

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DE LA DÉGRADATION HYDRAULIQUE ET STRUCTURALE  
DES RÉSEAUX SANITAIRES ET PLUVIAUX

ILHAM ENNAOURI

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2010



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
ISBN: 978-0-494-70512-4  
*Our file* *Notre référence*  
ISBN: 978-0-494-70512-4

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

  
**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DE LA DÉGRADATION HYDRAULIQUE ET STRUCTURALE  
DES RÉSEAUX SANITAIRES ET PLUVIAUX

Présenté par : ENNAOURI Ilham

En vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. LECLERC Guy, Ph. D, président

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. TARDIF Isabel, M.G.P, membre

## DÉDICACE

*Ce mémoire est dédié à l'âme de mon cher père Arbi Ennaouri, source de mon inspiration dans la vie, à ma chère mère Zahra Khaider pour son soutien incroyable durant la période de rédaction qui a coïncidé avec mon accouchement, à mes frères et sœurs.*

*Je dédie aussi ce travail à mon grand amour et cher mari Abdellah Ramdani qui m'a toujours encouragée dans mes études et m'a préparé le climat favorable d'avancement.*

*Ce mémoire est aussi dédié à mon adorable bébé Mohamed-Hachem qui a supporté des moments difficiles de stress et d'angoisse durant la grossesse. Pardon mon amour pour ce que je t'ai fait subir.*

## REMERCIEMENTS

À l'occasion du présent travail de maîtrise, je désire remercier toutes les personnes qui m'ont apporté un soutien durant toute cette période des études.

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de projet le professeur Fuamba Musandji de l'École Polytechnique de Montréal d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherche, de faire confiance à mes compétences et de m'offrir une grande autonomie. Je le remercie aussi pour son encadrement et pour son expertise.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Michel Brodeur, responsable du service du Génie de la ville de Saint-Hyacinthe pour sa disponibilité et son écoute et conseil. Je remercie aussi Monsieur Bertrand Viens pour ses efforts considérables dans la collecte des données nécessaire à la validation de mon travail.

J'adresse aussi mes remerciements aux responsables des municipalités partenaires du projet, Monsieur Jean-Paul Landry et madame Annie Fortier du service des travaux publics de la ville de Dorval, Monsieur Alain Renaud du service d'ingénierie de la ville de Gatineau.

Je tiens également à remercier tous les employés du département CGM de l'École Polytechnique ainsi qu'à mes collègues : Mauricio, Alain, Batchabani, Samba, Nicolas, Aziz, Fatima, Majdala, Mariem.

Un grand merci à mon cher mari et mon adorable bébé de m'avoir supportée durant toute la période de rédaction et pour les nuits blanches qu'on a passé ensemble.

Finalement, je remercie l'Association des Ingénieurs Municipaux du Québec (AIMQ) et l'Association des Professeurs de l'École Polytechnique (APEP) pour m'avoir accordé leur bourse d'excellence.

## RÉSUMÉ

Cette recherche a pour but de développer un modèle d'évaluation de l'état global des conduites d'égouts en considérant plusieurs facteurs de dégradation liés au fonctionnement du réseau, à la conduite elle-même ou à l'environnement du réseau. Pour intégrer les deux critères hydraulique et structural de la dégradation, 15 facteurs influençant la dégradation ont été identifiés et considérés dans cette recherche. La méthode AHP a été utilisée pour tenir compte de l'importance relative entre facteurs par le calcul du poids de chaque facteur.

Le modèle proposé a été testé pour évaluer l'état actuel des conduites sélectionnées sur le réseau d'égout de la ville de St-Hyacinthe. Une analyse de sensibilité a été réalisée afin de déterminer l'effet de l'importance relative entre le critère hydraulique et le critère structural sur l'évaluation de l'état d'une conduite donnée. Les résultats de cette analyse ont montré que le critère hydraulique doit être considéré dans le même ordre d'importance que le critère structural dans le processus d'évaluation de l'état.

Ainsi, le modèle développé constitue un outil simple à utiliser dans les municipalités. Il assistera les gestionnaires des réseaux d'égout dans l'élaboration de leur plan d'intervention et leur permettra par conséquent de garder leurs réseaux en bon état.

## **ABSTRACT**

The aim of this study was to develop a condition assessment model for sewer and storm water pipelines. To integrate both hydraulic and structural aspects of degradation, a set of 15 specific influencing factors was identified and considered in this model. The analytic hierarchy process (AHP) method was used to express the relative importance of these factors. The proposed model was successfully tested to assess the current state of degradation of a representative sample of pipes selected from the sewer network of the city of Saint-Hyacinthe in Canada.

A sensitivity analysis was performed to determine the effect of the relative importance between hydraulic and structural criteria on the state assessment of a given pipe. Results from this analysis indicate that the hydraulic criterion should be considered with the same importance as the structural criterion in the degradation assessment process.

This model constitutes a useful tool for researchers and municipal engineers to improve their intervention plan by integrating the hydraulic criterion.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs de l'étude .....	2
1.3 Méthodologie .....	3
1.4 Organisation générale du mémoire .....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5



2.1	Généralités.....	5
2.1.1	Définition d'un réseau d'assainissement.....	5
2.1.2	Définition de la dégradation d'un réseau .....	6
2.1.3	Types de dégradation .....	6
2.1.4	Types des interventions sur un réseau.....	7
2.2	État des lieux de la dégradation des réseaux d'assainissement au Québec.....	8
2.3	Problématique de la mise en contexte du plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'égout au Québec (MAMROT, 2005).....	10
CHAPITRE 3 MODÈLE D'ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION DES CONDUITES D'ÉGOUT.....		11
3.1	Modèles théoriques .....	11
3.1.1	Modèle de Bengassem (2001).....	11
3.1.2	Modèle de Reyna (1993).....	15
3.1.3	Autres modèles.....	18
3.2	Modèles et directives pratiqués au Québec.....	19
3.2.1	Plan d'intervention de MAMROT .....	19
3.2.2	Modèle de WRc.....	24
3.2.3	Modèle de NASSCO (USA) .....	27
3.2.4	Modèle de CERIU.....	27
3.3	Limitations des modèles existants.....	28
CHAPITRE 4 L'ANALYSE MULTICRITÈRE ET APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP.....		31
4.1	Aide à la décision .....	31
4.1.1	L'analyse multicritère .....	31

4.1.2	Terminologie de base et approches de l'AMC.....	32
4.1.3	Comparaison des méthodes.....	34
4.1.4	Domaines d'application.....	35
4.1.5	Processus d'analyse hiérarchique (AHP).....	36
4.1.6	Justification de choix de la méthode.....	37
CHAPITRE 5 CHOIX DES FACTEURS DE LA DÉGRADATION.....		38
5.1	Objectif général.....	38
5.2	Schéma fonctionnel du projet.....	38
5.3	Choix des facteurs de la dégradation.....	38
5.4	Système de notation des facteurs de la dégradation.....	40
CHAPITRE 6 ARTICLE 1: MODELING OF HYDRAULIC AND STRUCTURAL DEGRADATION OF SEWE AND STORM WATER PIPELINES.....		44
6.1	Abstract.....	45
6.2	Introduction.....	45
6.3	Literature review.....	46
6.4	Factors influencing the sewer degradation process.....	46
6.5	Types of degradation and common approaches.....	47
6.6	Methodology.....	50
6.6.1	Objectives of the study.....	50
6.6.2	Description of the model algorithm.....	51
6.7	Development of the degradation model.....	52

6.7.1	Description of the calculation steps .....	53
6.8	Case study: City of Saint-Hyacinthe .....	63
6.8.1	Description of the existing sewer system .....	63
6.8.2	Degradation assessment for selected pipes .....	64
6.8.3	Result analysis .....	67
6.9	Sensitivity analysis .....	68
6.10	Presentation of the interface developed .....	70
6.11	Conclusion and recommendations .....	71
CHAPITRE 7 CONCLUSION .....		73
BIBLIOGRAPHIE .....		76

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Lecture des notes $N_{ij}$ (Adapté de Bengassem, 2001).....	13
Tableau 3.3 : Indicateurs et pointage de l'état de dégradation des conduites d'égout.....	21
Tableau 3.4: Exemple de détermination de la cote d'état global d'un segment de conduite d'égout .....	22
Tableau 3.5 : Exemple de Plan d'intervention .....	23
Tableau 3.6 : Classification des défauts d'un réseau d'égout (WRc, 2004) .....	25
Tableau 3.7 : Classification des catégories de condition du réseau .....	26
Tableau 3.8 : Classification de l'état de dégradation dans le protocole de CERIU .....	28
Tableau 3.9 : Contributions et limitations de modèles d'évaluation de la dégradation .....	29
Tableau 4.1 : Terminologie de l'analyse multicritère .....	32
Tableau 4.1 : Classement des problématiques .....	33
Tableau 4.2 : Comparaison des méthodes AHP, MAUT et ÉLECTRE.....	35
Tableau 4.3 : Comparaison des méthodes AHP, MAUT et ÉLECTRE.....	35
Tableau 4.4 : Exemples d'application de l'AMC.....	36
Tableau 4.5 : Avantages et inconvénients de la méthode AHP .....	37
Tableau 5.1 : facteurs de la dégradation des conduits d'égout utilisés dans des recherches antérieures (adapté de Chughtai and Zayed (2008)) .....	39
Tableau 5.2. Facteurs de la dégradation considérés dans le modèle développé.....	40

Tableau 5.3 : Système de notation des facteurs de la dégradation structurale .....	42
Tableau 5.4 : Système de notation des facteurs de la dégradation hydraulique.....	43
Table 6.1: Sewer pipe degradation factors considered in previous studies (adapted from Chughtai and Zayed 2008).....	47
Table 6.3: Numerical scale of AHP .....	55
Table 6.4: Pairwise comparaison matrixes.....	56
Table 6.5: Random inconsistency indices (RI) .....	58
Table 6.6: Weights of factors and sub factors.....	59
Table 6.7: Scoring categories for Structural factors.....	61
Table 6.8: Scoring categories for hydraulic factors .....	62
Table 6.9: State of degradation .....	63
Table 6.10: Characteristics of Selected pipes.....	64
Table 6.11: Hierarchical organization of the structural degradation.....	65
Table 6.12: SDD for the selected pipes ( <sup>a</sup> Reference year: 2009).....	66
Table 6.13: SHD for the selected pipes.....	66
Table 6.14: State of degradation of selected pipes.....	67
Table 6.15: Comparison of results .....	68
Table 6.16: Sensitivity analysis.....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Répartition du réseau d'égout selon l'âge des conduites (Bennis, 2008) .....	9
Figure 2.2: Répartition du réseau d'égout selon le type de matériau des conduites .....	9
Figure 3.1: Système d'inférence flou (Bengassem, 2001) .....	14
Figure 3.2: Système d'évaluation de la performance globale .....	14
Figure 3.3: L'évaluation de l'indice de la condition hydraulique (HCI) .....	16
Figure 3.4 : Facteurs influençant les dégradations structurale et opérationnelle .....	18
Figure 3.5 : Démarche pour élaborer un plan d'intervention (MAMROT, 2005) .....	19
Figure 3.6 : Système de codage de défaut .....	25
Figure 3.7 : Subdivision de la section de conduite d'égouts selon CERIU (Chughtai, 2007) .....	27
Figure 4.1 : Approches et méthodes de l'AMC (Mayster et al. 1994) .....	34
Figure 6.1: Models of the condition assessment of deteriorating pipes .....	49
Figure 6.2: Functional block diagram of this research .....	50
Figure 6.3: Model algorithm .....	51
Figure 6.4: Hierarchical structure by AHP .....	54
Figure 6.5 : Graphic interface .....	70

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMC	Analyse MultiCritère
CCI	Combined Condition Index
CCTV	Closed-Circuit TeleVision
CNRC	Conseil National de Recherches du Canada
DSET	Digital Scanning and Evaluation Technology
ECE	Évaluation de la condition Extrinsèque
ECI	Évaluation de la Condition Intrinsèque
ER	Effet de Refoulement
FLF	Flood Length Factor
GPR	Penetrating Radar
INRS	Institut National de la recherche Scientifique
MAMROT	Ministère des Affaires Municipales, des Régions et Occupation du Territoire
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
MDF	Maximum to Design Factor
MSCC	Manual of sewer Condition Classification
RR	Responsabilité Relative

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Les réseaux d'égout sont constitués d'un ensemble de composantes hydrauliques comprenant des conduites, des regards, des puisards, des stations de pompage, des bassins de rétention et de différents ouvrages de contrôle. Leur mission est la collecte et l'évacuation adéquate des eaux usées vers une station de traitement ou vers un lieu de déversement approprié (Bengassem, 2001).

Un réseau d'égout doit satisfaire les conditions suivantes :

- ✓ Éliminer les eaux usées domestiques et industrielles pour assurer l'hygiène publique ;
- ✓ Évacuer de façon adéquate les eaux pluviales pour éviter l'inondation, surtout en temps de pluie, et assurer par conséquent la sécurité des citoyens.

A cet effet, les municipalités, en tant que gestionnaire de leurs réseaux, doivent mettre en place un plan de gestion des interventions pour maintenir le réseau en bon état et prévoir les moyens financiers et les choix techniques de réhabilitation.

La dégradation ou la défaillance des réseaux d'égout devient une grande problématique pour la plupart des municipalités au Québec, surtout que les sources de cette défaillance sont souvent mal déterminées. En effet, plus du tiers du réseau d'aqueduc municipal est vétuste : 1500 km de conduites ayant besoin d'être réhabilités ou remplacés. Quant au réseau d'égouts, 1600 km de conduites présentent des défaillances structurales.

Parmi les causes éventuelles des dysfonctionnements, on peut citer les crues critiques pouvant mettre en surcharge partiellement ou totalement des réseaux en entraînant une diminution de la performance hydraulique et/ou structurale de ces réseaux marquée par des défauts de structure. L'identification ou la quantification de l'ampleur de ces causes restent difficiles à évaluer.

Afin de vérifier l'état structural de ces infrastructures, plusieurs municipalités planifient des opérations d'inspection sur le réseau par la technologie des inspections télévisées (CCTV). Cette inspection reste très onéreuse ce qui limite leur étendue. Le besoin en financement, la



planification des interventions et le bon diagnostic de l'état de dégradation des égouts sont des enjeux qui doivent tenir en compte pour assurer aux citoyens un bon service.

Pour palier à ces contraintes de financement, il est primordial de développer, au niveau de chaque municipalité, une méthodologie globale de planification des interventions pour une gestion durable. En 2005, le ministère des affaires municipales et des régions (MAMROT) a proposé un guide pour suivre et encadrer les démarches des municipalités dans l'élaboration de leur propre plan d'intervention sur le réseau. L'élaboration de ce plan est devenue indispensable pour bénéficier du financement.

Deux protocoles d'évaluation de la condition d'état des égouts sont les plus utilisés au Québec: celui du centre d'Expertise et de la recherche en Infrastructure urbaine (CERIU) et celui de Water Research Centre (WRC).

La diversité des protocoles et pratiques d'évaluation de l'état de dégradation des égouts au Québec oblige une uniformisation afin d'établir un niveau commun de connaissances dans toutes les municipalités.

## **1.2 Objectifs de l'étude**

L'objectif principal de ce projet de recherche consiste à développer un modèle d'évaluation de l'état de dégradation hydraulique et structurale des conduites des réseaux sanitaire et pluvial. Cet objectif peut être subdivisé aux objectifs spécifiques suivants :

- 1- Identifier les facteurs de la dégradation;
- 2- Établir un algorithme de calcul de pondération de chaque facteur et de classification de l'état de dégradation hydraulique et structurale;
- 3- Développer un outil informatique basé sur le modèle proposé pour faciliter l'exploitation du modèle et son éventuelle exploitation par les municipalités sur des cas réels de dégradation de leurs réseaux d'égout.

### **1.3 Méthodologie**

La méthodologie de la présente recherche est définie en 5 étapes. Ce sont :

- 1- Revue de littérature;
- 2- Identification des facteurs de la dégradation;
- 3- Établissement de l'algorithme de calcul;
- 4- Développement du modèle d'évaluation de l'état structural et hydraulique des égouts;
- 5- Élaboration d'une interface informatique basée sur le modèle développé.

### **1.4 Organisation générale du mémoire**

Le présent mémoire est subdivisé en 7 chapitres. Le premier est cette introduction.

Le chapitre 2 est consacré à une revue de littérature relative à la dégradation des conduites d'égout et à l'état des lieux de la dégradation des réseaux d'assainissement au Québec. Elle définit le rôle d'un réseau d'égout, le phénomène de la dégradation des conduites ainsi que les types d'interventions appropriées pour corriger les dysfonctionnements apparus sur le réseau.

Le chapitre 2 englobe aussi la problématique de la mise en contexte du plan d'intervention pour le renouvellement de ces réseaux, d'où l'importance de détailler la méthodologie employée dans les différents modèles et/ou protocoles existants.

Les modèles théoriques ainsi que les approches courantes au Québec sont détaillés dans le chapitre 3. La méthodologie proposée dans ce mémoire est présentée, elle fait appel à la méthode AHP. Une introduction à l'AMC et la méthode AHP est donné dans le chapitre 4.

Le chapitre 5 décrit le modèle développé, il présente le schéma fonctionnel du projet ainsi que la justification des facteurs de dégradation considérés dans le modèle et le système de notation.

Le chapitre 6 est présenté sous forme d'article scientifique soumis au journal Water Resources Planning and Management de l'ASCE (American Society of Civil Engineering). Il présente la revue critique de la littérature des modèles d'évaluation de la dégradation des conduites d'égout, les objectifs de la présente recherche, la méthodologie adopté ainsi que les résultats obtenus. Une

étude de cas sur le réseau de la ville de Saint-Hyacinthe est incluse dans cette partie ainsi que l'analyse de sensibilité du modèle développé.

Une discussion générale est présentée au chapitre 7 avant la conclusion finale et les recommandations.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Généralités

#### 2.1.1 Définition d'un réseau d'assainissement

Les réseaux d'égout sont constitués d'un ensemble de composantes hydrauliques comprenant des conduites, des regards, des puisards, des stations de pompage, des bassins de rétention et de différents ouvrages de contrôle. Leur mission est la collecte et l'évacuation adéquate des eaux usées vers une station de traitement ou vers un lieu de déversement approprié (Bengassem, 2001).

Un réseau d'égout doit répondre, dans son fonctionnement, à deux objectifs :

- ✓ Éliminer les eaux usées domestiques et industrielles pour assurer l'hygiène publique ;
- ✓ Évacuer de façon adéquate les eaux pluviales pour éviter l'inondation, surtout en temps de pluie, et assurer par conséquent la sécurité des citoyens.

