier); Diamètre; Pente; Type de réseau; Forme; Fonction de réseau (réseau mineur ou majeur)                                             | Matériau; Période de construction; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures                                           |                                                                                    |
| <b>BAIK <i>et al.</i> (2006)</b>       | Modèle de Markov et modèle probit ordonné    | San Diego † (États unis)     | Âge; Longueur; Diamètre; Matériau; Pente                                                                                                                                                                                                 | Âge; Longueur; Diamètre; Pente                                                                                                  | Mesure d'ajustement statistique global: $\rho^2$ (f pour le modèle probit ordonné) |
| <b>TRAN <i>et al.</i> (2006)</b>       | Analyse de régression discriminante multiple | Gret Detenong ** (Australie) | Âge; Diamètre; Profondeur d'enfouissement; Pente; Localisation (réserve, sous la route, sous terrain naturel, sous servitude); Présence de racines d'arbres; Performance hydraulique; Type de sol; Indice d'humidité du sol à l'état sec | Selon le test de Chi-2 et la méthode pas-à-pas: Performance hydraulique<br><br>Selon ANOVA 1: Pente; Profondeur d'enfouissement | ANOVA 1<br>Méthode pas-à-pas<br>Analyse univariée avec Chi-2                       |

| Auteurs                         | Modèle                         | Ville d'application                       | Facteurs évalués                                                                                                                                                                          | Facteurs influents                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Méthode d'évaluation           |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>CHUGHTAI et ZAYED (2008)</b> | Régression multiple            | Chutes du Niagara et Pierrefonds (Canada) | Âge; Diamètre; Longueur; Matériau; Profondeur d'enfouissement; Pente; Assise; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (réseau routier); Interaction entre certains facteurs    | Conduites en béton: Âge associé au matériau; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures; Profondeur d'enfouissement; Profondeur d'enfouissement associée à l'assise; Assise<br>Conduite en ciment-amiante: Âge; Profondeur d'enfouissement associée à la longueur<br>Conduites en PVC: Âge; Longueur; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures; Assise; Diamètre associé à la profondeur d'enfouissement | Test t                         |
| <b>ANA et al. (2008)</b>        | Modèle de survie par cohorte   | Leuven* (Belgium)                         | Période de construction; Diamètre; Longueur; Forme; Matériau; Pente; Profondeur d'enfouissement; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (réseau routier)                      | Période de construction; Longueur; Matériau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                |
| <b>ANA et al. (2009)</b>        | Régression logistique multiple | Louvain * (Belgique)                      | Âge; Période de construction; Diamètre; Longueur; Forme; Matériau; Type de réseau; Pente; Profondeur d'enfouissement; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (réseau routier) | Âge; Matériau; Longueur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Wald<br>Ratio de vraisemblance |
| <b>YOUNIS et KNIGHT (2010)</b>  | Régression ordinale            | Chutes du Niagara † (Canada)              | Âge; Matériau; Interaction entre l'âge le matériau                                                                                                                                        | Matériau; Interaction entre l'âge le matériau (l'âge est influent seulement pour les conduites en béton)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Wald                           |

| Auteurs                                      | Modèle                                                        | Ville d'application        | Facteurs évalués                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Facteurs influents                                                                                                                                                                                               | Méthode d'évaluation                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SALMAN et SALEM (2012)</b>                | régression logistique multinomiale                            | Cincinnati †† (États unis) | Âge; Diamètre; Longueur; Matériau; Type de réseau; Pente; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (réseau routier); Profondeur d'enfouissement; Interaction entre les facteurs: 27 interactions bidirectionnelles (sauf interaction entre Type de réseau et Matériau) et 5 interactions tridirectionnelles | Âge; Diamètre; Longueur; Matériau; Type de réseau; Pente; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures; Profondeur d'enfouissement; 13 interactions bidirectionnelles et 2 interactions tridirectionnelles | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wald (pour les facteurs)</li> <li>- Méthode pas-à-pas (pour les interactions entre les facteurs)</li> </ul>                           |
|                                              | Régression logistique binaire                                 |                            | Âge; Diamètre; Longueur; Matériau; Type de réseau; Pente; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures (Réseau routier); Profondeur d'enfouissement; Interaction entre les facteurs: 20 interactions bidirectionnelles (sauf interaction entre type de réseau et matériau)                                      | Âge; Diamètre; Longueur; Pente; Matériau; Type de réseau; Emplacement par rapport à d'autres infrastructures; Profondeur d'enfouissement; 7 interactions bidirectionnelles                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wald (pour les facteurs)</li> <li>- Méthode pas-à-pas et Ratio de vraisemblance (pour les interactions entre les facteurs)</li> </ul> |
| <b>UGARELLI <i>et al.</i> (2013)</b>         | Modèle de Gompitz basé sur les modèles de Markov et de survie | Oslo †† (Norway)           | Diamètre; Type de réseau; Période de construction; Trafic routier; Type de sol; Proximité du Tramway; Présence de racine; Interactions entre les facteurs                                                                                                                                                             | - Pour les conduites en béton de 600 mm ou moins: Diamètre; Type de réseau; Période de construction; Type de sol; Présence de racine; Interactions entre le type de réseau et la présence de racine              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratio de vraisemblance</li> </ul>                                                                                                     |
| <b>TSCHEIKNER-GRATL <i>et al.</i> (2014)</b> | Régression logistique binaire                                 | Alpine city ††† (Austria)  | Âge; Diamètre; Matériau; Pente; Longueur; Forme                                                                                                                                                                                                                                                                       | Âge; Diamètre; Pente; Longueur; Forme                                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wald</li> </ul>                                                                                                                       |
| <b>ROKSTAD et UGARELLI (2015)</b>            | Modèle de Gompitz basé sur un modèle de Markov non-homogène   | Oslo * (Norvège)           | Diamètre; Type de réseau; Période de construction; Trafic routier; Assise; Présence de racine                                                                                                                                                                                                                         | - Pour les conduites de tous type de matériau : Diamètre; Type de réseau; Période de construction; Trafic routier;                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chi-2</li> </ul>                                                                                                                      |



