

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
CLAUDE BRUXELLE

ÉLABORATION D'UN CADRE DE SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET À
L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES CIVILES

MONTREAL, LE 20 DÉCEMBRE 2005

(c) droits réservés de Claude Bruxelles

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Leconte, directeur de thèse

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel J. Assaf, codirecteur

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Hugues Rivard, président du jury

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Guy Félio, chargé de projet

Infrastructures Canada

Institut de recherche en construction

M. Saad Bennis, professeur

Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 26 OCTOBRE 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉLABORATION D'UN CADRE DE SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET À L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES CIVILES

Claude Bruxelles

RÉSUMÉ

Cette thèse consiste à élaborer le cadre d'un système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles que sont les chaussées et les réseaux d'aqueduc et d'égout. À partir de données sur l'état de chaque infrastructure, des modèles linéaires de prévision de leur comportement sont établis. La formulation de la prise de décision comprend une fonction objectif ayant pour but de minimiser les dépenses d'investissement sur chaque infrastructure pendant toute la période de planification, le tout soumis à des contraintes d'acceptabilité, de faisabilité et d'intégrité.

Le prototype SAGE intègre les données des différentes infrastructures dans le même système de décision. Il offre au gestionnaire la possibilité de procéder à une planification annuelle, triennale ou quinquennale. Il est un outil lui permettant une programmation rentable des interventions à entreprendre, année après année, durant toute la période de planification.

ÉLABORATION D'UN CADRE DE SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET À L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES CIVILES

Claude Bruxelles

SOMMAIRE

Cette thèse consiste à élaborer le cadre d'un système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles. Celles-ci sont les chaussées et les réseaux d'aqueduc et d'égout. Un tronçon contient une ou plusieurs sections de chaussée, une ou plusieurs sections d'égout et une ou plusieurs sections d'aqueduc.

Les modèles de prévision du comportement de chaque infrastructure sont primordiaux dans le choix de la stratégie d'intervention. Les modèles retenus sont linéaires pour chaque infrastructure puisque l'objectif de cette thèse est de démontrer la faisabilité de l'intégration des différentes infrastructures dans un même système de décision.

La formulation de la prise de décision comprend une fonction objectif qui est une fonction économique ayant pour but de minimiser les dépenses d'investissement sur chaque infrastructure pendant toute la période de planification, le tout soumis à des contraintes d'acceptabilité, de faisabilité et d'intégrité. Le coût minimum est obtenu lorsque les tronçons sont considérés individuellement. Le problème est alors résolu en appliquant le concept de l'algorithme additif.

Un prototype de SAGE qui intègre les données des différentes infrastructures dans le même système de décision, est développé et appliqué à un secteur de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal. Les tronçons comprennent 64 variables de décision par année de planification; sur un horizon de dix ans, il y a 640 variables de décision et 50 contraintes. Le SAGE offre la possibilité au gestionnaire de procéder à une planification annuelle, triennale ou quinquennale. L'analyse des résultats repose sur une planification triennale. Une attention particulière est portée sur la première période de planification car le gestionnaire doit recommander les interventions sur les réseaux d'infrastructures pour les trois prochaines années.

Cette thèse a permis de justifier l'intérêt, de prouver la faisabilité et de quantifier les bénéfices de l'intégration des différentes infrastructures dans un même système de décision. La mise en opération d'un SAGE des infrastructures civiles contribuera à l'amélioration de la qualité du processus de décision. L'objectif ultime est de fournir aux gestionnaires un outil pour leur permettre une programmation rentable des interventions à entreprendre, année après année, durant toute la période de planification.

ESTABLISHMENT OF A CIVIL INFRASTRUCTURE MAINTENANCE AND MANAGEMENT SUPPORT (CIMMS) SYSTEM

Claude Bruxelle

ABSTRACT

This thesis establishes the framework of a system that integrates the maintenance and management activities of civil municipal infrastructure. As such, the system, designated as SAGE for « *Système d'aide à la gestion et à l'entretien* », addresses the road network in addition to the sewer and water distribution systems. The main objective of this thesis is to establish that the optimization of the overall maintenance and rehabilitation (M&R) process by integrating the various civil infrastructure components is justified, doable and valuable.