En premier lieu, ces eaux sont captées et évacuées par le réseau. Puis, elles sont acheminées vers une station de traitement à l'aval du bassin. La station est conçue avec une capacité donnée, de telle sorte que le surplus subit un déversement par des déversoirs d'orage appelé CSO (Combined Sewer Overflow) pour un système unitaire, et SSO (Storm Sewer Overflow) pour un système pluvial (Bennis, 2008).

Les différents types de réseaux d'égout sont énumérés et regroupés comme suit (Brière, 2000) :

*Le réseau d'égout sanitaire* : appelé souvent réseau d'égouts domestique ou séparatif, un réseau d'égouts sanitaire transporte les eaux usées d'origine domestique, les eaux provenant des ICI (institutions, commerces et industries) et certaines eaux dites parasites;

*Le réseau d'égout pluvial* : destiné à canaliser les eaux de ruissellement, lesquelles résultent essentiellement des pluies et de la fonte des neiges. Ces eaux sont déversées dans le cours d'eau récepteur sans traitement;

*Le réseau d'égout unitaire* : c'est un réseau qui canalise toutes les eaux usées du territoire qu'il dessert, d'origine domestique, pluviale, industrielle ou commerciale. Vu que les débits pluviaux maximaux sont beaucoup plus importants que les débits maximaux domestiques, on ne tient pas compte de ces derniers quand on calcule les dimensions d'un réseau unitaire. Actuellement, ce type de réseau est interdit au Québec car il rend l'épuration des eaux d'égout plus difficile et très coûteuse;

*Réseau d'égouts pseudo-séparatif* : appelé aussi pseudo-domestique, c'est un réseau qui reçoit les eaux usées d'origine domestique et certaines eaux pluviales, soit celles provenant des drains de fondation, des drains de toits plats et des entrées de garage situées sous le niveau du sol. Ce sont principalement les habitations situées près des cours d'eau et des lacs qui pourraient être touchées en périodes de hautes eaux.

### **2.1.2 Définition de la dégradation d'un réseau**

Un réseau d'assainissement est dit dégradé lorsqu'il est incapable d'assurer les conditions nécessaires à la réalisation des objectifs qui lui sont assignés. C'est une quantification de l'écart entre l'état réel (performance actuelle) et l'état prévu (performance optimale) (Bengassem, 2001).

### **2.1.3 Types de dégradation**

La dégradation d'un réseau d'égout peut être définie comme étant son incapacité à évacuer les eaux sanitaires et pluviales sans surcharge hydraulique, avec un certain impact sur l'environnement et la conservation de la bonne intégrité structurelle (Tabesh et al, 2006). Il est à noter qu'il y a trois types de dégradation :

*Dégradation hydraulique* : C'est l'incapacité de l'égout à transporter le débit de conception sans dommages à la propriété. Un tronçon est dit défaillant quand il n'est plus capable d'évacuer adéquatement le débit de design pluvial et sanitaire. Même, il suffit parfois qu'un tronçon soit défaillant pour juger le dysfonctionnement de l'ensemble du réseau. En effet, une surcharge observée au niveau d'une conduite peut être causée par elle-même ou/et par autres conduites en aval.

Cette dégradation se manifeste par les inondations suite à l'augmentation des débits de ruissellement, l'augmentation de la rugosité par usure ou excentricité des joints et la présence d'obstacles et de sédiments par manque d'entretien.

*Dégradation structurale* : Représente en général le mauvais état physique d'un tronçon de conduite. Le réseau d'égout est compté parmi les infrastructures souterraines, se mettant en contact d'une façon permanente par ces différents composantes (conduites, collecteur, intercepteur, émissaire, etc.) avec le milieu environnant. L'état du sol constituant l'assise de la conduite est très important, car il lui constitue un soutien latéral. La sollicitation des charges statiques permanentes et les charges dynamiques, liées au trafic routier, fait aussi partie du milieu environnant. L'ensemble de ces facteurs associé au vieillissement du réseau et la qualité de maintenance représentent les causes de la dégradation structurale. Cette dernière, peut aussi influencer la stabilité du réseau et son fonctionnement ainsi qu'occasionner des problèmes d'infiltration et d'exfiltration.

*Dégradation environnementale* : La dégradation environnementale la plus commune est le déversement des eaux unitaires par les déversoirs d'orage en temps de pluie: CSO (Combined Sewer Overflow). Il se manifeste quand la fréquence annuelle des déversements (sans traitement) dépasse largement la valeur prescrite par le MAMROT (4 débordements par an).

### **2.1.4 Types des interventions sur un réseau**

Pour maintenir le réseau d'égout dans un état acceptable selon la qualité du service souhaité, il faut intervenir durant la durée de vie de l'ouvrage. Cette intervention peut se déterminer par des actions d'entretien, de maintenance (préventive ou corrective) ou de réhabilitation. L'entretien (nettoyage des conduites, enlèvement des débris, curage, etc.) est un ensemble d'interventions primordiales, qui doivent se faire périodiquement pour limiter la progression de certaines dégradations.

La maintenance préventive permet de s'assurer en permanence de la performance fonctionnelle prévue du réseau. Par contre, la maintenance corrective consiste à prévoir et évaluer les risques

en utilisant des moyens de diagnostics approfondis (inspection par caméra, prises de mesure de débit, etc.).

La réhabilitation d'un réseau d'égout est définie comme étant une modification physique du système ou son mode d'opération pour atteindre un ou plusieurs des objectifs suivants : (1) Améliorer la performance structurale ; (2) améliorer la performance hydraulique ; (3) améliorer la performance environnementale ; (4) réduire les coûts d'exploitation et d'entretien et (5) prolonger la durée de vie utile des équipements.

## **2.2 État des lieux de la dégradation des réseaux d'assainissement au Québec**

Selon le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 92 % de la population du Québec dans plus de 900 municipalités sont branchés sur un réseau d'égout. Mais le raccordement à une station d'épuration n'est pas assuré pour l'ensemble. Les conduites d'égouts sont relativement jeunes (Figure I.1) et la majorité des conduites d'égouts est constituée de béton et le reste est soit en grès, en ciment-amiante ou encore en PVC (Figure 1.2).

Dans une enquête menée par l'INRS sur les défaillances de fonctionnement des réseaux d'égouts, on relève que juste 2% de la longueur totale des réseaux seraient sérieusement handicapés par des problèmes de refoulement et 4 % subiraient une infiltration excessive. La pertinence de ce résultat d'enquête reste limitée car l'étude n'a visé que la petite portion du réseau inspectée et l'état du restant n'étant pas bien connu ou jamais inspecté.

Le taux actuel de renouvellement du réseau défaillant reste médiocre car ne dépassant pas 0.25 % par an. Par contre, l'engagement n° 43 de la politique nationale de l'eau incite l'ensemble des municipalités québécoises à atteindre un taux de 1 % d'ici 2012, équivalents à un renouvellement complet de tout le réseau dans 100 ans (MAMROT, 2005).

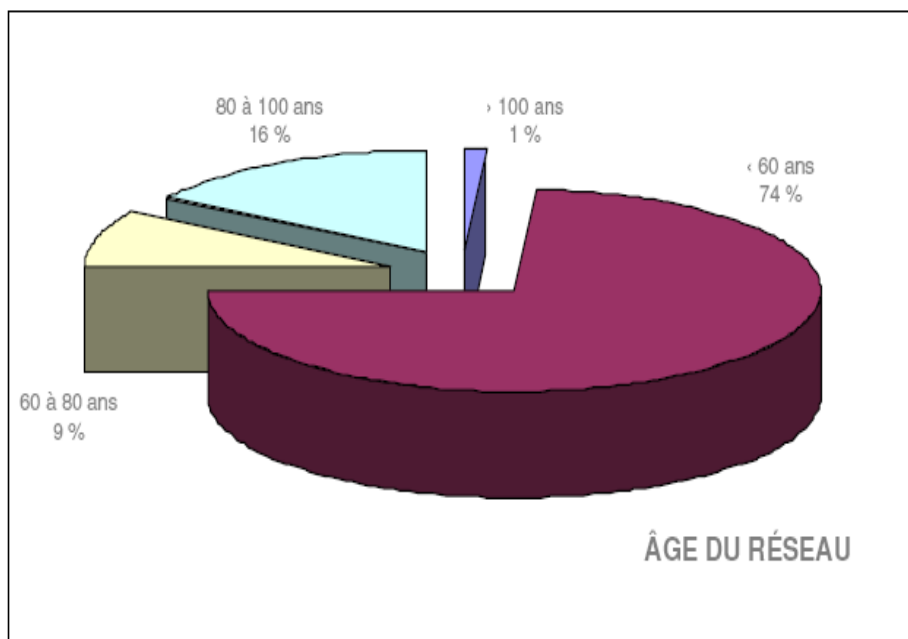


Figure 2.1 : Répartition du réseau d'égout selon l'âge des conduites (Bennis, 2008)

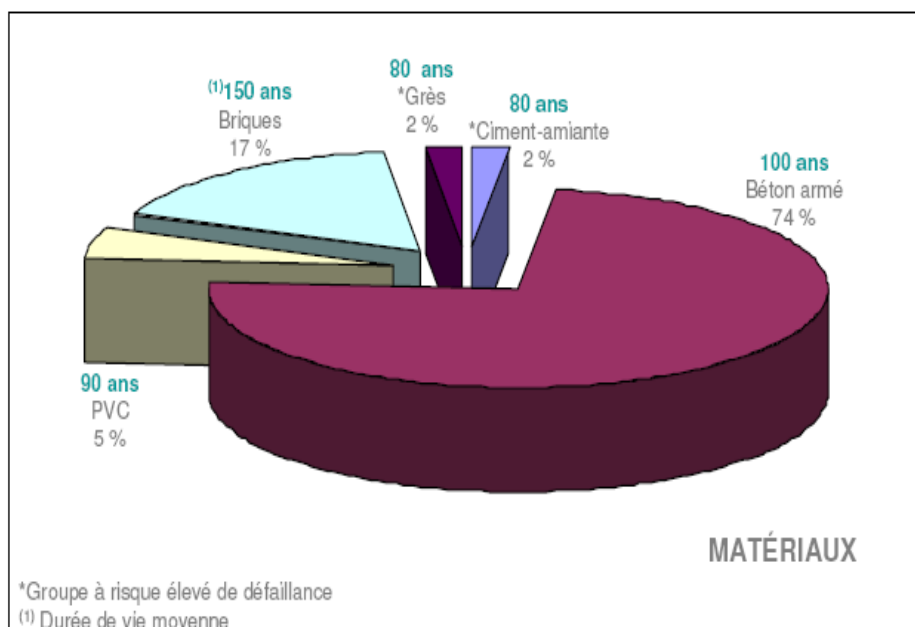


Figure 2.2: Répartition du réseau d'égout selon le type de matériau des conduites



### **2.3 Problématique de la mise en contexte du plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'égout au Québec (MAMROT, 2005)**

« Pour soutenir la vie de la collectivité, il est essentiel de bien connaître les réseaux existants de façon à pouvoir les exploiter, les entretenir et les agrandir efficacement. Cela est particulièrement vrai de nos jours alors que les ressources, tant humaines que financières, sont limitées » (CNRC, 2004).

Pour palier à ces contraintes, il est primordial de développer une méthodologie globale de planification des interventions pour une gestion durable. Jusqu'à maintenant, il n'existe pas une méthodologie uniformisée sur l'ensemble des municipalités et les firmes d'ingénierie au Québec. En effet, il y a toute une panoplie d'outils de diagnostic qui ne sont pas cohérents dans leur ensemble : on cite principalement l'infra guide élaboré par le Conseil National de Recherches du Canada (CNRC, 2004), les règles de l'art dans le domaine, le récent plan d'intervention proposé par le MAMROT et plusieurs protocoles développés par des firmes ou organisations.

Selon une enquête sur les pratiques courantes en usage dans plus de 150 municipalités canadiennes réalisée en 2001 par la Fédération Canadienne des Municipalités et le Conseil National de Recherches du Canada, il n'existe pas une pratique uniforme dans la gestion des eaux usées. En effet, un grand pourcentage des municipalités participantes à l'enquête n'exerce aucune activité de diagnostic et 15% d'eux ne stockait même pas les données sur leurs réseaux (MAMROT, 2005). D'où l'importance de réunir les forces entre les municipalités, les ministères ainsi que les décideurs et les chercheurs pour aboutir à un plan de gestion adéquat du réseau.

En novembre 2002, le gouvernement du Québec a adopté la Politique nationale de l'eau à la lumière d'une volonté mondiale afin de mieux encadrer la gestion, la restauration et la mise en valeur de cette source vitale. Parmi ces engagements, le gouvernement vise l'objectif suivant :

« Inciter l'ensemble des municipalités à atteindre un taux de renouvellement de leurs réseaux de 0.8 % par année d'ici 2007 et de 1 % d'ici 2012. ». D'où l'importance de mettre à la disposition des municipalités et les firmes de conseils un guide de plan d'intervention des réseaux d'égout (MAMROT, 2005).

## CHAPITRE 3    MODÈLE D'ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION DES CONDUITES D'ÉGOUT

Il existe un certain nombre de systèmes de notation de l'état d'un égout. Le Water Research Centre (WRC), la Water Environment Fédération (WEF)/American Society of Civil Engineers (ASCE) et le Conseil National de Recherches du Canada (CNRC) ont tous publié un manuel ou des lignes directrices en rapport avec l'examen et l'évaluation des réseaux d'égout.

### 3.1 Modèles théoriques

Dans le cadre de la recherche scientifique, on s'intéresse à élaborer des modèles d'évaluation de l'état des égouts en mettant l'accent dans certains sur l'intégration des contraintes des coûts de réhabilitation ou de financement qui sont de plus en plus insuffisantes, et d'autres sur l'influence du choix de la méthode de réhabilitation sur le niveau de l'amélioration de l'état et peu qui ont essayé d'intégrer la dégradation hydraulique dans leur indice d'état globale du réseau.

#### 3.1.1 Modèle de Bengassem (2001)

##### *But du modèle*

Bengassem a proposé un modèle alliant les deux aspects : hydraulique et structural. Il consiste à évaluer la performance hydraulique d'un tronçon selon les critères suivants :

- la capacité hydraulique des tronçons;
- la fréquence des mises en charge et leur durée;
- les volumes débordés;
- la durée de débordement;
- l'étendue des débordements dans l'espace;
- l'importance stratégique des zones touchées.

##### *Contexte*

Le modèle a été appliqué sur le réseau d'égout de la ville de Montréal.

### ***Développement***

L'état global d'un tronçon donné est évalué à partir de deux indices : indice de la performance hydraulique et indice de la performance structurale.

L'indice de la performance hydraulique est basé sur trois entrées : RR (Responsabilité Relative), ER (Effet de Refoulement) et VS (Vulnérabilité du Site).

L'indice de la performance structurale est caractérisé par trois aspects :

1. L'aspect structural intrinsèque (curatif). C'est l'ensemble des dysfonctionnements relevés lors l'auscultation;
2. l'aspect structural extrinsèque (préventif). C'est l'influence des facteurs de présomption de risque sur le taux de dégradation;
3. La localisation spatiale. Elle exprime la situation stratégique du tronçon par rapport à l'ensemble du réseau, la vulnérabilité du site à l'environnement entourant et l'occupation du sol.

L'évaluation des facteurs RR et ER se base sur le calcul d'une cote noté  $N_i$  selon la formule suivante:

$$N_i = N_{\min} + (N_{\max} - N_{\min}) \left[ 1 - \left( \frac{PR_i - H_i}{PR_i} \right) \right] \quad (3.1)$$

$N_i$  : La cote du tronçon  $i$ , comprise entre  $N_{\min}$  et  $N_{\max}$  ;

$H_i$  : La hauteur de mise en charge maximale dans le regard amont du tronçon  $i$  calculée à partir de l'équation (3.1);

$PR_i$  : La profondeur d'enfouissement du tronçon  $i$  mesurée à partir de sa couronne amont.

L'écoulement à surface libre correspond à une hauteur de mise en charge  $H_i = 0$ , et la note sera donc minimale  $N_{\min} = 0$ . Par contre, si  $H_i = PR_i$ , la hauteur de mise en charge atteint la surface du sol et la note attribuée dans ce cas est maximale  $N_{\max} = 1$ . Pour un état intermédiaire, la note  $N_i$

représente le degré de mise en charge exprimé en pourcentage de profondeur d'enfouissement au regard amont.

À partir de ces cotes  $N_i^j$ , on établit une matrice pour évaluer les paramètres RR et ER (Tableau 3.1).

**Tableau 3.1: Lecture des notes  $N_{ij}$  (Adapté de Bengassem, 2001)**

Conduites	Conduite 1	Conduite 2	Conduite i	Conduite i+1	Conduite n-1	Conduite n	RR
Conduite 1	$N_1^1$	$N_1^2$	$N_1^i$	$N_1^{i+1}$	$N_1^{n-1}$	$N_1^n$	$RR_1$
Conduite 2		$N_2^2$	$N_2^i$	$N_2^{i+1}$	$N_2^{n-1}$	$N_2^n$	$RR_2$
Conduite i			$N_i^i$	$N_i^{i+1}$	$N_i^{n-1}$	$N_i^n$	$RR_i$
Conduite i+1				$N_{i+1}^{i+1}$	$N_{i+1}^{n-1}$	$N_{i+1}^n$	$RR_{i+1}$
Conduite n-1					$N_{n-1}^{n-1}$	$N_{n-1}^n$	$RR_{n-1}$
Conduite n						$N_n^n$	$RR_n$
ER	$ER_1$	$ER_2$	$ER_i$	$ER_{i+1}$	$ER_{n-1}$	$ER_n$	

À partir de ces trois aspects, on peut classer l'état des conditions intrinsèques, extrinsèques et la vulnérabilité du site.

Un concept de base appelé « la logique flou » a été utilisé pour intégrer l'ensemble des systèmes de diagnostic hydraulique, structural et de la vulnérabilité du site.

En général, ce système est basé sur trois étapes comme la montre la Figure 3.1: L'étape de fuzzification, l'étape d'inférence (implication et agrégation) et l'étape de defuzzification.

Ce qui permet d'aboutir à un système de diagnostic global basé sur les paramètres RR (responsabilité de refoulement), ER (effet de refoulement), ECI (évaluation de la condition intrinsèque), ECE (évaluation de la condition extrinsèque) et VS (vulnérabilité du site) (Figure 3.2).