| Auteurs                            | Modèle                                                                                                                                                            | Ville d'application     | Facteurs évalués                                                                                                  | Facteurs influents                                           | Méthode d'évaluation                                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                    |                                                                                                                                                                   |                         |                                                                                                                   | Assise; Présence de racine                                   |                                                                          |
| <b>FUCHS-HANUSCH et al. (2015)</b> | Régression logistique                                                                                                                                             | Unnamed * (Autriche)    | Matériau; Période de construction; Type d'effluent; Profil; Largeur; Taille; Longueur; Profondeur d'enfouissement | Matériau; Longueur; Largeur; Période de construction; Profil | - Ratio de vraisemblance                                                 |
| <b>CARADOT et al. (2017)</b>       | Modèle de Gompitz basé sur le modèle Markov<br><br>Modélisation statistique simple (répartition de l'état structural de plusieurs sous-échantillons de conduites) | Brunswick * (Allemagne) | Matériau; Diamètre; Type effluent; Niveau de trafic; Eau; profondeur d'enfouissement                              | Diamètre, profondeur d'enfouissement et type de réseau       | - Signification statistique du coefficient de chaque paramètre (P_value) |
| <b>CARADOT et al. (2018)</b>       | Modèle de survie et modèle de Markov<br><br>Model de forêt aléatoire                                                                                              | - Berlin* (Allemagne)   | - Période de construction, Matériau, Type de réseau, Largeur, Longueur, Profondeur d'enfouissement; District      | Matériau, district, Forme et the type of effluent            | - Validation croisée                                                     |

\* : Réseau total: sanitaire, pluvial et unitaire

\*\* : Réseau pluvial

† : Réseau sanitaire

†† : Réseaux sanitaire et unitaire

††† : Réseau unitaire

## Annexe B :

### Calcul du ruissellement de surface et des écoulements en conduites et canaux dans SWMM

Dans SWMM, le réseau de drainage est divisé en plusieurs sous-bassins de drainage reliés à des noeuds puis aux conduites (Figure B-2). L'eau issue du ruissellement de surface est transportée par les conduites vers un exutoire. Le calcul du ruissellement de surface et des écoulements en conduite (ou dans les canaux) se fait de façon successive. Les détails de ces calculs sont donnés dans les sections a et b suivantes.

#### a. Ruissellement de surface :

Pour les simulations du ruissellement de surface, SWMM nécessite, dans un premier temps, un hyétogramme de pluie qu'il transforme en débits. Cette transformation se base sur les équations d'onde cinématique, en considérant les sous-bassins de drainage sous forme de canaux rectangulaires à surface libre (Figure B-1) (Rivard, 2013; Telliez, 2010).

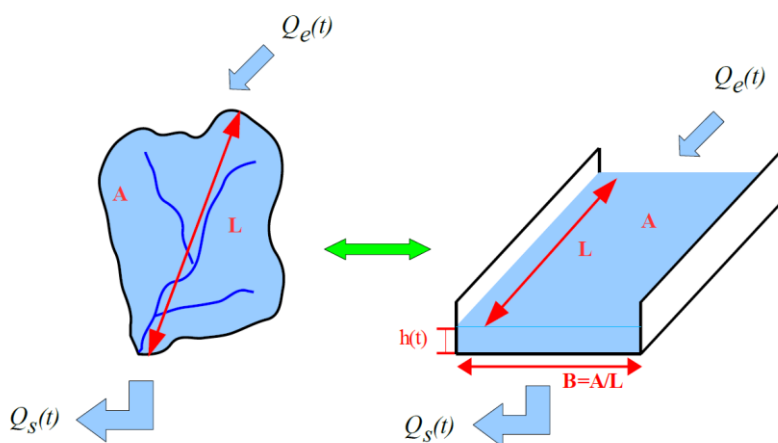


Figure B-1 : Représentation d'un sous-bassin versant dans SWMM (tiré de Telliez, 2010)

La hauteur de la lame d'eau de ruissellement  $h(t)$ , à chaque pas de temps, est reliée aux débits entrants et sortants par une équation de conservation du volume (équation A-1) et par la formule de Manning (équation A-2) (Telliez, 2010).