This thesis first recognizes that the prediction of the future condition of each of those elements is equally important to select optimal M&R strategies and therefore to optimize the overall cost. However, the shape of the deterioration models selected herein are considered linear for each infrastructure, independently of the causes of deterioration since the main objective is to prove the need, feasibility and value of the integration of the various infrastructures in the same decision system, and not to predict future performance with precision.

The formulation of the decision support system of SAGE includes an integrative objective function that minimizes the overall investment for each infrastructure component throughout the duration of the program, subject to acceptability, feasibility and integrity constraints. This thesis shows that the minimum overall cost is obtained when the sections are first considered individually and then the problem is solved by applying the concept of the additive algorithm.

A prototype of SAGE, which integrates the data obtained from various infrastructure components in the same decision system, is provided and validated with data obtained from the District of Verdun, in the City of Montreal. The emphasis is on a triennial planning. A close attention is paid to the first period of planning because the manager must recommend the interventions on the networks of infrastructures for the three next years.

This thesis justifies and establishes the feasibility of the integration of the various infrastructure components in the same decision system and quantifies the value of the integration. As such, the implementation of SAGE will undoubtedly contribute to the improvement of the quality of the decision-making process in integrating M&R decisions between the various municipal civil engineering infrastructures. The ultimate objective is to provide a decision support to prioritize decisions and investments at the network level.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Mon intérêt pour le génie municipal et la voirie ne date pas d'hier. J'enseigne la technologie du génie civil au niveau collégial depuis une trentaine d'années.

Un stage de perfectionnement dans l'industrie portant sur les nouveaux outils informatiques de conception des infrastructures municipales et l'intégration des systèmes à référence spatiale a confirmé mon goût d'approfondir la question. Dès lors, les domaines de l'optimisation, prise de décision, développement informatique, système d'information géographique sont devenus pour moi des éléments que je voulais mieux comprendre.

Les activités de formation, entreprises autant dans le cadre de la maîtrise en génie de la construction que dans celui du doctorat en génie, m'ont donné l'occasion de mettre à jour mes connaissances dans mes domaines de spécialisation. L'engagement dans ce retour aux études a été l'occasion de côtoyer des personnes formidables, mais plus important encore, de piquer ma curiosité et me pousser à continuer.

Les études doctorales m'ont fourni l'opportunité d'intégrer en plus des spécialités du génie municipal et de la voirie, la mathématique, l'analyse de données et la recherche opérationnelle. Le domaine de recherche choisi est si vaste qu'il m'a fallu me concentrer

sur un seul des aspects du système de gestion intégrée : j'ai opté pour le module d'optimisation mais je ne désespère pas de m'attaquer aux autres.

Je tiens maintenant à remercier sincèrement mes directeurs de recherche, Messieurs Robert Leconte ing., Ph.D. et Gabriel J. Assaf, ing., Ph.D. pour leur appui continu, leurs remarques, suggestions et critiques m'ont permis d'améliorer le contenu de cette thèse. Ils ont su me motiver et me permettre de mener à terme ce projet.

Je remercie Monsieur Hugues Rivard, ing., Ph.D. pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de même que Messieurs Saad Bennis, ing., Ph.D. et Guy Félio, ing., Ph.D. d'avoir accepté de faire partie du jury.

Je veux également dire merci à une personne qui a joué un rôle important depuis le début de ce périple : il s'agit de Monsieur France Bernard, ing., M.A., M.Sc.A., responsable du génie civil à l'arrondissement Verdun à la ville de Montréal. Il m'a toujours fait confiance en m'impliquant entre autres dans le développement du système de gestion des chaussées et en me fournissant des données et des renseignements essentiels à la réalisation de cette thèse.