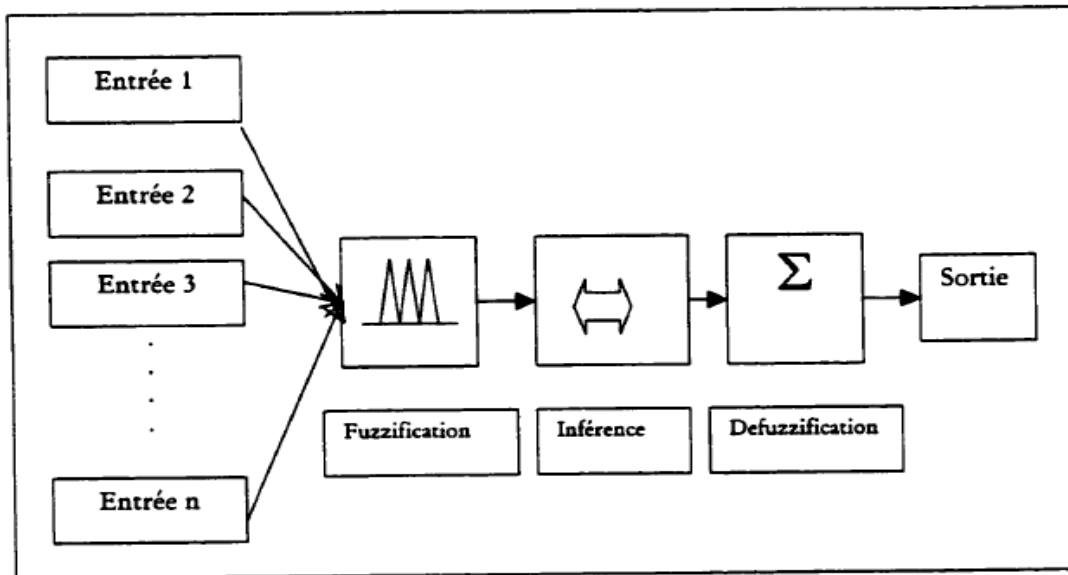


Figure 3.1: Système d'inférence flou (Bengassem, 2001)

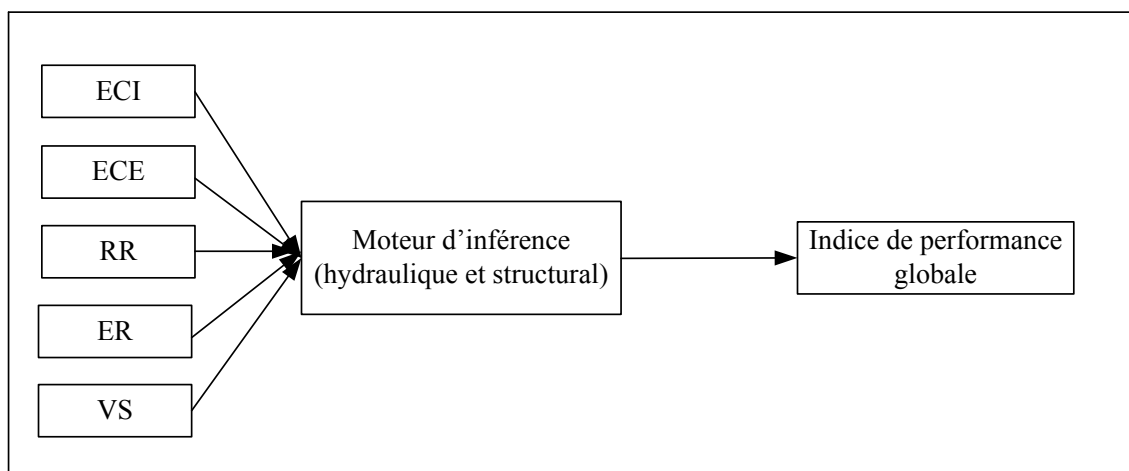


Figure 3.2: Système d'évaluation de la performance globale

### **Résultat**

5 classes de performance ont été identifiées selon la valeur de l'indice de performance globale (de 0 à 100). Les définitions de ces classes de performances sont données par le Tableau 3.2.

**Tableau 3.2 : Classes de performance**

<b>Classes de performances</b>	<b>Définition</b>	<b>Échelle numérique</b>
P1	État sans danger actuel ni potentiel	0 à 20
P2	Présentant des signes de dégradations mineurs stables ou de petites mises en charge rares et sans conséquences	20 à 40
P3	Conduite avec dégradation mineures qui peuvent évoluer	40 à 60
P4	Conduites dégradées causant du tort ou fonctionnement normal et évolue d'une manière dangereuse	60 à 80
P5	Conduites très critiques. Déficiences fonctionnelles ou structurales graves	80 à 100

### **3.1.2 Modèle de Reyna (1993)**

#### ***But du modèle***

Reyna (1993) a développé un modèle appelé MARESS (Multi-Attribute rehabilitation of sewer Systems) pour la planification à long terme de la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains.

#### ***Contexte***

Le modèle a été appliqué sur le réseau d'égout de la ville Indianapolis (USA).

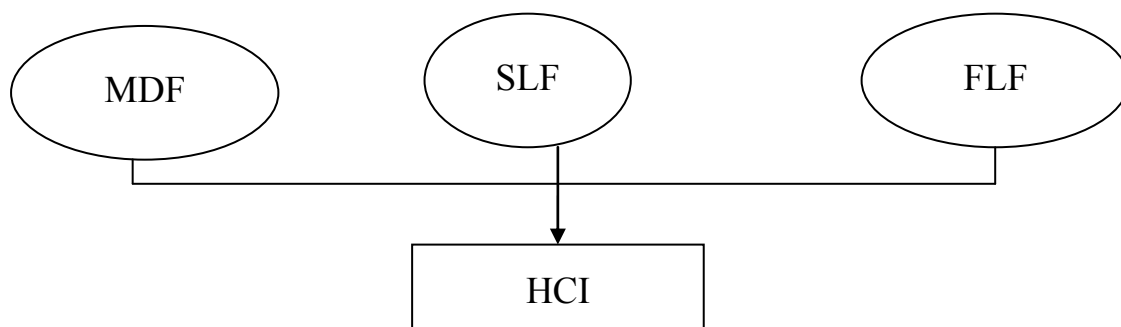
#### ***Développement***

Le modèle le Reyna détermine les fonctions de performance structurales et hydrauliques et sélectionne après les tronçons à réhabiliter selon un modèle d'optimisation. Ce dernier considère quatre fonctions objectives, deux exprimant les performances hydraulique et structurale à

maximiser et les deux autres sont liées aux coûts sociaux et aux coûts de maintenance à minimiser.

La performance hydraulique d'un réseau d'égout en déterminant trois paramètres fournis directement par le module EXTRAN de SWMM : (1) le paramètre MDF (Maximum to Design Factor) représente le rapport débit maximum transité et le débit de design ; (2) l'indice FLF (Flood Length Factor) représente le volume des eaux débordées et (3) le facteur SLF (Surcharge Length Factor) qui est la hauteur de la mise en charge.

L'indice de la condition hydraulique (HCI) est calculé par la moyenne pondérée de ces trois paramètres (Figure 3.3).



**Figure 3.3: L'évaluation de l'indice de la condition hydraulique (HCI)**

Le modèle comporte un processus d'optimisation en déterminant d'abord les fonctions de performance structurales et hydrauliques, puis on sélectionne les tronçons à réhabiliter en tenant compte des contraintes budgétaires, techniques et sociales.

L'indice de la condition hydraulique (HCI) est modifié selon l'option de réhabilitation durant ce processus d'optimisation. Cet indice est défini comme suit :

$$HCI_{i,j} = HCI_{i,0} \times \frac{D_{i,0}^{8/3} n_{i,j}}{D_{i,j}^{8/3} n_{i,0}} \quad 3.2$$

$D_i$  : Diamètre de la conduite

$n_{i,j}$  : Coefficient de Manning

$i$  : Indice de la conduite

$j$  : Indice à l'état réhabilité

$0$  : Indice à l'état sans réhabilitation

$HCI_{i,j}$  : Indice hydraulique

### ***Résultat***

Le résultat obtenu du modèle est l'état de la performance du tronçon selon le scénario de la réhabilitation choisi.

#### **3.1.2.1 Modèle de Chughtai (2007)**

##### ***But du modèle***

Chughtai a proposé un modèle permettant d'évaluer l'état actuel des égouts ainsi que les courbes de dégradation des égouts basés sur des données historiques.

##### ***Contexte***

Le modèle a été appliqué sur les réseaux de deux municipalités au Canada : Pierrefonds (Québec) et Niagara Falls (Ontario).

##### ***Développement***

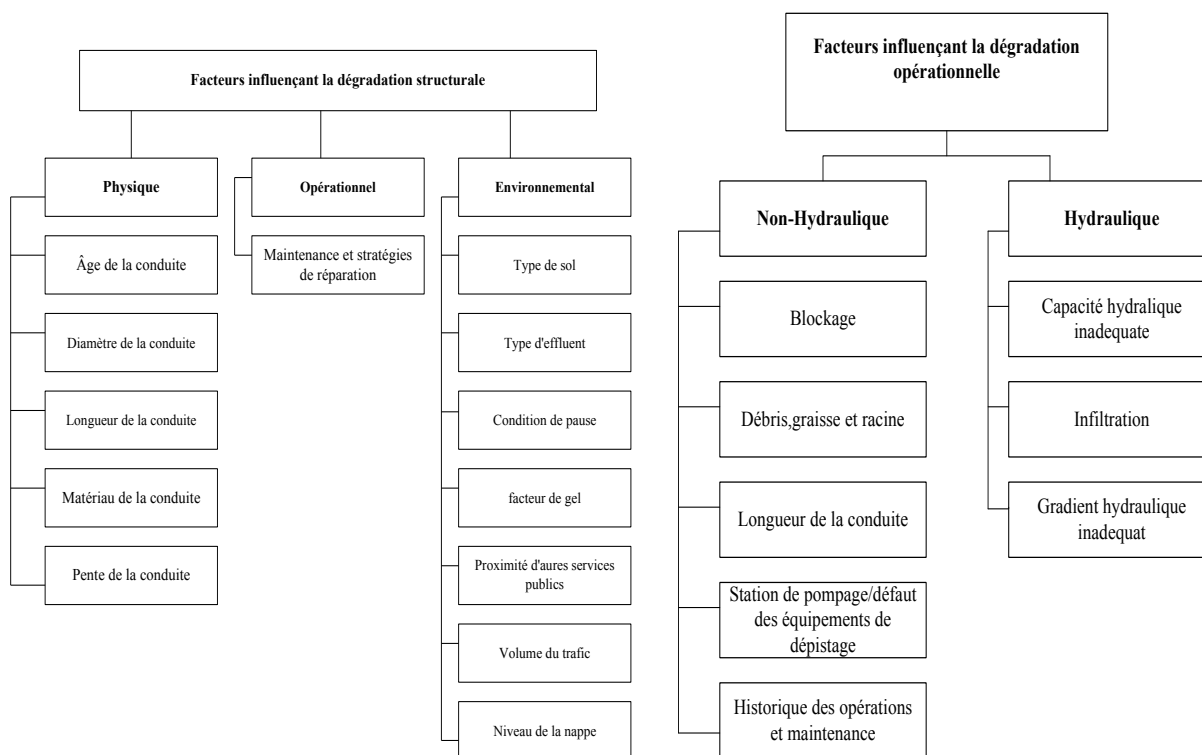
Le modèle est basé sur deux protocoles les plus utilisés au Canada (Chughtai, 2007), protocole de CERIU et celui de WRc. Le modèle permet de classer l'état de dégradation d'un tronçon en 5 classes différentes en se basant sur le protocole de CERIU après son adaptation au protocole de WRc. Il regroupe différents facteurs influençant (physiques, environnementaux et opérationnels, hydraulique ou non hydraulique) comme illustré dans la Figure 3.4.



Les classes d'état ont été définies par un indice de condition combiné (CCI) et subdivisé en 5 catégories de 1 à 5, d'un état de dégradation acceptable à un état critique. Cet indice combine les aspects structural et hydraulique.

## Résultat

État de la dégradation d'un tronçon donné noté de 1 à 5.



**Figure 3.4 : Facteurs influençant les dégradations structurale et opérationnelle**

### 3.1.3 Autres modèles

Plusieurs travaux ont été menés pour évaluer la dégradation d'un réseau d'égout. Mailhot et al. (2000) se sont basés sur une approche statistique dans la prédiction de l'état structural d'un réseau pour un horizon de 20 ans. Quant à Dae-Hyun koo et al. (2006), ils utilisent plutôt l'inspection avec GPR (Penetrating Radar) et DSET (Digital Scanning and Evaluation Technology) pour la collecte des informations sur l'état du réseau situé en Arizona.

El-Assaly et al. (2006) ont proposé un modèle de prédiction des coûts de réhabilitation selon une probabilité de défaillance du réseau (DP) évaluée à partir de cinq paramètres indépendants : Quatre caractéristiques de la conduite (âge, type de matériau, diamètre et profondeur) ainsi que le type de sol.

La majorité de ces travaux considère l'âge comme facteur principal dans la dégradation, ce qui est une hypothèse à discuter.

## 3.2 Modèles et directives pratiqués au Québec

### 3.2.1 Plan d'intervention de MAMROT

En 2005, le ministère des affaires municipales et des régions (MAMROT) a présenté un guide pour soutenir les municipalités du Québec dans l'élaboration d'un plan d'intervention de réseau d'égout. La démarche proposée illustrée à la Figure 3.5, vise à établir une intervention globale en réseau d'eau potable et d'égout tout en tenant compte de l'état des chaussées. Ceci devrait diminuer le nombre d'interventions et ainsi éviter les coûts supplémentaires.

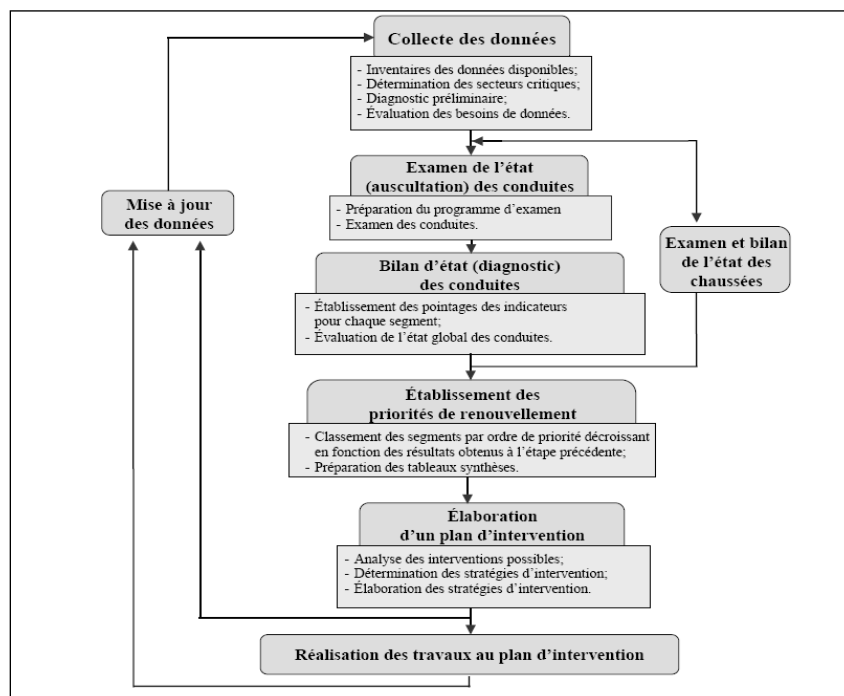


Figure 3.5 : Démarche pour élaborer un plan d'intervention (MAMROT, 2005)

Le raisonnement se fait par segmentation : pour chaque segment de conduite, on établit une évaluation de son état selon les étapes de calcul suivantes:

*Étape 1 : Calcul des indicateurs*

Trois indicateurs ont été déterminés et pondérés pour fixer l'importance relative de chacun d'eux. Il s'agit de la déficience fonctionnelle, la déficience structurale et la hiérarchisation de la conduite. Le total des facteurs de pondération doit toujours être de 10.

*Étape 2 : Calcul des pointages*

Dans chaque indicateur, on classe l'état du réseau selon plusieurs niveaux de déficience ou de l'état de dégradation. Chaque état sera noté de 0 à 3 selon la gravité de la dégradation observée.

*Étape 3 : Note d'état globale*

La note d'état globale (NEG) est calculée par :

$$NEG = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^3 Ind_i * P_j \quad (3.3)$$

Où :

i : Indice de l'indicateur

j : Indice de pointage selon l'état de dégradation

Ind : L'indicateur de l'état de la conduite

P : pointage affecté au niveau de la dégradation

Le tableau 1.2 illustre clairement les niveaux des indicateurs et pointages qui leur sont associés. Un exemple de calcul de l'état global d'un segment d'égout est présenté au Tableau 3.4.

En procédant de la même façon pour évaluer l'état du réseau d'eau potable et l'état de la chaussée, un plan d'intervention globale peut être mis en place pour optimiser la gestion de ces infrastructures comme indiqué dans le Tableau 3.5.

**Tableau 3.3 : Indicateurs et pointage de l'état de dégradation des conduites d'égout**

Indicateurs		Pointages		
Indicateurs	Facteurs de pondération	Niveau de dégradation	Caractéristiques	Pointage
<b>Déficiences fonctionnelles</b>	3.5 à 4.5	Nul	Refoulement	3
		Faible	Incapacité de canaliser une pluie de récurrence faible	2
		Moyen	Eaux parasites	1
		Élevé	Vitesse trop faible ou excessive	0
<b>État structural</b>	3 à 4	Très faible	Aucune trace de défauts	3
		Faible	Trace de défauts mineurs	2
		Moyenne	Fractures et légères déformations, effondrement probable à moyen terme	1
		Élevée	Déformations importantes, effondrement imminent	0
<b>Hierarchisation</b>	2 à 3	Faible	Segment faiblement vulnérables	3
		Moyen	Segment moyennement vulnérables	2
		Élevé	risque de situation intolérable	1

**Tableau 3.4: Exemple de détermination de la cote d'état global d'un segment de conduite d'égout**

Indicateurs	Facteurs de pondération	Unités de mesure	Valeurs mesurées	Pontages	A x B
	(A)			(B)	
Déficiences fonctionnelles	4	niveau	Moyen	1	4
État structural	3.5	niveau	Dégradation faible	2	7
Hiérarchisation	2.5	niveau	moyen	2	5
<b>Cote d'état global du segment de conduite d'égout</b>					<b>16</b>

Source : (ministère des Affaires municipales et des Régions, 2005)

Tableau 3.5 : Exemple de Plan d'intervention

Exemple de tableau synthèse du plan d'intervention										
Segment de rue	Conduite d'eau potable		Conduite d'égout		Niveau de priorité du segment de conduites (B + D)	Résultat de l'appréciation de l'état du segment de chaussée	Classement final du segment de rue	Interventions recommandées	Coût des travaux	Échéancier
	Cote d'état global du tableau I (A)	Cote d'état global majorée de 1,6 (B = A x 1,6)	Cote d'état global du tableau II (C)	Cote d'état global majorée de 1,4 (D = C x 1,4)						
Segment 001 1 <sup>re</sup> Ave : de la rue Alain à la rue Bédard	21	33,6	16	22,4	56	Dégradation importante, confort nul, structure faible, susceptibilité au gel élevée, facteurs hiérarchiques importants	1	Remplacement complet des conduites d'eau potable et d'égout ainsi que de la chaussée	397 500 \$	Novembre 2006
Segment 002	22	35,2	18	25,2	60,4	Dégradation moyenne, confort passable, structure suffisante, susceptibilité au gel faible, facteurs hiérarchiques négligeables	2	Réhabilitation <i>in situ</i> des conduites d'eau potable et d'égout ainsi qu'un traitement de surface pour la chaussée	250 500 \$	Juin 2007
Segment 003	24	38,4	20	28	66,4	Dégradation faible, bon confort, bonne structure, susceptibilité au gel nulle, facteurs hiérarchiques négligeables	3	Réhabilitation <i>in situ</i> des conduites d'eau potable et d'égout sans intervention sur la chaussée	132 000 \$	Octobre 2007

Source : (ministère des Affaires municipales et des Régions, 2005)

### 3.2.2 Modèle de WRc

Le WRc a publié pour la première édition d'un manuel de classification de l'état des conduites d'égouts (Manual of sewer Condition Classification MSCC) en 1980 pour le Royaume-Uni (CERIU, 2010). Depuis lors, des mises à jour de cette édition ont été publiées et principalement la quatrième et la dernière en 2001. Ce protocole est actuellement reconnu dans le monde entier pour aider les municipalités à classer leur réseau d'égouts selon ce modèle ou une version adaptée aux besoins.