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) \quad (\text{A-1})$$

$$Q_s(t) = \frac{B \cdot h(t)}{n} \cdot R_H(t)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{i} \quad (\text{A-2})$$

où :  $V(t) = A \cdot h(t)$  = volume d'eau dans le canal au temps  $t$ ,  $Q_e(t)$  = débit entrant au temps  $t$ , qui est l'excédent de précipitation (équation A-3),  $Q_s(t)$  = débit sortant au temps  $t$ ,  $h(t)$  = hauteur d'eau dans le canal au temps  $t$ ,  $B$  = largeur du canal,  $R_H(t) = \frac{B \cdot h(t)}{B + 2h(t)}$  = le rayon hydraulique du canal et  $i$  = la pente du bassin versant (ou canal).

$$Q_e(t) = P(t) - I(t) - E(t) - In(t) \quad (\text{A-3})$$

où :  $P(t)$  = précipitation au temps  $t$ ,  $I(t)$  = infiltration au temps  $t$ ,  $E(t)$  = évaporation au temps  $t$  et  $In(t)$  = interception par la végétation ou les dépressions sur la surface du bassin versant au temps  $t$ .

Le modèle SWMM, selon la version utilisée, propose plusieurs options pour l'estimation de l'infiltration, à savoir : les modèles de Horton et de Green-Ampt, utilisés surtout pour les surfaces urbaines, et celui du *Curve Number*, généralement utilisé pour les milieux ruraux (Rivard, 2013; Telliez, 2010).

#### b. Écoulement en conduite et canaux :

Dans SWMM, et tel qu'illustré à la Figure B-2, les différents sous-bassins sont drainés par un réseau. Ce réseau est représenté sous forme d'une série de nœuds (regards, bassins de rétention et exutoires) reliés par des conduites, des pompes, des déversoirs ou des orifices (Rivard, 2013; Rossman, 2004).

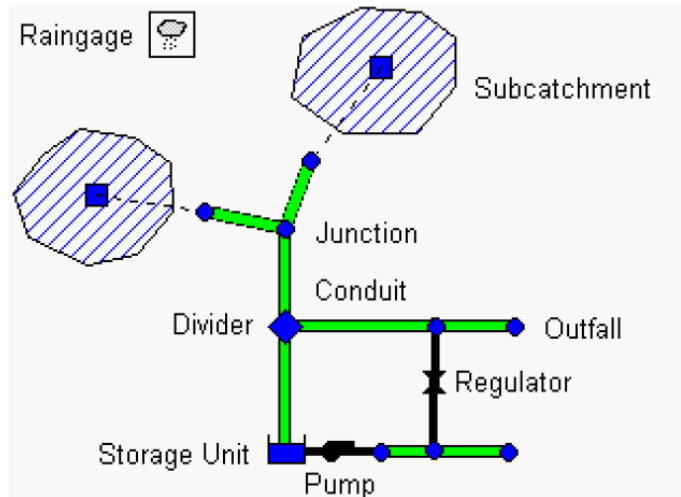


Figure B-2 : Représentation d'un bassin de drainage dans SWMM  
(tiré de Rossman, 2004)

L'écoulement en conduite et dans les canaux est modélisé dans SWMM à l'aide des équations de Barré de St-Venant, valides pour des écoulements non permanents et graduellement variés, qui représentent :

1- la conservation de la masse le long de l'écoulement : équation de continuité (équation A-4)

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{dA}{dt} = 0 \quad (\text{A-4})$$

et

2- la conservation de l'énergie le long de l'écoulement : équation dynamique (équation A-5)

$$g \frac{dh}{dx} + v \frac{dv}{dx} + \frac{dv}{dt} = g(S_0 - S_f) \quad (\text{A-5})$$

où :  $Q$  = débit,  $A$  = section d'écoulement,  $x$  = distance,  $t$  = temps,  $g$  = accélération gravitationnelle,  $h$  = hauteur d'eau,  $v$  = vitesse,  $S_0$  = pente du fond,  $S_f$  = pente de la ligne d'énergie calculée à l'aide de la formule de Manning (équation A-2) (Telliez, 2010).

Ce modèle propose trois options pour simuler l'écoulement en conduites et en canaux :

1) modèle de translation simple en régime permanent uniforme, qui considère que le débit entrant est égal au débit sortant et que l'écoulement ne subit aucune variation dans le temps ni

dans l'espace. Ce modèle est utilisé pour les évaluations préliminaires seulement; 2) modèle d'onde cinématique, qui néglige les termes d'inertie ( $vdv/dx=dv/dt=0$ ) et suppose que la pente de la surface libre est égale à la pente du radier ( $dh/dx=0$ ) dans l'équation dynamique. Il ne permet pas de simuler les écoulements en charge et les refoulements, l'écoulement en réseau maillé ni le stockage en réseau; et 3) modèle d'onde dynamique, qui résout les équations complètes de Barré de St-Venant. Ce dernier est le plus précis des trois, car il simule tous les types d'écoulement, même pour un réseau maillé, et considère le stockage en réseau et hors réseau (Rivard, 2013; Telliez, 2010).