#### Types de défauts & système de codage

Selon le protocole de WRc, les défauts dans un réseau d'égout résultent de plusieurs facteurs :

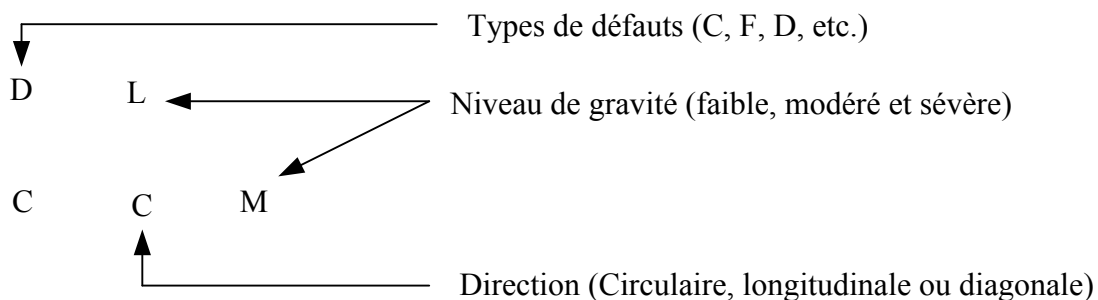
- l'âge de la conduite;
- la Qualité de la construction;
- l'utilisation de matériel non adéquat;
- les Conditions du sol;
- les Propriétés hydrauliques;
- la mise en charge du réseau;
- crues exceptionnelles;
- autres.

La plupart de ces défauts sont classés comme étant structuraux ou opérationnels. Le Tableau 3.6 présente la classification suggérée par le WRc. À chaque défaut on attribue des niveaux de gravité (faible, moyen ou élevé) selon la taille, le nombre, la forme ou l'orientation du défaut dans un segment de la conduite.

**Tableau 3.6 : Classification des défauts d'un réseau d'égout (WRc, 2004)**

Défauts structurels	Défauts opérationnels
Fente	Racine
Fracture	Débris
Déformation	Encroûtement
Défaut de joint	Infiltration
Écroulement	
Bris	
Fléchissement	
Dégâts superficiels	
Corrosion	
Trou	

En 1993, le WRc a adopté un système de codage de défaut identifié par deux ou trois lettres d'abréviation selon le type, le niveau de gravité et la direction du défaut (Figure 3.6).

**Figure 3.6 : Système de codage de défaut**



### Catégories de conditions & système de notation

Une catégorie de condition d'égout est identifiée par un nombre de 1 à 5. Il est obtenu par un calcul de score de défaut basé sur la somme des valeurs se déduisant des défauts divers dans le segment. La longueur du segment devrait être moins de 120 mètres d'un trou d'homme à un autre. Le score moyen représente une moyenne des valeurs obtenue le long du segment de la conduite. Le score total représente l'addition des valeurs obtenues tandis que le score maximal représente le plus haut. On détermine la condition de la conduite basée sur les défauts structuraux et opérationnels obtenus par les inspections. La valeur déduite pour les défauts est notée de 1 à 165, alors que les catégories de condition sont de 1 à 5 selon le Tableau 3.7. Le score maximal (le plus mauvais défaut) est recommandé à être utilisé dans la détermination de la catégorie de condition.

**Tableau 3.7 : Classification des catégories de condition du réseau**

<b>Niveau de l'état de dégradation</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Score de la condition structurale</b>	<10	10 à 39	40 à 79	80 à 164	>165
<b>Score de la condition opérationnelle</b>	<1	1 à 1.9	2 à 4.9	5 à 9.9	>10

### Catégories d'égout

Le manuel WRc classe des égouts dans trois catégories : A, B et C, basé sur le degré de gravité de l'état. La catégorie dépend de la taille de l'égout, le courant de trafic au-dessus de l'égout, la profondeur de l'égout, des conditions de sol et l'emplacement des services (Zone industrielle, hospitalière, au-dessous des routes et autoroutes). Pour des égouts dans la catégorie A, le coût d'échec (tant direct qu'indirect) serait extrêmement cher et la perte de l'actif serait critique à la municipalité ou à l'utilité. Avec la catégorie B, le coût d'échec serait moins que pour la catégorie A. La catégorie C le coût d'échec serait la moins chère. Par exemple, un égout profond dans des mauvaises conditions avec un haut taux de circulation de véhicules est évalué comme la catégorie A, tandis que, un égout peu profond dans des bonnes conditions dans un itinéraire de taux de circulation faible de catégorie B (CNRC, 2004).

### 3.2.3 Modèle de NASSCO (USA)

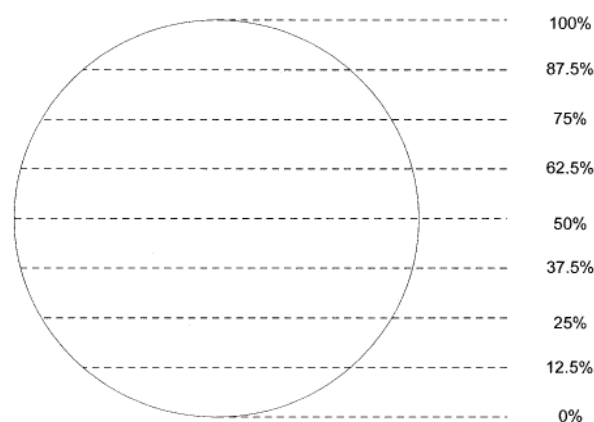
NASSCO a mis en œuvre son PACP (Pipeline Assessment and Certification Program) pour standardiser l'évaluation des conduites d'égout en utilisant l'inspection par CCTV.

Ce système de classification de condition est basé sur celui de WRc et prend en considération seulement des conditions internes des conduites, des catégories de condition tant pour des défauts structurels que pour des défauts de maintenance et d'opération. Chaque code de défaut est assigné à une catégorie de condition de 1 à 5 (1 pour excellent et 5 pour mauvais état). L'évaluation complète est calculée par la somme du grand nombre maximal pour les segments contribuant.

### 3.2.4 Modèle de CERIU

Au niveau du Québec, une initiative importante du centre d'expertise et de la recherche en infrastructures Urbaines (CERIU) a été prise en collaboration avec le BNQ (Bureau de Normalisation du Québec) afin de proposer leur propre protocole de classification de l'état des égouts en 1997. Actuellement, la plupart des municipalités du Québec ont adapté ce protocole (Chughtai, 2007).

Le protocole de CERIU identifie l'état de dégradation des égouts selon différents scénarios de défauts apparents: Défauts structurels, défauts opérationnels, infiltration ou état des jonctions/connections. Pour quantifier l'ampleur de chaque défaut et son orientation, la section de la conduite est subdivisée en 8 parties ( $1/8$ ,  $1/4$ ,  $3/8$ , ..., 1) correspondant à un pourcentage de 6, 12.5, 37.5% jusqu'à 100% (Figure 3.7).



**Figure 3.7 : Subdivision de la section de conduite d'égouts selon CERIU (Chughtai, 2007)**

Le tableau 3.8 explique l'intervention appropriée selon la classe de l'état de dégradation.

**Tableau 3.8 : Classification de l'état de dégradation dans le protocole de CERIU**

<b>État de dégradation</b>	<b>Description</b>
1	Aucune intervention recommandée
2	Action recommandée non majeure
3	Action recommandée non urgente
4	Action recommandée en urgence
5	Action recommandée à l'immédiat

### **3.3 Limitations des modèles existants**

La plupart des modèles existants se basent sur l'évaluation de la dégradation à partir des défauts apparents sur la structure. La dégradation hydraulique n'est pas toujours prise en considération dans les modèles. De même, les facteurs environnementaux ou externes tels que la charge du trafic, le niveau de la nappe sont souvent ignorés.

Chaque modèle contribue de sa part à améliorer un aspect pertinent de la dégradation des égouts mais aucun n'englobe tous les objectifs (intégration de tous les facteurs de la dégradation, optimisation économique, évaluation de la dégradation hydraulique).

Le tableau 3.9 présente les contributions et limitations de chaque modèle.

**Tableau 3.9 : Contributions et limitations de modèles d'évaluation de la dégradation**

<b>Modèles</b>	<b>Contributions</b>	<b>Limitations</b>
<b>Modèle de Reyna (1994)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évalue la performance hydraulique Tient compte des contraintes budgétaires, techniques et sociales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se base sur une hypothèse limitée (La réhabilitation d'un tronçon modifie seulement son indice de performance hydraulique) car réellement elle modifie aussi la performance des tronçons en amont et en aval.</li> </ul>
<b>Modèle de Bengassem (2001)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intègre la dégradation hydraulique</li> <li>- Intègre Des facteurs liés au milieu environnant le site (risques sismiques, facteurs hydrogéologiques, facteurs géotechniques, actions physicochimiques de l'effluent)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne fournit qu'un résultat partiel dépendant très largement des tronçons défailants.</li> <li>- L'analyse de l'effet d'un sous dimensionnement n'est pas suffisant</li> </ul>
<b>Modèle de Chughtai (2007)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intègre un indice de condition des égouts (CCI)</li> <li>- Intègre un modèle de prédiction de la dégradation structurale et opérationnelle</li> <li>- Intègre un module de conversion entre le modèle de WRc et celui de CERIU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le modèle de prédiction est limité à trois types de matériaux de conduites</li> </ul>
<b>Plan d'intervention de MAMROT (2005)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige un plan d'intervention dans chaque municipalité</li> <li>- Intègre un indice d'hierarchisation des conduites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Néglige l'état hydraulique des égouts</li> <li>- Se base seulement sur les défauts apparents</li> </ul>
<b>Protocole de WRc (2001)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le plus utilisé dans les municipalités au Québec</li> <li>- Se base sur un score maximal pour évaluer la dégradation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Néglige la vulnérabilité du site et l'état hydraulique du réseau</li> <li>- Nécessite un grand effort de traduction et d'adaptation</li> </ul>
<b>Protocole de CERIU (2004)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilise les résultats des inspections télévisées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Néglige les conditions extrinsèques de la conduite</li> </ul>

En résumé, les aspects pertinents que doit regrouper un modèle de la dégradation sont l'évaluation de la dégradation hydraulique, l'intégration des facteurs externes liés au milieu environnant du réseau d'égout et l'utilisation d'un système de pondération justifié. D'où l'idée de développer un modèle basé sur un grand nombre de facteurs influençant la dégradation en tenant compte de ceux influençant directement la performance hydraulique du tronçon. Le modèle développé doit apporter une amélioration quant au système de pondération afin d'éviter une pondération arbitraire.

## CHAPITRE 4 L'ANALYSE MULTICRITÈRE ET APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP

### 4.1 Aide à la décision

Roy (1992) définit l'aide à la décision comme étant une contribution à formuler et faire partager des convictions, C'est une description d'un système de préférence formulé par les décideurs pour aboutir à une recommandation moyennant une représentation numérique (pondération et notation des différentes alternatives).

L'analyse multicritère est un outil d'aide à la décision, elle permet de faciliter la décision dans une situation impliquant de nombreux critères et/ou facteurs (Guillermo et al, 2000).

#### 4.1.1 L'analyse multicritère

L'analyse multicritère ou les méthodes d'aide à la décision multicritères désignent généralement un ensemble de méthodes permettant d'agréger plusieurs critères afin de choisir une ou plusieurs actions ou solutions<sup>1</sup>.

La plupart des décisions impliquent plusieurs critères, c'est pour cette raison que l'analyse multicritère est considérée comme une branche importante de l'aide à la décision (Guillermo et al, 2000).

Vincke (1989) affirme qu'il n'existe pas, en général, une solution qui soit la meilleure pour tous les points de vue. Le mot optimisation ou plutôt la solution la plus optimale n'a donc plus de sens dans un tel cas, c'est pourquoi on utilise le mot aide.

---

<sup>1</sup> [www.ctn.etsmtl.ca/cours/mgc-800/Ch5%20MGC-800.ppt](http://www.ctn.etsmtl.ca/cours/mgc-800/Ch5%20MGC-800.ppt) - consulté le 03 février 2009

### 4.1.1.1 Étapes de la démarche

Pour appliquer ces méthodes, la démarche commune est selon les étapes suivantes :

4. Identifier l'objectif général de la démarche et le type de décision;
5. Dresser la liste des actions ou solutions potentielles;
6. Identifier les critères qui orienteront les décideurs;
7. Juger chacune des solutions par rapport à chacun des critères;
8. Agréger ces jugements pour choisir la solution la plus satisfaisante.

La façon de réaliser cette dernière étape représente la différence entre les méthodes d'AMC. Mais dans la plupart des méthodes multicritères, l'importance relative des critères est représentée par des pondérations.

### 4.1.2 Terminologie de base et approches de l'AMC

Actions potentielles, critères, unités et poids des critères sont la terminologie utilisée dans la plupart des méthodes appartenant à l'AMC. Le Tableau 4.1 décrit clairement ces termes utilisés.

**Tableau 4.1 : Terminologie de l'analyse multicritère**

<b>TERMINOLOGIE</b>	<b>DESCRIPTION</b>
Actions potentielles (alternatives)	Choix disponibles (de quelques-uns à des centaines)
Critères (attributs)	Aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées (qualitatifs ou quantitatifs)
Unités	Façon d'exprimer la performance vs les critères (tangibles ou intangibles)
Poids des critères	Importance attribuée aux critères

Il existe toute une panoplie de méthodes d'AMC qui se différencient. Les méthodes d'AMC sont classées généralement selon trois approches (Vincke 1989) :

**Approche du critère unique de synthèse** (rejetant toute incomparabilité): ou la théorie de l'utilité multiattribut qui consiste à agréger les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Cette approche suppose que les critères soient commensurables et transitifs.

**Approche du surclassement de synthèse** (acceptant l'incomparabilité) : vise en première étape à construire une relation (appelée relation de surclassement) présentant les préférences du décideur. Jusqu'à ce niveau, cette relation n'est ni complète ni transitive jusqu'à la seconde étape qui exploite la relation de surclassement pour aider le décideur à résoudre son problème. Les différentes méthodes de cette approche se distinguent par ces deux étapes :

*Situer les préférences des décideurs* : On compare les actions deux à deux pour constater si l'une surclasse l'autre, indifférentes ou incomparables. Cette relation est souvent exprimée en fonction de seuils de préférences, d'indifférence et de véto pour chaque critère (Gautier, 2005).

*Synthèse des comparaisons* : Ceci permet d'établir une recommandation finale selon le type de la problématique à traiter (Tableau 4.1) : choix, tri ou classement des alternatives ou actions

**Approche du jugement local interactif** (avec itérations essai-erreur) : c'est l'approche la plus récente regroupant des méthodes qui alternent les étapes de calculs (fournissant les compromis successifs) et les étapes de dialogue (sources d'informations supplémentaires sur les préférences du décideur). Cette approche est constituée de trois phases essentielles : une première phase de recherche de l'information, une deuxième de réinitialisation avec une nouvelle solution optimisée et la dernière phase de réaction du décideur jusqu'à sa satisfaction (Roy, 1975). La Figure 4.1 récapitule l'ensemble de ces approches ainsi que leurs familles de méthodes.

**Tableau 4.1 : Classement des problématiques**

Problématique	Objectif	Résultat	Procédure
$\alpha$	Choix d'un sous-ensemble contenant les actions "les meilleures" ou, à défaut, "satisfaisantes"	Choix	Sélection
$\beta$	Tri par affectation des actions à des catégories prédéfinies	Tri	Affectation
$\gamma$	Rangement de classes d'équivalence, composées d'actions, ces classes étant ordonnées de façon complète ou partielle	Rangement	Rangement

(Source : Gautier, 2005)



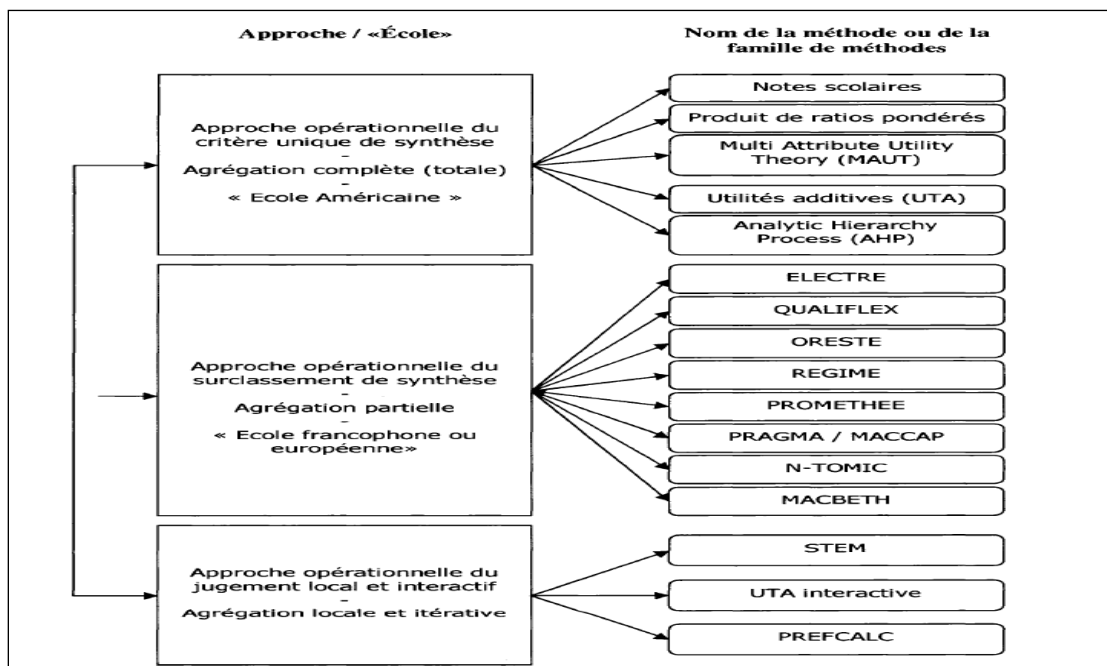


Figure 4.1 : Approches et méthodes de l'AMC (Mayster et al. 1994)

### 4.1.3 Comparaison des méthodes

Le choix de la méthode d'agrégation n'est pas facile. En effet, il n'existe pas une méthodologie bien détaillée pour faire ce choix. Certains pensent même qu'il faut passer par un processus multicritère pour faire un choix qui reste toujours insatisfaisant pour fournir un choix clair (Gautier, 2005).

Guitouni et Martel (1998) remarquent que la plupart des analystes et chercheurs sont incapables de justifier le choix d'une méthode multicritère, c'est pourquoi, par familiarité ou affinité avec une méthode donnée, on justifie son choix. À la lumière de ce qui précède, on va ressortir les avantages, les inconvénients et les particularités de chaque méthode afin d'éclaircir notre choix de la méthode AHP (Tableau 4.2 et Tableau 4.3).

**Tableau 4.2 : Comparaison des méthodes AHP, MAUT et ÉLECTRE**

	<b>AHP</b>	<b>MAUT</b>	<b>ÉLECTRE</b>
Interdépendance des critères	Autorisée	Non autorisée	Non autorisée
Type de poids	Cardinal	Cardinal	Cardinal
Type de résultat	Classement complet	Classement complet	Option non dominante/\$ calculé
Transparence	Élevée	Élevée	Moyenne
Type de données	Qualitative et quantitative	Qualitative et quantitative	Seulement quantitative

**Tableau 4.3 : Comparaison des méthodes AHP, MAUT et ÉLECTRE**

	<b>Critère de comparaison entre méthodes</b>	<b>AHP</b>	<b>MAUT</b>	<b>ELECTRE</b>
Transparence	Analyse de décision d'offres la plus proche à approche humaine-raisonnable	(1) ***	***	**
	Bien structuré et facile de suivre	***	**	**
	Utilise des approximations mathématiques directes pour représenter la réalité	***	***	**
Simplicité	Simplicité	***	**	*
Robustesse	Traitement de tout nombre de projets	***	***	**
	Traitement de tout nombre de critères	***	***	***
	Encouragement de groupe d'intérêts spécial	***	*	*
	Sensitivité	***	***	***

(1) : le nombre des symboles \* représente le niveau de satisfaction de la méthode au critère

#### 4.1.4 Domaines d'application

Les premières applications de l'analyse multicritère l'ont été pratiquées dans le domaine de la prise de décision environnementale (gestion des déchets, traitement des eaux, installation de décharges...). Cependant, de nouvelles applications ont vu le jour.

Le Tableau 4.4 énumère certains projets utilisant l'AMC dans la résolution de la problématique concernée.

**Tableau 4.4 : Exemples d'application de l'AMC**

<b>Problématique</b>	<b>Pays</b>	<b>Méthodes</b>	<b>Références</b>
Évaluation de la performance des réseaux d'eau potable	Canada	AHP	Al-Barqawi et Zayed (2008)
gestion durable des forêts	Indonésie	AHP	Guitouni et Martel (1998)
Gestion des déchets nucléaires	Europe	Prométhée I et II	Briggs et al. (1990)
Implantation d'une centrale nucléaire	Algérie	Électre I et III, AHP	Barda et al. (1990)
Gestion des ressources en eau	USA	MAUT	Anandalingam et Olsson (1989)
Approvisionnement en eau potable	Pologne	Électre III	Roy et al. (1992)

#### **4.1.5 Processus d'analyse hiérarchique (AHP)**

Le processus d'analyse hiérarchique ou AHP (Analytic Hierarchy Process) est une méthode multicritère développé à la Wharton School of Business de l'Université de Pennsylvanie par T.L. Saaty (Saaty, 1980).

La méthode AHP a été appliquée à de très nombreux problèmes. En 1995, on dénombrait plus de 1 000 articles de revues scientifiques traitant de l'AHP (Marc Fumey, 2001). Elle a été implantée dans de nombreux logiciels d'aide à la décision tel (ExpertChoice, HIPRE3+, Which&why, Spreadsheets, Multsync). Elle permet ainsi de résoudre un grand nombre de problèmes décisionnels de façon quantitative en élaborant un modèle d'aide à la décision, représenté sous la forme d'une hiérarchie.

### 4.1.6 Justification de choix de la méthode

Notre choix basé sur la méthode AHP dans l'évaluation de l'état de dégradation des réseaux d'égouts a été bien justifié, en se basant sur les avantages de cette méthode malgré ses limitations présentées au Tableau 4.5.

**Tableau 4.5 : Avantages et inconvénients de la méthode AHP**

<b>MÉTHODE AHP</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
la seule méthode permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance entre critères	Le nombre des comparaisons augmente plus rapidement que le nombre des critères
Méthode simple	Le choix d'échelle de 1 à 9 n'est pas justifié mathématiquement
Possibilité d'ajouter ou d'éliminer des critères	
Les critères peuvent avoir des importances variables	
Le nombre de critères et sous-critères n'est pas limité	

Cherqui (2000) présume que la méthode AHP présente les limitations suivantes :

- Les pondérations sont attribuées indépendamment de l'échelle de variation des indicateurs. Deux indicateurs peuvent avoir la même pondération alors que l'un a une plus grande amplitude de variation;
- L'introduction de nouveaux indicateurs change l'importance relative de chaque indicateur et une inversion de rang peut se produire. Harker & Vargas (1987) ont prouvé à partir d'un travail théorique et des exemples que ces limitations ne sont pas valides.

## CHAPITRE 5 CHOIX DES FACTEURS DE LA DÉGRADATION

### 5.1 Objectif général

L'objectif principal de ce projet de recherche consiste à développer un modèle d'évaluation de l'état de dégradation hydraulique et structurale des conduites des réseaux sanitaire et pluvial.

### 5.2 Schéma fonctionnel du projet

Pour atteindre l'objectif du projet, trois actions principales ont été définies: (1) développement du modèle théorique, (2) application du modèle sur un cas réel, et (3) développement de l'interface utilisateur permettant d'offrir aux gestionnaires de réseaux municipaux un outil performant capable de donner le diagnostic d'un grand nombre de tronçons. La Figure 5.1 représente le schéma fonctionnel du projet qui explique la démarche préconisée.

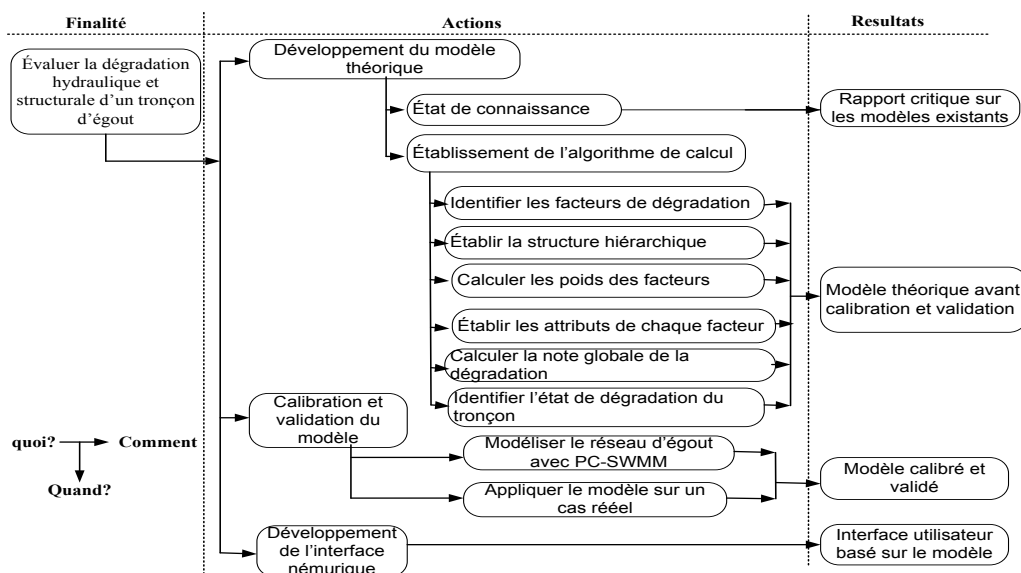


Figure 5.1 : Schéma fonctionnel du projet

### 5.3 Choix des facteurs de la dégradation

L'identification des paramètres de la dégradation représente la première étape dans l'algorithme de calcul du modèle développé (Figure 5.1). Le choix de ces facteurs a été fait après un processus

de sélection et élimination dans l'ensemble de tous les facteurs qui peuvent avoir impact sur l'évolution de la dégradation.

Ce choix de facteurs a été basé sur des études antérieures ainsi que sur avis des experts des différentes municipalités partenaires. Le Tableau 5.1 énumère les facteurs de la dégradation considérés dans quelques travaux de recherche.

**Tableau 5.1 : facteurs de la dégradation des conduits d'égout utilisés dans des recherches antérieures (adapté de Chughtai and Zayed (2008))**

<b>Pays</b>	<b>Référence de la recherche</b>	<b>Facteurs de la dégradation considérés</b>
Canada	McDonald and Zhao (2001)	Type de sol, profondeur, diamètre, type de l'effluent, zone sismique
	Ruwanpura et al. (2004)	Âge, longueur, matériau
	Chughtai and Zayed (2008)	Âge, longueur, matériau, type de sol, matériau, type d'effluent, condition de pose, infiltration.
USA	Abraham et al. (1998)	Diamètre, localisation, charge du trafic
	Najafi and Kulandaivel (2005)	Longueur, diamètre, matériau, âge, profondeur.
Norway	Rostum et al. (1999)	Diamètre, matériau, condition du sol, historique des défauts
Japan	Hasegawa et al. (1999)	Âge, matériau, profondeur, niveau de la nappe, propriétés du sol, proximité aux autres infrastructures

Notre choix a été fixé sur les 15 facteurs suivants considérés les plus influents dans l'évolution de la dégradation (Tableau 5.2). Certains facteurs ont été ignorés et/ou éliminés tels que la zone sismique, proximité aux autres infrastructures.

**Tableau 5.2. Facteurs de la dégradation considérés dans le modèle développé**

Numéro	Facteurs	Détails
1	Âge de la conduite	Âge à partir de la mise en pose
2	Type de matériau	Béton, PVC, amiante ciment, polyéthylène, fonte/fonte ductile
3	Diamètre de la conduite	Diamètre intérieur de la conduite
4	Forme géométrique	Circulaire, ovoïdale, semi-elliptique, fer à cheval, anse de panier
5	Nature de sol	Très agressif, agressif, moyennement ou non agressif
6	Charge du trafic	Élevée, moyenne ou faible
7	Profondeur de pose	Suffisante ( $\geq$ ) ou insuffisante ( $<$ )
8	Niveau de la nappe	Élevé, moyen ou faible
9	Type de l'effluent	Très agressif, agressif, moyennement ou non agressif
10	Défauts de structure	Défauts de joint, fracture, déformation, trou, cassure ou effondrement
11	Défauts opérationnels	Racine, encroutement, débris ou obstruction
12	Capacité hydraulique maximale	Suffisante ou insuffisante
13	Exfiltration	Élevée, moyenne ou faible
14	Infiltration	Trace, suintement, goutte à goutte, continue ou sous pression
15	Mise en charge	Conduite pleine, différence entre hauteur d'enfouissement et hauteur d'eau $<$ ou $\geq 1.5$ m

#### 5.4 Système de notation des facteurs de la dégradation

Une fois les facteurs de la dégradation ont été identifiés, un système de notation a été élaboré permettant d'évaluer chaque facteur. Chaque attribut de facteur est notée de 0 à 10 selon l'impact sur la dégradation. La valeur "0" représente la note de l'attribut qui a moins d'impact sur la dégradation et "10" celle qui a plus d'impact.

Pour le facteur de l'âge de la conduite, il est considéré que son impact sur la dégradation est presque nul pour une conduite qui a moins de 10 ans. Par contre à partir de l'âge de 90 ans, l'impact est considéré maximal. Cette notation est adaptée de celle utilisée par Chughtai and Zayed (2008). Pour le type de matériau, le PVC ainsi que le polyéthylène sont considérés comme étant des matériaux les plus performants par rapport à la fonte ductile. Pour le diamètre, il est évident que les conduites en petits diamètres sont plus vulnérables à la dégradation parce qu'elles peuvent colmater rapidement. Pour la profondeur de pose, on considère qu'une profondeur de moins de 2 m est critique. En ce qui concerne les défauts apparents, on s'est basé sur un système de notation équivalent à celui utilisé dans le modèle de WRC mais sur une échelle de 10 au lieu de 100.

Pour le facteur d'infiltration, on a adopté une notation équivalente à celui de CERIU sur une échelle de 0 à 10. Les classes du facteur de la mise en charge sont identifiées par la différence de hauteur entre le niveau de l'enfouissement et le niveau d'eau. Ainsi donc, à partir des différences de hauteur moins que 1,5 m, on considère que l'impact de ce facteur sur la dégradation est maximal. Cette valeur de 1,5 m est référée au niveau des sous sols des maisons qu'il faut protéger contre les inondations. Les Tableaux 5.3 et 5.4 représentent les classes de notes pour tous les sous facteurs structuraux et hydrauliques respectivement. Ces valeurs sont basées sur les différents avis recueillis auprès des gestionnaires des réseaux d'égout municipaux.

L'infiltration est l'exfiltration sont considéré comme facteur hydraulique contrairement au modèle de CERIU qui les considère un facteur de structure. Cette considération est expliquée par le fait que ces deux facteurs ont un impact direct sur la performance hydraulique du tronçon que sur sa structure.

Le niveau de la nappe est décrit d'une façon qualitative (Élevé, moyen ou faible) et non pas par un niveau d'eau ou un débit. En effet, la plupart des municipalités n'exercent aucune mesure de niveau de la nappe à cause des contraintes financières et de la fluctuation de ce niveau durant l'année. Le jugement sur l'état du niveau de la nappe est laissé au gestionnaire du réseau.



**Tableau 5.3 : Système de notation des facteurs de la dégradation structurale**

Critère	Facteur	Sous facteur	Classe	Note
Dégradation structurale	Facteurs intrinsèques	Âge	> 90	10
			81 à 90	9
			71 à 80	8
			61 à 70	7
			51 à 60	6
			41 à 50	5
			31 à 40	4
			21 à 30	3
			11 à 20	2
		0 à 10	1	
		Type de conduite	Fonte/fonte ductile	10
			Amiante-ciment	8
			Béton	7
			PVC ou Polyéthylène	6
		Diamètre	<= 200 mm	10
			200 à 250 mm	5
	250 à 300 mm		3	
	>300 mm		1	
	Forme géométrique	Anse de panier	10	
		Semi-elliptique	8	
		Fer à cheval	5	
		Ovoïdale	3	
	Facteurs extrinsèques	Type de sol	Très agressif	10
			Agressif	7
			Moyennement agressif	5
			Non agressif	0
		Type de trafic	Élevé	10
			Moyen	8
			Faible	6
		Profondeur de pose	<1.5m	8
			> 4.5	6
			1.5 à 4.5	1
Niveau de la nappe		Élevé	10	
		Moyen	7	
		Faible	3	
Type de l'effluent		Trop agressif	9	
		Agressif	7	
		Moyennement agressif	3	
	Non agressif	0		
Défauts	Défauts structuraux	Effondrement	10	
		Trou	10	
		Déformation	10	
		Cassure	5	
		Fracture et/ou fissure	2	
		Défauts de joint	0	
	Défauts opérationnels	Racine	10	
		Obstruction	10	
		Débris	10	
		Encrouement	5	

**Tableau 5.4 : Système de notation des facteurs de la dégradation hydraulique**

Critère	Facteurs	Attributs	Note
Dégradation hydraulique	Capacité maximale	Insuffisante	10
		Suffisante	7
	Exfiltration	Élevée	10
		Moyenne	7
		Faible	3
	Infiltration	Sous pression	10
		Continu	8
		Goutte à goutte	6
		Suintement	4
		Trace	2
	Mise en charge	Henfouissement - Heau < 1,5 m	10
		Henfouissement – Heau >1,5 m	7
		Conduite pleine	0

**CHAPITRE 6     ARTICLE 1: MODELING OF HYDRAULIC AND  
STRUCTURAL DEGRADATION OF SEWE AND STORM WATER  
PIPELINES**

**Ilham Ennaouri <sup>a</sup> and Musandji Fuamba <sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Department CGM (Civil, Geological and Mining Engineering), Ecole Polytechnique de Montreal, P.O. box 6079, station Centre-ville (2900 Edouard-Montpetit blvd), Montreal (Quebec) Canada H3C 3A7.

*Soumis le 10 aout 2010 au journal Water resources planning and management de l'ASCE  
(American society of civil Engineering)*

## 6.1 Abstract

The aim of this study was to develop a condition assessment model for sewer and storm water pipelines. To integrate both hydraulic and structural aspects of degradation, a set of 15 specific influencing factors was identified and considered in this model. The analytic hierarchy process (AHP) method was used to express the relative importance of these factors. The proposed model was successfully tested to assess the current state of degradation of a representative sample of pipes selected from the sewer network of the city of Saint-Hyacinthe in Canada. A sensitivity analysis was performed to determine the effect of the relative importance between hydraulic and structural criteria on the state assessment of a given pipe. Results from this analysis indicate that the hydraulic criterion should be considered with the same importance as the structural criterion in the degradation assessment process.

This model constitutes a useful tool for researchers and municipal engineers to improve their intervention plan by integrating the hydraulic criterion.

**Keywords:** Infrastructure; Degradation; Sewers; Hydraulic criteria; condition assessment model; AHP.

## 6.2 Introduction

In general, all urban sewer systems sustain structural as well as hydraulic deterioration. Indeed, the structure of the system suffers degradation notably from the cracking or crushing of pipes. This degraded structural state has repercussions on the system's hydraulic behavior by reducing the hydraulic performance of the infrastructure.

Canadian municipalities are not shielded from this situation. It is worth noting that they spend \$12 to \$15 billion per year on infrastructure such as sewer systems. However, this investment is deemed insufficient by system managers for the following reasons: the increasing demand for good quality infrastructure, the constant growth of the population as well as the ever more stringent standards in the fields of health, safety and environmental soundness (FCMNRC, 2004).

In Quebec, the government adopted the "*politique nationale de l'eau*" (provincial water policy) in November 2002, which aims at continuing the water purification process in accordance with commitment # 43 in order to achieve the following goal: "Encourage all municipalities to reach a

system renewal rate of 0.8% per year by 2007 and of 1% by 2012.” (MAMROT, 2005). To meet this goal, since 2005 the government has been requiring that any allocation of financial aid for municipal infrastructure be backed up by a prioritization of the work based on a detailed intervention plan.

Therefore, the goal of this research is to develop a condition assessment model that will evaluate the global state of degradation (hydraulic and structural) of a section of sanitary or storm sewer using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method in order to help municipal systems managers in this task.

### **6.3 Literature review**

The degradation of a sewer system can be defined as its incapacity to drain off domestic wastewater and rain water without incurring a hydraulic surcharge and while maintaining sound structural integrity (Tabesh et al, 2006).

### **6.4 Factors influencing the sewer degradation process**

Several studies are based on a range of deterioration factors of sewer pipes as shown in Table 6.1. The factors most commonly found are the age of the pipe, its diameter, the material and the soil type. Analyzing all these factors in a single study would be difficult (Chughtai and Zayed, 2008). In most existing studies, factors of interest are those related to structural defects or to the pipe (diameter, age, material, etc.). However, hydraulic factors such as over flow, infiltration and/or exfiltration are practically ignored.

**Table 6.1: Sewer pipe degradation factors considered in previous studies (adapted from Chughtai and Zayed 2008)**

Country	Research Reference	Sewer degradation factors
European union	Sveinung Saegrov (2006)	Velocity, ground water, hydraulic capacity, exfiltration
Canada	McDonald and Zhao (2001)	Location, soil type, pipe depth, size, type of waste, seismic zone
	Ariaratnam et al. (2001)	Age, diameter, material, depth
	Ruwanpura et al. (2004)	Age, length, material
	Chughtai and Zayed (2008)	Age, diameter, length, type of soil, material, type of waste, bedding condition, infiltration.
USA	Abraham et al. (1998)	Location, traffic loads, pipe size
	Yan and Vairavamoorthy (2003)	Age, diameter, material, depth
	Najafi and Kulandaivel (2005)	Length, diameter, material, age, depth, gradient
Germany	Baur and Herz (2002)	Age, material, location, diameter, gradient, type of waste
Norway	Rostum et al. (1999)	Material, diameter, soil condition, history of failure
Japan	Hasegawa et al. (1999)	Age, material, depth, ground water level, soil properties, proximity of other underground installations

## 6.5 Types of degradation and common approaches

Grigg (1994) schematized the service life of an urban sewer system with three stages named the three Rs according to the required intervention: Repair, Rehabilitation and Replacement. To make a wise choice in selecting the proper action to be taken, one must have a diagnosis system that takes into account every type of degradation and the factors involved in this process. Several types of classification regarding degradation factors can be found in the literature. Bengassem (2001) classified the factors according to two state conditions: the structural condition and the hydraulic condition. Al-Barqawi (2006) proposed a condition assessment model of drinking

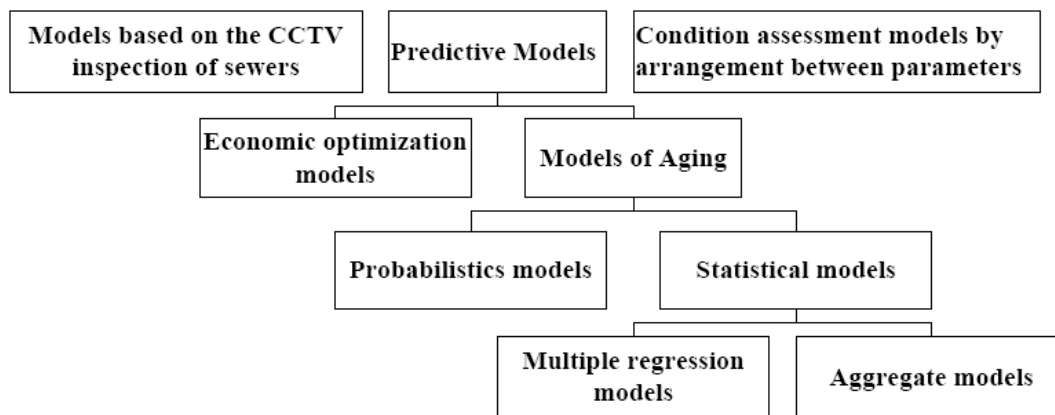
water pipes based on the evaluation of a group of structural factors arranged into three categories: physical, functional and environmental. Similarly, the operational condition is affected by two categories of factors: hydraulic and non-hydraulic.

There is a range of models designed to assess the condition of sewer pipes. They can be divided into three categories: (1) models that assess the condition by arranging the various deterioration factors, (2) forecast models based on the evolution of parameters and/or defects, (3) ageing models and (4) statistical models. An example of condition assessment models is the model developed by the Water Research Center (WRC) and based on the inspection of sewers by CCTV. This is the first condition assessment protocol for sewers to be developed (Chughtai, 2007). Most of the defects taken into consideration in this protocol are classified into two categories: structural and operational defects. A level (low, medium or high) is given to each defect according to the size, the number, the shape or the orientation of the defect. Each defect is scored from 1 to 165. The condition of a section can be classified from 1 (perfect condition) to 5 (critical condition) by calculating its score, based on the sum of the values given to each defect.

The WRC's classification model for sewer condition has been widely used internationally. In Canada, The North American Association of Pipeline Inspectors (NAAPI) as well as many municipalities have adopted the WRC model. In Quebec, the CERIU (*Centre de recherche et d'expertise en infrastructure urbaine*) has reached a licensing agreement with the National Association of Sewer Service Companies (NASSCO) for the certification of programs: Pipeline Assessment and Certification Program (PACP) (CERIU, 2009). By promoting this protocol to every municipality in Quebec, the CERIU wishes to establish a standardization of pipe condition assessment methods.

An example of condition assessment model by arrangement between parameters is the model of Bengassem (2001). In this research, the author has designed a diagnostic system for urban sewer systems based on the arrangement between hydraulic and structural factors. This system uses the fuzzy logic method as a mean to integrate the various parameters into a single index for each section studied. The assessment of the hydraulic condition of this model is based on a hydraulic simulation with the XP-SWMM software by reducing the diameter of the problematic sections. A percentage of responsibility of the phase loading on a pipe versus other factors on its upstream branch is determined from a relationship combining the height of the manhole and the burying

depth. This step is mainly used to share responsibilities between problematic sections where a failure originated and the sections that have defects but are not the cause of the problem (Bennis et al. 1999). This method only generates a partial result that greatly depends on problematic sections. Moreover, the analysis of the effect of an undersizing is easier since faulty sections are known (Fuamba et al. 2007). Figure 6.1 summarizes the different models according to the four categories mentioned earlier.



**Figure 6.1: Models of the condition assessment of deteriorating pipes**

Most of the existing models assess degradation from apparent defects on the structure. Hydraulic degradation is not present in these models. Similarly, environmental or external factors such as traffic load and the level of ground water are often ignored. This project suggests an innovative analysis in many respects: (1) the integration of the hydraulic criterion into the assessment of the global pipe degradation, (2) the taking into account of 15 different parameters (internal, external, etc.) and finally (3) the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to test the consistency of the scoring system for each parameter.



## 6.6 Methodology

### 6.6.1 Objectives of the study

The main objective of this research project is to develop a numerical model able to assess the global current or future state of hydraulic and structural degradation of a given section of a sanitary or storm sewer system. This model can be classified as part of the family of condition assessment models by arrangement between parameters (Figure 6.1). To reach this end, three actions were undertaken: (1) development of the theoretical model, (2) calibration and validation of the model by applying it to real cases, and (3) development of the user interface to give municipal system managers a powerful tool able to provide a diagnostic of a sewer section. The steps followed in this study are summarized in the functional block diagram of Figure 6.2.

The model encompasses a few factors that have never been combined before. On top of the structural degradation, the hydraulic degradation is integrated into the assessment of the global pipe condition.

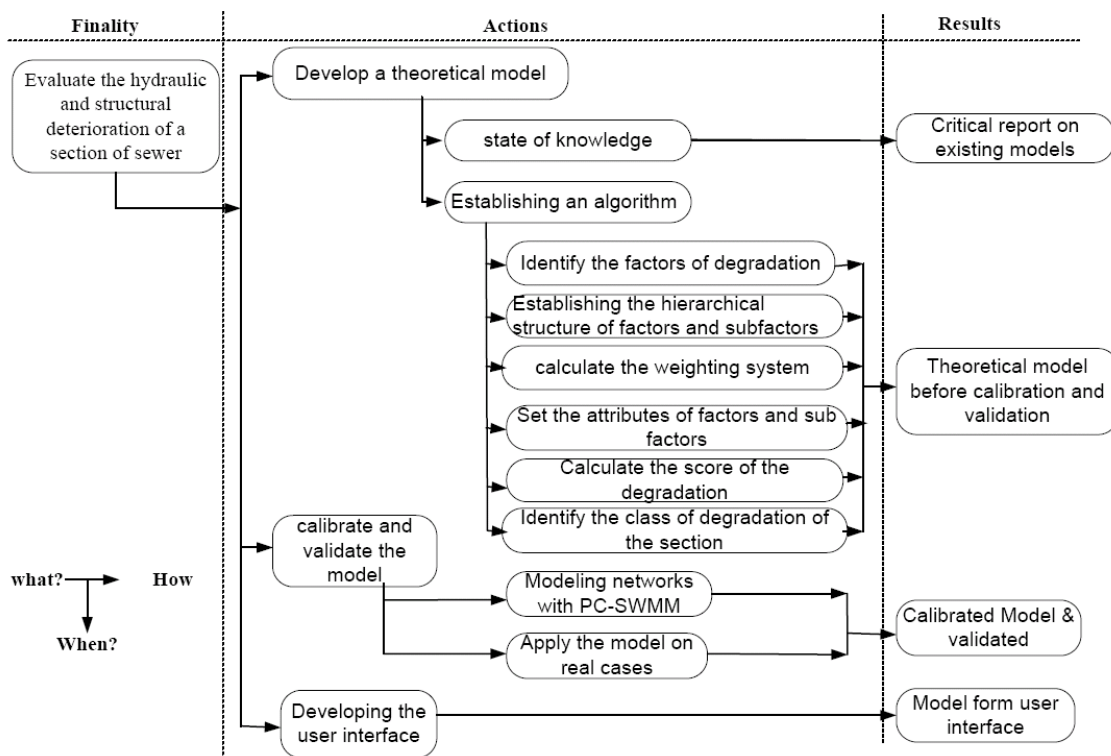
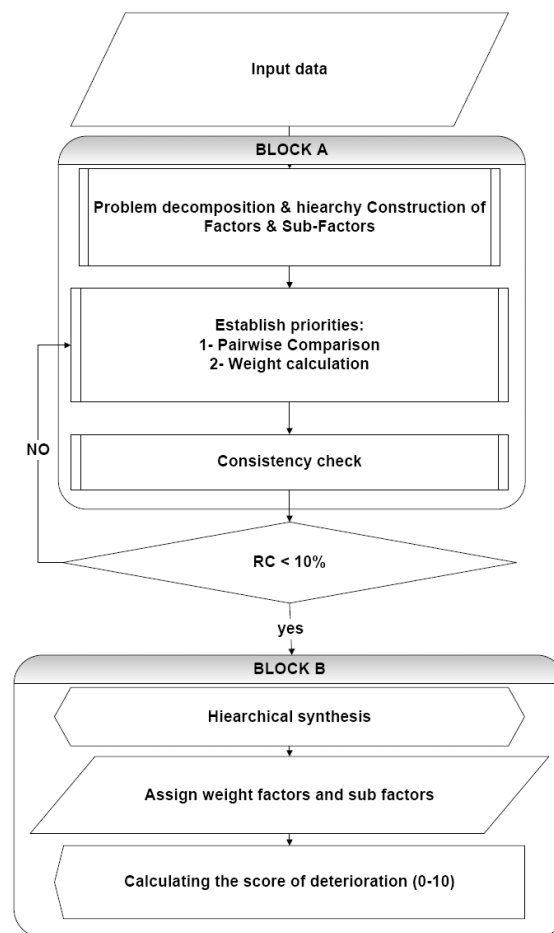


Figure 6.2: Functional block diagram of this research

## 6.6.2 Description of the model algorithm

The model being developed can be subdivided into two large Blocks of intermediate calculations, A and B, and two result outputs, as shown in Figure 6.3. Block A of this model pertains to the calculation of the weight of factors and sub factors. Section A1 of the component pertains to the storage of essential data to be used during the various steps of calculations. The second section, A2, shows all factors and sub-factors that play a role in the degradation process. This selection of factors is based on an elimination process, according to the impact level of each factor identified in the degradation. The first calculation step consists of grouping factors as a multi-level hierarchical structure.



**Figure 6.3: Model algorithm**

Section A2 focuses on establishing priorities by creating pairwise comparison matrixes between factors according to their relative importance (step 3). From these matrix calculations, the weight of each factor is calculated (step 4). The next step allows verifying the consistency of pairwise comparison previously defined in step 2 to using the consistency ratio (CR). If the CR value is not above 10%, the obtained weights are kept, otherwise the matrix coefficients in step 2 are modified until a satisfactory CR value is achieved. The obtained weights represent the result for component A of the model.

Component B is meant to calculate the score of global degradation (SGD). It encompasses step 5, which is the identification of each factor's attributes according to its value. This value represents a model input allowing the calculation of the scores of degradation (step 6): score of structural degradation (SSD), score of hydraulic degradation (SHD) and then score of global degradation (SGD). Based on the value of SGD, the state of degradation is defined. The two output values obtained from the model are the SGD and the category of degradation.

## **6.7 Development of the degradation model**

Choosing a suitable for weighting the model factors turns out to be quite difficult, yet of high importance when assessing the degradation of flow conditions in pipes. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method proved to be a wise choice given its main advantage: offering the possibility to check the consistency of the weights. It is a multi-criteria method that was developed at the Wharton School of Business at Pennsylvania University by Saaty (Saaty, 1980) and has since been applied to many problems. For example, in 1995 there were more than 1000 articles in scientific journals discussing the AHP method (Marc Fumey, 2001). Due to its success, it was implemented in several decision-support software systems such as ExpertChoice, HIPRE3+, Which&why, Spreadsheets, Multcsync.

Not only is it very simple to use, but the AHP method can integrate an unlimited number of factors and offers decision-makers a great deal of flexibility when making modifications to the factors depending on the importance attributed to each of them (that is eliminating or adding factors without necessarily following the established hierarchy). However, one must be careful when introducing new factors. The relative importance of each factor changes and two factors can thus get the same score where, in reality, one has a wider range of values than the other.

The AHP method was shown to be suitable for the solving of a great number of decisional problems using a quantitative approach, by developing a decision-support model presented in the form of a hierarchy. Saaty (1982) specifies that solving a problem with the AHP method requires three steps: (1) establishing hierarchies between the factors involved in the problem, (2) establishing priorities based on pairwise comparison and (3) checking logical consistencies (Cherqui, 2000).

### **6.7.1 Description of the calculation steps**

#### **Calculation steps in Block A**

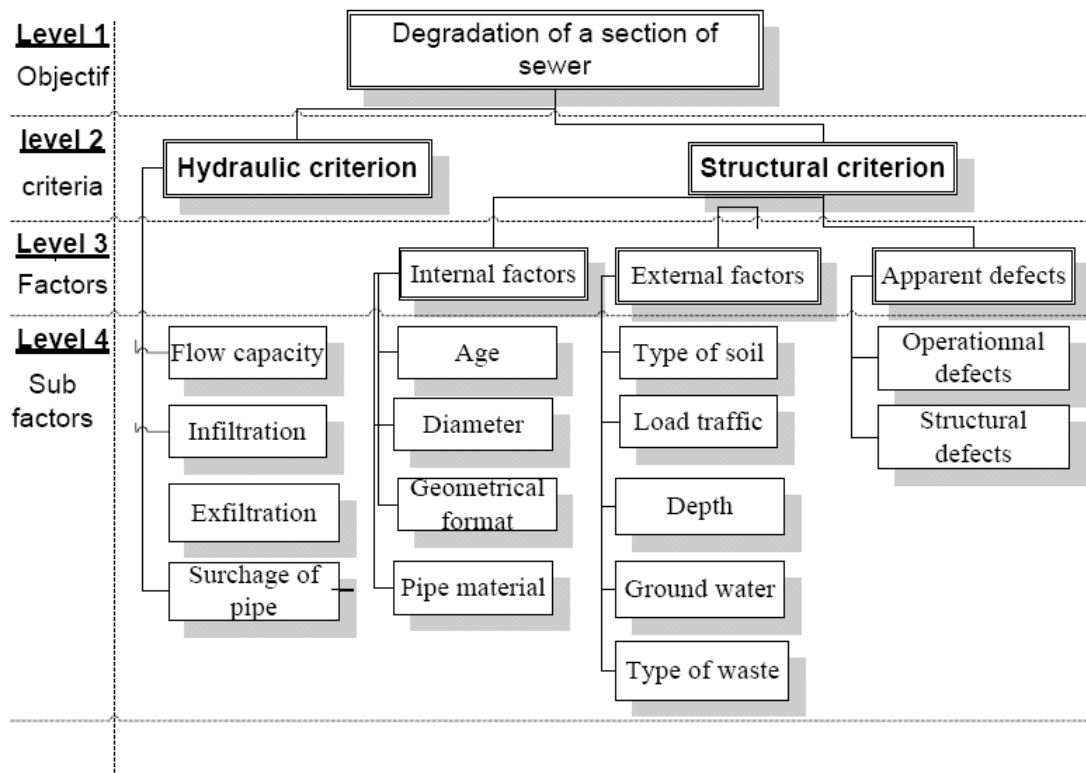
Block A is made up of 2 sections: section A1, the structure of the problem and section A2, matrix calculus.

##### *Step 1: Identification of degradation factors and sub factors*

This step presents all the potential factors and sub factors related to pipe degradation. As shown in Table 2, a total of 15 factors have been identified: 4 internal factors (related to the pipe), 5 external factors (related to the surroundings of the site), 2 factors related to apparent defects and 4 hydraulic factors.

##### *Step 2: Elaboration of the hierarchical structure*

The hierarchical structure of the problem is made up of four levels as shown in Figure 3.4: Level 1 consists of defining the problem being analyzed, which is rating the state of degradation of a pipe according to its SGD value (SGD from 0 to 10). Level 2 includes the two main degradation criteria: hydraulic and structural. Level 3 identifies the various factors of the structural criterion: internal, external or apparent defects. Finally, the last level encompasses the sub-factors from each category.



**Figure 6.4: Hierarchical structure by AHP**

*Step 3: Composition of pairwise comparison matrixes*

For each level from 2 to 4, pairwise comparison matrixes are created between internal factors, external factors and apparent defects as well as between sub-factors. This compares the relative importance of all elements belonging to the same hierarchical level, taken two by two, in relation to the element from the level directly above. A reciprocal square matrix  $A(a_{ij})$  is then created using the evaluations of the weight relationships. In that manner, we get:

$$a_{ii} = 1 \quad (6.1)$$

$$a_{ji} = 1/a_{ij} \text{ (Reciprocal value)} \quad (6.2)$$

$i$  and  $j$  vary from 1 to  $n$  (number of parameters). And the values for  $a_{ij}$  are determined according to the scale in Table 6.3.

**Table 6.3: Numerical scale of AHP**

<b>Intensity of importance</b>	<b>Verbal judgment of preference</b>
1	Equal importance
3	Moderate importance
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2, 4, 6 and 8	Intermediate values between adjacent scale values

In the comparison matrix between internal factors (Table 6.4a), it was hypothesized that the age of the pipe is considered to be more to a lot more important than the other factors. Furthermore, the level of the ground water and the type of effluent are considered as the two most important factors in terms of their impact on the degradation compared to the importance of the other factors. This is shown by the values ranging from 5 to 8 in lines 4 and 5 of the representative matrix shown in Table 6.4.

For the comparison matrix between hydraulic factors (Table 6.4c), it was hypothesized that the maximum capacity as well as the phase loading are the two factors having a preponderant impact when assessing the degradation of a pipe.

**Table 6.4: Pairwise comparison matrixes**

(a)	<b>Age</b>	<b>Material</b>	<b>Diameter</b>	<b>Geometrical format</b>
<b>Age</b>	1	4	5	7
<b>Material</b>	1/4	1	2	4
<b>Diameter</b>	1/5	1/2	1	3
<b>Geometrical format</b>	1/7	1/4	1/3	1

(b)	<b>Type of soil</b>	<b>Load traffic</b>	<b>Depth</b>	<b>Ground water</b>	<b>Type of waste</b>
<b>Type of soil</b>	1	7	1/6	1/6	1/5
<b>Load traffic</b>	1/7	1	4	3	1/4
<b>Depth</b>	6	1/4	1	3	6
<b>Ground water</b>	6	1/3	1/3	1	6
<b>Type of waste</b>	5	4	1/6	1/6	1

(c)	<b>Flow capacity</b>	<b>Exfiltration</b>	<b>Infiltration</b>	<b>Surcharge of pipe</b>
<b>Flow capacity</b>	1	6	6	2
<b>Exfiltration</b>	1/6	1	1/2	1/5
<b>Infiltration</b>	1/6	2	1	1/5
<b>Surcharge of pipe</b>	1/2	5	5	1

(d)	<b>Internal factors</b>	<b>External factors</b>	<b>Apparent defects</b>
<b>Internal factors</b>	1	4	2
<b>External factors</b>	1/4	1	1/3
<b>Apparent defects</b>	1/2	3	1

(e)	<b>Structural defects</b>	<b>Operational defects</b>
<b>Structural defects</b>	1	1
<b>Operational defects</b>	1	1

*Step 4: Creation of weight vectors*

Once the pairwise comparison matrixes are obtained, weight vectors are calculated for each factor in the following manner:

Calculation of the sum of each column of the pairwise comparison matrix [A]:

$$S_j = \sum_{i=1}^N C_{ij} \quad (6.3)$$

Where j is the suffix of the column, from 1 to N and where N is the number of elements to compare.

Calculation of the normalized matrix [A<sub>N</sub>] by dividing each a<sub>ij</sub> element from matrix [A] by the sum of the column to which it belongs (C<sub>j</sub>):

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (6.4)$$

Calculation of the weight vector [w] for the factors from the average of the columns for matrix [A<sub>N</sub>]:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^N a'_{ij}}{N} \quad (6.5)$$

*Step 5: Analysis of judgment consistency*

This step focuses on the verification of the consistency of the judgment matrixes to validate the calculated weights. Saaty (1982) defined the consistency index (CI) as:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (6.6)$$

Where  $\lambda_{\max}$  is the maximum eigenvalue

To calculate  $\lambda_{\max}$ , we calculate columns [B] and [D], defined as:

$$b_j = \sum_{i=1}^N p_i * a'_{ji} \quad (6.7)$$

$$d_j = b_j / p_j \quad (6.8)$$

Whereby:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^N d_j / N \quad (6.9)$$



The more the consistency index increases, the more inconsistent the user's judgments become and vice versa. The variable indicating the consistency index CI is compared to critical values of the variable which defines the random index RI obtained through a simulation, depending on the value of N, as shown in Table 6.5.

**Table 6.5: Random inconsistency indices (RI)**

Number of criteria	RI
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

The consistency ratio CR is defined from the CI and RI indexes, as follows:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.10)$$

To validate the judgment matrixes, the critical value of CR is defined here as 0.10 (Saaty, 1980).

- If  $CR > 0.10$ , then adjusting judgments is required by consulting the decision-maker and experts again;
- If  $0 < CR \leq 0.10$ , then the adjustments that would have to be made to the judgments would be small in relation to the real components of the eigenvector [w]. In this case, it is concluded that the obtained rating is valid;
- If  $CR = 0$  then  $CI = 0$  since  $\lambda_{max} = N$ . The judgments are totally consistent and the rating can be adopted.

Once the consistency of the judgments has been checked, the obtained weights are considered to be validated. Table 6.6 shows all these weights.

**Table 6.6: Weights of factors and sub factors**

		$w_i$	CI	CR (%)
Comparison between criteria	Structural	0.5	0	-
	Hydraulic	0.5		
<b>STRUCTURAL CRITERION</b>				
Comparison between factors	Internal	0.56	0.009	1.6
	External	0.12		
	Defects	0.32		
<b>Internal factors</b>				
Comparison between sub factors	Age	0.6	0.035	3.9
	Material	0.21		
	diameter	0.13		
	Geometrical format	0.06		
<b>External factors</b>				
Comparison between factors	Type of soil	0.04	0.08	7.1
	Load traffic	0.1		
	Depth	0.11		
	Ground water	0.41		
	Type of waste	0.34		
<b>Defects factors</b>				
Comparison between factors	Structural defects	0.5	0	-
	Operational defects	0.5		
<b>HYDRAULIC CRITERION</b>				
Comparison between sub factors	Flow capacity	0.51	0.032	3.5
	Exfiltration	0.07		
	Infiltration	0.09		
	Surcharge of pipe	0.33		

### Steps for calculations in Block B

In Block B, the global degradation score is calculated in two steps (6 and 7) as follows.

#### *Step 6: Identification of each factor's and sub factor's attributes*

Once the consistency of the judgments has been verified, the scoring of the categories is performed for each sub factor designated by  $C_{ij}$ . Each sub factor category is scored from 0 to 10 according to the impact on degradation. The "0" value represents the score of the category with the lowest impact on degradation whereas "10" is the one with the most impact.

Regarding the factor «age of the pipe», it is believed that its impact on degradation is almost non-existent for a pipe less than 10 years old. However, from an age of 90 years, the impact is considered to be maximal. The factor «type of pipe material», PVC and polyethylene are the materials that perform best when compared to ductile or cast iron. As for the factor «pipe diameter», smaller pipes are evidently more vulnerable to degradation because they get blocked more quickly. As far as installation depth is concerned, a depth of 2 meters or more is essential. Regarding apparent defects, a scoring system equivalent to the one used in the WRC model was used, but with a scale of 0 to 10 instead of 0 to 100.

For the infiltration factor, we chose a scoring similar to the CERIU system with a scale of 0 to 10. The categories for the phase loading factor are identified by the height difference between the burial depth and the water level. Therefore, when dealing with height differences of less than 1.5 m, the impact of this factor on degradation is maximal. This value of 1.5 m refers to house basements that need protection against flooding. Tables 6.7 and 6.8 represent scoring categories for all structural and hydraulic factors, respectively. These values are based on various opinions obtained from municipal sewer system managers.

**Table 6.7: Scoring categories for Structural factors**

Criteria	Factors	Sub factors	Attributes	Score
Structural degradation	Internal factors	Age	> 90	10
			81 to 90	9
			71 to 80	8
			61 to 70	7
			51 to 60	6
			41 to 50	5
			31 to 40	4
			21 to 30	3
			11 to 20	2
			0 to 10	1
		Material	Cast/ductile iron	10
			Asbestos	8
			Concrete / unreinforced concrete	7
			PVC/ polyethylene	6
		Diameter	<= 200 mm	10
			200 to 250 mm	5
			250 to 300 mm	3
			>300 mm	1
		Geometrical format	Basket arch	10
			Semi-elliptic	8
	Horseshoe		5	
	Ovoidale		3	
	Circular		1	
	External factors	Type of soil	Highly aggressive	10
			Agressive	7
			Moderate	5
			Nonaggressive	0
		Load traffic	High	10
			Moderate	8
			Low	6
		Depth	<1.5m	8
			> 4.5	6
			1.5 to 4.5	1
		Ground water	High	10
			Moderate	7
			Low	3
		Type of waste	Highly aggressive	9
			Agressive	7
			Moderate	3
			Nonaggressive	0
Defects		Structural defects	Collapsed pipe	10
			Hole	10
			Deformed	10
	Broken		5	
	Crack		2	
	Defects of joint	0		
	Operational defects	Root	10	
		Obstruction	10	
		Debris	10	
		Crusting	5	

**Table 6.8: Scoring categories for hydraulic factors**

Criteria	Factors	Attributes	Score
Hydraulic degradation	Flow capacity	Insufficient	10
		Sufficient	7
	Exfiltration	High	10
		Moderate	7
		Low	3
	Infiltration	Trace	2
		Seeping	4
		Dripping	6
		Running	8
		Gushing	10
	Surcharge of pipe	Full pipe	0
		Height difference between burial and water depth < 1.5m	10
		Height difference between burial and water depth >=1.5m	7

*Step 7: Calculation of degradation scoring*

Once the weights, factor and sub-factor categories are determined, the scores for global, structural, hydraulic and global degradation can be calculated as follows:

$$SGD = w_s * SSD + (1 - w_s) * SHD \quad (6.11)$$

$$SSD = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i * v_{ij} * C_{ij} \quad (6.12)$$

$$SHD = \sum_{k=1}^p w_k * c_k \quad (6.13)$$

where SGD is the score of global degradation, SSD is the score of structural degradation, SHD, the score of hydraulic degradation,  $w_s$ , the weight of the structural degradation,  $w_h$ , the weight of the hydraulic degradation,  $w_i$ , the weight of factor  $i$ ,  $v_{ij}$ , the weight of the sub factor  $j$  corresponding to factor  $i$ ,  $C_{ij}$ , the score of the category of sub-factor  $j$ ,  $w_k$ , the weight of factor  $k$  and  $c_k$ , the score of the category of factor  $k$ .

*Step 8: Identification of the category for the state of degradation*

Five categories have been defined to assess the state of degradation of the pipe. Table 6.9 shows how the state of degradation of a pipe can be identified from the SGD value.

In Table 6.9, the class 1 corresponds to an SGD score of 0 to 2 and represents a state of degradation with no current or potential risks. However, the class 5 (SGD score of 8 to 10) represents a very critical state of degradation with serious hydraulic and/or structural failures.

**Table 6.9: State of degradation**

<b>Class</b>	<b>SGD</b>	<b>State of degradation</b>
<b>1</b>	0 to 2	State of degradation with no current or potential risks
<b>2</b>	2 to 4	Signs of degradation minor stable
<b>3</b>	4 to 6	Signs of deterioration may develop minor
<b>4</b>	6 to 8	Signs of degradation with dangerous developments
<b>5</b>	8 to 10	Very critical state of degradation with serious hydraulic and/or structural failure

## **6.8 Case study: City of Saint-Hyacinthe**

Data collected from the city of Saint-Hyacinthe was used to test, calibrate and validate the degradation assessment model developed in this study. The following sections give a description of the city, the Pratte and Douville basins sewer systems, as well as the fourteen pipes selected from these two sewer systems.

### **6.8.1 Description of the existing sewer system**

Located in the Des Maskoutains REGIONAL COUNTY MUNICIPALITY in the heart of the Montérégie region (South Shore of Montreal), the city of Saint-Hyacinthe is the hub of a vast farming region, also known as Quebec's agri-food capital.

The existing sewer system is a combined storm sewer system approximately 40 years old, which drains domestic wastewaters as well as storm waters. On rainy days, these systems suffer from a surcharge and a large part of this water flows directly into the receiving environment, untreated. Domestic (sanitary) waters from the Pratte basin flow gravitationally toward the intercepting (sanitary) sewer, located upstream from the Pratte pumping station. This structure is equipped with a hydraulic brake which limits the flow of water coming from the combined system. Domestic (sanitary) waters from the basin are evacuated from the Pratte sector via an outlet sewer that crosses the aforementioned structure.

The domestic (sanitary) sewer system of sector 4 (Bassin Douville Nord) is composed of pipes whose diameter varies from 250 mm to 450 mm.

The fourteen pipes selected for this case study are the following: two sections on Turcot, Bourassa and Choquette Streets, a section on Sylva-Clapin, Sacre-Cœur West, Gauthier, Vanier, Rolland-Salvail, Coulonge, Chénier and Père-Marion Streets. Table 6.10 shows the physical characteristics as well as the age of the pipes.

**Table 6.10: Characteristics of Selected pipes**

Id	Street	Network type	Age	Lenght (m)	Diameter	Material pipe
			(years)		(mm)	
CC0875	Turcot	Combined	63	63.294	300	Sandstone
CC0552	Sylva-Clapin	Combined	62	117.441	300	Sandstone
CC0879	Turcot	Combined	109	60.998	600	Reinforced concrete
CC0427A	Bourassa	Combined	57	99.018	300	Reinforced concrete
CC1027	Sacre-Coeur Ouest	Combined	56	28.753	375	Reinforced concrete
CC0426	Choquette	Combined	54	128.227	375	Unreinforced concrete
CC0483	Choquette	Combined	54	128.125	600	Reinforced concrete
CC1066	Bourassa	Combined	53	11.381	375	Absestos ciment
CC0913	Gauthier	Combined	50	89.79	600	Reinforced concrete
CC0421	Vanier	Combined	47	127.009	600	Reinforced concrete
CS2273	Rolland-Salvail	Sanitairy	2	84.03	375	PVC
CS0215	Coulonge	Sanitairy	4	120	250	PVC
CS2252	Chénier	Sanitairy	3	102	250	PVC
CS2251	Père-Marion	Sanitairy	3	86.595	250	PVC

### 6.8.2 Degradation assessment for selected pipes

Inspections performed on these pipes with a CCTV have led to an interpretation of the level of functional deficiency and structural integrity as shown in Table 6.11. A rating was given with regards to the level of deficiency and a hierarchical organization of the structural degradation.

**Table 6.11: Hierarchical organization of the structural degradation**

Id.	Functional deficiency		Structural integrity	Hierarchy
	Level	Score	Level	Level
CC0875	Low	2	Low	Low
CC0552	Low	2	Moderate	Low
CC0879	Low	2	Very low	Low
CC0427A	Low	2	Very low	Low
CC1027	Low	2	Very low	High
CC0426	Low	2	Low	Moderate
CC0483	Low	2	Low	Moderate
CC1066	Low	2	Very low	Low
CC0913	Null	3	Very low	High
CC0421	Low	2	Low	Moderate
CS2273	Low	2	Very low	Low
CS0215	Low	2	Very low	Low
CS2252	Low	2	Very low	Low
CS2251	Low	2	Very low	Low

The values of structural, hydraulic and global degradation scores were determined using the developed model as detailed in Tables 6.12, 6.13 and 6.14. Table 6.12 shows that pipe CC0879 has a degradation score of 7 due to the combination of 2 factors: its high diameter (600 mm) and defects in its joints. The sanitary basin pipes, however, have a comfortable score of 2 considering their small diameter (250 – 375 mm). Pipe CC1027 has the highest SHD value because it is pressurized and its hydraulic capacity is limited. The SGD values obtained vary between 1 and 5. A value of 1 represents pipes of the domestic (sanitary) system and 5 is pipe CC1027. The categories of degradation associated to the analyzed pipes are summarized in Table 6.14.



**Table 6.12: SDD for the selected pipes (<sup>a</sup> Reference year: 2009)**

Id.	Age <sup>a</sup>	Diam.	Material	Forme	Type of soil	Load traffic	Depth	Ground water	Type of waste	structural defects	Operational defects	SSD
	(ans)	(mm)										
CC0875	63	300	Sandstone	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Crack	Non	4
CC0552	62	300	Sandstone	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Crack	Debris	6
CC0879	109	600	Reinforced concrete	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Defects of joint	Debris	7
CC0427A	57	300	Reinforced concrete	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Crack	Obstruction	6
CC1027	56	375	Reinforced concrete	Circular	Moderate	Moderate	1.5 à 4.5	High	Moderate	Defects of joint	Non	4
CC0426	54	375	Unreinforced concrete	Circular	Moderate	High	1.5 à 4.5	High	Moderate	Crack	Debris	6
CC0483	54	600	Reinforced concrete	Circular	Moderate	High	1.5 à 4.5	High	Moderate	Defects of joint	Debris	5
CC1066	53	375	Asbestos cement	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Non	Root	5
CC0913	50	600	Reinforced concrete	Circular	Moderate	Moderate	1.5 à 4.5	High	Moderate	Defects of joint	Root	5
CC0421	47	600	Reinforced concrete	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Moderate	Crack	Root	5
CS2273	2	375	PVC	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Non. agrss	Non	Non	2
CS0215	4	250	PVC	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Non. agrss	Non	Non	2
CS2252	3	250	PVC	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Non. agrss	Non	Non	2
CS2251	3	250	PVC	Circular	Moderate	Low	1.5 à 4.5	High	Non. agrss	Non	Non	4

**Table 6.13: SHD for the selected pipes**

<b>Id.</b>	<b>Flow</b>	<b>Exfiltration</b>	<b>Infiltration</b>	<b>Surcharge of pipe</b>	<b>SHD</b>
CC0875	Sufficient	Moderate	Seeping	Full pipe	1
CC0552	Sufficient	Moderate	Seeping	Full pipe	1
CC0879	Sufficient	Moderate	Seeping	Full pipe	1
CC0427A	Sufficient	Moderate	Non	Full pipe	0
CC1027	Insufficient	Moderate	Non	Full pipe	6
CC0426	Sufficient	Moderate	Trace	Full pipe	1
CC0483	Sufficient	Moderate	Non	Full pipe	0
CC1066	Sufficient	Moderate	Non	Full pipe	0
CC0913	Sufficient	Moderate	Trace	Full pipe	1
CC0421	Sufficient	Moderate	Trace	Full pipe	1
CS2273	Sufficient	Low	Non	Full pipe	0
CS0215	Sufficient	Low	Non	Full pipe	0
CS2252	Sufficient	Low	Non	Full pipe	0
CS2251	Sufficient	Low	Non	Full pipe	0

**Table 6.14: State of degradation of selected pipes**

<b>Id.</b>	<b>SGD</b>	<b>Class</b>	<b>State of degradation</b>
CC0875	2	2	Signs of degradation minor stable
CC0552	3	2	Signs of degradation minor stable
CC0879	4	3	Signs of deterioration may develop minor
CC0427A	3	2	Signs of degradation minor stable
CC1027	5	3	Signs of deterioration may develop minor
CC0426	3	2	Signs of degradation minor stable
CC0483	3	2	Signs of degradation minor stable
CC1066	3	2	Signs of degradation minor stable
CC0913	3	2	Signs of degradation minor stable
CC0421	3	2	Signs of degradation minor stable
CS2273	1	1	State of degradation with no current or potential risks
CS0215	1	1	State of degradation with no current or potential risks
CS2252	1	1	State of degradation with no current or potential risks
CS2251	2	2	Signs of degradation minor stable

### 6.8.3 Result analysis

The intervention plan for the city of Saint-Hyacinthe shows SGD values on a scale of 0 to 30. These scores were converted these scores to a scale of 0 to 10 so that their values could be compared with the ones obtained with our model. The converted scores were then associated them with categories ranging from 1 to 5. Category 1 corresponds to a high score and category 5 corresponds to a low score as indicated in Table 3.15. Results from the two evaluation approaches indicate a high level of concordance for most of the selected pipes. A slight difference in the condition category can be observed for the following pipes: CC0875, CC0879, CC0427A, CC1027, CC1066 and CC0913. This difference is acceptable because it is caused by a limit value of the global score (2 can be considered a value of class 1 from 1 to 2 or of class 2 from 2 to 4).

**Table 6.15: Comparison of results**

Id.	SGD by intervention plan				SGD by proposed model		
	/30	/10	Interval	Class	/10	Interval	Class
CC0875	22.5	8	8 to 10	1	2	2 to 4	2
CC0552	18.5	6	6 to 8	2	2	2 to 4	2
CC0879	26.5	9	8 to 10	1	3	2 to 4	2
CC0427A	26.5	9	8 to 10	1	3	2 to 4	2
CC1027	21.5	7	6 to 8	2	5	4 to 6	3
CC0426	20	7	6 to 8	2	2	2 to 4	2
CC0483	20	7	6 to 8	2	2	2 to 4	2
CC1066	26.5	9	8 to 10	1	3	2 to 4	2
CC0913	25	8	8 to 10	1	3	2 to 4	2
CC0421	20	7	6 to 8	2	3	2 to 4	2
CS2273	26.5	9	8 to 10	1	1	0 to 2	1
CS0215	26.5	9	9 to 10	1	1	0 to 2	1
CS2252	26.5	9	10 to 10	1	1	0 to 2	1
CS2251	26.5	9	11 to 10	1	1	0 to 2	1

## 6.9 Sensitivity analysis

The model allows the evaluation of the state of degradation of a specific pipe section based on the SGD. This score is determined by a linear combination (Équation 6.11) expressing the relative importance of the structural and hydraulic criteria by means of their weights  $w_s$  and  $(1-w_s)$ , respectively. This relative importance has never been discussed in the literature. As such, a safe process which consists in attributing the same level of importance to structural and hydraulic criteria was considered ( $w_s = 0.5$ ) (Équation 6.11).

To study the sensitivity of the model to parameter  $w_s$  (weight of the structural criterion), a variation matrix of the state of global degradation for various values of the score of structural degradation (SSD) in comparison to the variation of the weight  $w_s$  renders the sensitivity of the model to this parameter more visible (Table 6.16).

Table 6.16: Sensitivity analysis

(a)

		SHD = 2									
SSD	ws = 0.1	ws = 0.2	ws = 0.3	ws = 0.4	ws = 0.5	ws = 0.6	ws = 0.7	ws = 0.8	ws = 0.9	ws = 1.0	
0	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
4	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	
5	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
6	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	
7	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	
8	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	
9	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	
10	2	3	3	3	4	4	5	5	5	5	

(b)

		SHD = 5									
SSD	ws = 0.1	ws = 0.2	ws = 0.3	ws = 0.4	ws = 0.5	ws = 0.6	ws = 0.7	ws = 0.8	ws = 0.9	ws = 1.0	
0	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	
1	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	
2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	
4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
6	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	
7	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	
8	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	
9	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	
10	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	

(c)

		SHD = 8									
SSD	ws = 0.1	ws = 0.2	ws = 0.3	ws = 0.4	ws = 0.5	ws = 0.6	ws = 0.7	ws = 0.8	ws = 0.9	ws = 1.0	
0	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	
1	4	3	3	3	3	2	2	2	2	1	
2	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	
3	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	
4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	
5	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	
6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
8	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	
9	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	
10	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	

In this analysis, the score of hydraulic degradation (SHD) was set according to the reports of the experts we met. Results were compared to those of reference case associated to  $w_s=0.5$ . Table 6.16 shows the results obtained

for SHD values of 2, 5 and 8. These results show that the model produces results more or less identical when the values of  $w_s$  are between 0.4 and 0.6. For example, when SHD=5 and  $w_s=0.6$  (Table 6.16b) the assessment of the state of degradation remains unchanged (compared to reference case,  $w_s=0.5$ ) for all values of SSD, except for the case of SSD=2. However, for values such as  $w_s \leq 0.3$  and  $w_s \geq 0.7$ , results differ substantially from the reference case ( $w_s=0.5$ ).

## 6.10 Presentation of the interface developed

A graphic interface was developed to facilitate the data entry process and the calculation of the SGD. The development of this tool was carried out in two steps. The first was to translate the calculus algorithm into machine language and the second was to create the graphic interface. For the latter, we opted for a classic-style interface (i.e. a menu bar, a tool bar and a status bar) as shown in Figure 6.5.

Figure 6.5 : Graphic interface

The computer tool presents the following sections: General Information, Structural Criteria, Hydraulic Criteria, Global Score and Ranking. In the “General Information” section the user is asked to give a name to his project, to define the type of sewer system being studied, and to give information on the municipality where the system is located.

In the “Structural Criteria” section, the user gives the characteristics of the internal and external factors as well as the apparent defects. Once this data has been entered, the user can then calculate the structural score. In the “Hydraulic Criteria” section, the user gives the characteristics of the hydraulic factors. Once this data has been entered, the user can then calculate the hydraulic score. In the last section the user can finally calculate the global score and determine the ranking associated to the state of degradation of the pipe.

## **6.11 Conclusion and recommendations**

The goal of this work was to develop a model that could assess the state of degradation of a specific sewer section. This model combines the hydraulic and structural components of degradation as identified through 15 factors (age, diameter, type of effluent, phase loading, etc.). The AHP method was used to create a rating system designed to express the relative importance of a family of factors. Results show that the hydraulic capacity has a major impact on degradation (weight equals to 0.51), followed by phase loading (0.33) and infiltration (0.09). Exfiltration is the factor with the lowest impact (0.07).

The developed model was tested on a case of selected sections from the sewer system of the Pratte basin in Saint-Hyacinthe. The results obtained from this model were compared to the ones from the intervention plan for the city.

A sensitivity analysis of the model versus the weight parameters of the structural degradation showed that the stability of the model is verified for values of  $w_s$  from 0.4 to 0.6. It still remains, nonetheless, that the developed model needs several trial implementations and case studies in order to refine the various parameters, thereby enabling it to accurately model the reality on the field. Sewer pipe degradation curves will have to be added to the model in order to improve the forecasting aspect. The computer tool designed for this purpose also needs to be used by several people and in various situations in order to improve it.

**Acknowledgments**

The authors would like to express their gratitude to the Quebec ministry MDEIE (Ministère de Développement Economique, Innovation et Exportation) for its financial support to this research. They would like to extend their appreciation to all municipal engineers (St-Hyacinthe, Gatineau, Dorval, Montréal (Verdun)) who facilitated this research by providing the required data.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION

La revue critique de la littérature a montré que l'aspect hydraulique de la dégradation n'est pas encore bien incorporé dans les modèles de l'évaluation de la dégradation des égouts. D'où l'originalité du projet de proposer un modèle d'évaluation de l'état de dégradation des réseaux d'égout combinant les deux aspects : hydraulique et structural. Des classes d'état de la dégradation allant de 1 à 5 ont été identifiées selon la valeur du score de la dégradation globale SGD, 1 représentant un état de dégradation sans danger actuel ni potentiel et 5 un état de dégradation critique.

Une méthodologie de détermination de l'état de dégradation des égouts a été proposée. La présente recherche a développé un modèle capable de déterminer l'état hydraulique, structural et l'état global de la dégradation en se basant sur un ensemble de facteurs et sous facteurs influençant la dégradation. Ces facteurs de types hydrauliques, internes, externes et de défauts apparents, ont été regroupés selon une structure hiérarchique adaptée à la méthode AHP pour déterminer la pondération relative de chaque facteur. Ce système de pondération de la méthode AHP est considéré très pertinent car il permet de vérifier la consistance de cette pondération.

En ce qui concerne les facteurs hydrauliques, la capacité hydraulique présente plus d'impact sur la dégradation par rapport à la mise en charge et l'infiltration respectivement. L'exfiltration représente le facteur qui a le faible impact sur la dégradation.

Concernant les facteurs internes (l'âge de la conduite, le diamètre, le type de matériau et la forme géométrique), ils ont un grand impact en comparaison avec le facteur des défauts apparents et les facteurs externes (type de sol, type d'effluent, niveau de la nappe, profondeur de pose et la charge du trafic).

Pour des fins de calibration et de validation du modèle, une étude de cas a été réalisée sur des tronçons du réseau d'égout du bassin Pratte de la ville de Saint-Hyacinthe. La comparaison des résultats du modèle développé avec ceux du plan d'intervention de la municipalité de Saint-



Hyacinthe a montré une cohérence très satisfaisante entre ces deux résultats. Le modèle a été donc capable de reproduire l'évaluation des tronçons sélectionnés par une équipe d'ingénieurs. Il fournit par conséquent aux municipalités un outil efficace, robuste et facile à utiliser ne nécessitant pas des données difficiles à obtenir.

Le critère hydraulique a été supposé de même importance par rapport au critère structural. Cette importance n'a jamais été vérifiée dans la littérature. Ainsi, une démarche sécuritaire a été adoptée dans ce travail qui consiste à accorder le même ordre d'importance pour les deux critères (poids  $w_s$  du critère structural égale à 0.5).

Une analyse de sensibilité du modèle à ce paramètre  $w_s$  a été effectuée en variant la note de la dégradation globale SGD en fonction de  $w_s$  pour différentes valeurs de la note structurale SSD et pour une note hydraulique SHD égale à 2, 5 et 8. Les résultats montrent que les résultats sont peu affectés dans l'intervalle de  $w_s$  de 0.4 à 0.6.

Basé sur ce modèle, un outil informatique a été développé pour l'évaluation de la dégradation hydraulique, structurale et globale des réseaux d'égout. Cet outil permet à l'utilisateur de faire la saisie des données nécessaires à l'évaluation de l'état du tronçon en question. De plus, il est capable d'analyser un grand nombre de tronçons en regroupant les résultats de tout le réseau sous forme de tableau de synthèse.

Par conséquent, le modèle proposé sera de grande utilité pour supporter les municipalités dans leur démarche d'évaluation de l'état de dégradation de leurs réseaux et dans l'élaboration d'un plan d'intervention capable de répondre à leurs exigences ainsi qu'à celles des ministères.

Les recommandations suivantes ou perspectives futures à la présente recherche peuvent être résumées de la manière suivante:

- Ajout des facteurs liés à l'interdépendance de l'état des égouts à ceux des infrastructures adjacentes;
- Ajout des composantes d'évaluation de la dégradation du réseau d'eau potable et de la chaussée pour optimiser l'ensemble des interventions;

- Intégration des courbes de dégradation des différents facteurs afin de prédire l'état de dégradation des conduites d'égout. Ceci permettra aux municipalités de mieux planifier et gérer leurs interventions;
- Application du modèle sur d'autres réseaux de municipalités au Québec;
- Ajout d'une composante dans l'outil informatique de calcul des poids des facteurs selon la méthode AHP permettant à l'utilisateur de choisir ses propres valeurs dans les matrices de comparaison par paire. À cet effet, l'outil a également besoin d'être utilisé par plusieurs personnes et dans plusieurs situations pour pouvoir l'améliorer.

## BIBLIOGRAPHIE

Abraham, D., Wirahadikusumah, R., Short, T., and Shahbahrami, S. (1998). Optimization modeling for sewer network management.” *J. Constr. Eng. Manage.*, 124(5), 402–410.

Al-Barqawi, H. (2006). “Condition rating models for underground infrastructure: Sustainable water mains.” MS thesis, Concordia Univ., Montreal, Canada.

Al-Barqawi, H., and Zayed, T. (2008). “Infrastructure Management: Integrated AHP/ANN Model to Evaluate Municipal Water Mains’ Performance.” *J. Infrastruct.Syst.*, 14(4), 305–318

Anandalingam, G., et Olsson (1989). “A multi-stage multi-attribute decision model for project sdelection.” *European journal of Operation Research*, 43(3), 271–283

Ariaratnam, S., El-Assaly, A., and Yang, Y. (2001). “Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models.” *J. Infrastruct.Syst.*, 7(4), 160–165.

Barda, O.H., Dupuis, J., Lencioni, P. (1990). “Multicriteria location of thermal power plants.” *European Journal Of Operational Research*, 45(2-3), 332-346.

Baur, R., and Herz, R. (2002). “Selective inspection planning with aging forecast for sewer types.” *Water Sci. Technol.*, 46(6-7), 389–396.

Bengassem, J. (2001). “Élaboration d’un système d’aide au diagnostique hydraulique et structural des réseaux d’assainissement urbains. Thèse de doctorat. École de Technologie Supérieure, Université du Québec”.

Bennis,S., Bengassem, J., Lamarre, P. (1999). “Méthodologie de partage des responsabilités de refoulement entre les tronçons.”, *vecteur environnement*.32(3), 34-45.

Brière, F. (2000) “Distribution et collecte des eaux”. Presses internationales Polytechnique de Montréal. 2<sup>ème</sup> édition.

Briggs, Th., Kunsch, P.L., Marschal, B. (1990). "Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETTEE methods." *European Journal of Operational Research*, 44(1), 1-10.

Chughtai, F., and Zayed, T. (2007). "Structural condition models for sewer pipeline." *Proc., Pipelines Conf., ASCE, Boston, July 8–11.*

Chughtai, F., and Zayed, T. (2008). "Infrastructure Condition Prediction Models for Sustainable Sewer Pipeline." *Journal of performance of constructed facilities, ASCE*, 22(5), 333-341.

CERIU (2010). *Programme de certification visant l'évaluation de l'état des conduites, version 4.3.1*

Cherqui, F. (2000). "Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier, méthode ADEQUA." *Thèse de doctorat, Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, Université de la Rochelle.*

El-Assali, A. & Ariaratnam, T., Ruwanpura, J., Ng, H. (2006). "Cost forecast model for sewer infrastructure." *Municipal Engineer* 159.

Federation of Canadian Municipalities and National Research Council (2004). " Examen et évaluation d'un réseau de collecte d'eaux pluviales ou d'eaux usées." *National guide to sustainable municipal infrastructure, Issue No. 1.0, Ottawa, Ontario, Canada.*

Fuamba, M., and Ibrango, S., (2007). "Hydraulic performance degradation of a conduit section: Case study of an ageing drainage system in Montreal." In *Proceedings of the 6th international conference on sustainable techniques and strategies in urban water management, NOVATECH 2007, Lyon - France - June 25-28, 2007*

Fumey M., (2001). "Méthode d'évaluation des risques agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations. " *Thèse de doctorat, Institut National, Polytechnique de Toulouse.*

Gautier J., (2005). "Développement d'un outil d'aide à la décision environnemental durable pour une grande ville. " *Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, École polytechnique de Montréal.*

Grigg, N. (1994). "Maintenance management systems for urban drainage." Proc., Urban Rehabilitation Programs Techniques, ASCE, New York, 2–10.

Guitouni, A., Martel, J.-M. (1998). "Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method." *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501-521.

Harker, P., Vargas L. (1987). "The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process." *Management Science* 33(11), 1383-1403.

Hasegawa, K., Wada, Y., and Miura, H. (1999). "New assessment system for premeditated management and maintenance of sewer pipe networks." Proc., 8th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Sydney, Australia, 586–593.

Mailhot, A., Duchesne, S., Musso, E., et Villeneuve J-P. (2000). "Modélisation de l'état structural des réseaux d'égouts : Application à une municipalité du Québec." *Canadian Journal of Civil Engineering*.

Maystre, L.Y., Pictet, J., Simos, J. (1994). "Méthodes multicritères ELECTRE : Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale." Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse.

Ministère des affaires municipales, des Régions et occupation du territoire (2005). "Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout."

McDonald, S., and Zhao, J. (2001). "Condition assessment and rehabilitation of large sewers." Proc., Int. Conf. on Underground Infrastructure Research, 361–369.

Najafi, M., and Kulandaivel, G. (2005). "Pipeline condition predicting using neural network models." Conf. Proc., Pipelines 2005: Optimizing Pipeline Design, Operations, and Maintenance in Today's Economy, ASCE, New York, 767–781.

Reyna, S. (1993). "Optimal planning of sewer systems rehabilitation." Thèse de doctorat, Université de Purdue, Indianapolis, USA.

Rostrum, J., Baur, R., Saegrov, S., Horold, S., and Schilling, W. (1999). "Predictive service-life models for urban water infrastructure management." Proc., 8th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Sydney, Australia, 594–601.

Roy, B. (1975). "Vers une méthodologie générale d'aide à la décision." *Metra*. 14 (3), 495-497.

Roy, B., slowinski, R., Treichel, W. (1992). "Multicriteria programming of water supply systems for rural areas." *Water Resources Bulletin*. 28 (1), 13-31.

Ruwanpura, J., Ariaratnam, S., and El-Assaly, A. (2004). "Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation." *Civ. Eng. Environ. Syst.*, 21(3), 169–185.

Saaty T. (1980). "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation." McGraw-Hill, ISBN 0-07-054371-2.

Saaty, T. (1982). "Decision-making for leaders: "The analytic hierarchy process for decision in a complex world." *Lifetime Learning*, Belmont, Calif.

Tabesh, M. & Madani, S. (2006). "A performance indicator for wastewater collection." *Water Practice & Technology*, 1(4).

Vincke, P. (1989). "L'aide multicritère à la décision." Édition Ellipses, Paris..

Yan, J. M., and Vairavamoorthy, K. (2003). "Fuzzy approach for pipe condition assessment." *Conf. Proc.*, 2003 Int. Conf. on Pipeline Engineering and Construction, ASCE, New York, 466–476.

Water research centre (2004). "Manual of sewer condition classification." 4ème edition.