Je ne pourrais terminer ces remerciements sans me retourner vers ma famille. Concilier études, travail et famille n'a pas toujours été une sinécure. Je dis merci à ma femme, Lorraine Fradette pour son support et son encouragement depuis le début de cette belle

aventure et à mes deux enfants, Mélanie et Julien, pour leur compréhension lors de mes absences répétées depuis quelques années. Permettez-moi enfin d'avoir une pensée toute spéciale pour mes deux petites-filles, Catherine et Marianne, qui sont pour moi une source d'inspiration.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES GRAPHIQUES	xii
LISTES DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE	4
1.1 Description des infrastructures civiles.....	4
1.2 Contexte de gestion et d'entretien des infrastructures civiles.....	7
1.3 Caractéristiques des projets publics.....	9
1.4 Analyse économique des projets publics	11
1.5 Approche systémique appliquée à la gestion des infrastructures	14
1.6 Besoins d'un SAGE des infrastructures civiles	17
1.7 Objectifs et originalité de la recherche	18
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	22
2.1 Système de gestion des chaussées	23
2.1.1 Caractéristiques du système de gestion des chaussées	23
2.1.2 Données relatives à la chaussée	29
2.1.3 Critères de performance de la chaussée	31
2.1.4 Modèles de prévision du comportement de la chaussée	36
2.1.5 Système de prise de décision	43
2.2 Système de gestion des réseaux d'aqueduc	52
2.2.1 Caractéristiques du système de gestion des réseaux d'aqueduc	52
2.2.2 Données relatives à l'aqueduc	54
2.2.3 Modèle de prévision du comportement de l'aqueduc	55
2.2.4 Choix des interventions	57
2.3 Système de gestion des réseaux d'égouts	63
2.3.1 Caractéristiques du système de gestion des réseaux d'égouts	63
2.3.2 Données relatives à l'égout.....	65

2.3.3	Modèle de prévision du comportement de l'égout	66
2.3.4	Choix des interventions	69
2.4	Système de gestion des autres réseaux d'infrastructures.....	77
2.5	Intégration des systèmes de gestion des infrastructures civiles.....	79
2.6	Modèles d'optimisation appliqués aux infrastructures	96
2.7	Situation actuelle des systèmes de gestion de l'entretien des ouvrages d'infrastructures.....	104
CHAPITRE 3	MODÉLISATION DE LA PRISE DE DÉCISION.....	108
3.1	Énoncé du problème	108
3.2	Terminologie du problème d'optimisation	110
3.3	Fonction objectif	112
3.4	Mise en forme mathématique	115
3.4.1	Identification des variables de décision	115
3.4.2	Forme de la fonction objectif.....	117
3.5	Prévision du comportement de chaque infrastructure.....	120
3.5.1	Comportement d'une section de chaussée	122
3.5.2	Comportement d'une section d'égout.....	125
3.5.3	Comportement d'une section d'aqueduc	126
3.5.4	Influence des conduites souterraines sur la chaussée	127
3.6	Formulation de la fonction objectif.....	128
3.7	Complexité de résolution	130
CHAPITRE 4	STRATÉGIE DE RÉOLUTION	132
4.1	Méthodes de résolution	132
4.2	Programmation linéaire.....	134
4.3	Programmation en nombre entier.....	137
4.4	Programmation en nombre entier binaire	139
4.4.1	Formulation du problème.....	139
4.4.2	Principe d'énumération implicite.....	141
4.4.3	Algorithme de résolution	145
CHAPITRE 5	VALIDATION DU SAGE	151
5.1	Situation géographique et historique de l'arrondissement Verdun... 151	
5.1.1	Position géographique.....	152
5.1.2	Historique de l'arrondissement Verdun	153
5.1.3	Historique des ouvrages d'infrastructures	153
5.2	Systèmes de gestion en vigueur à Verdun	155
5.2.1	Chaussées.....	156
5.2.2	Trottoirs	161
5.2.3	Réseau d'égout.....	161

	Page
5.2.4 Réseau d'aqueduc	163
5.2.5 Ponts.....	164
5.3 Prototype SAGE	165
5.3.1 Calcul d'un tronçon	167
5.3.2 Analyse d'un tronçon.....	181
5.3.3 Analyse du réseau	185
5.4 Analyse des résultats.....	190
5.4.1 Variations de l'horizon de planification	190
5.4.2 Variations des seuils minimums d'intervention.....	198
5.4.3 Variations de l'économie des interventions simultanées.....	202
CONCLUSION	209
RECOMMANDATIONS.....	213
ANNEXES	
1 : Procédure détaillée de résolution.....	215
2 : Recommandations sur chaque tronçon	233
BIBLIOGRAPHIE	279

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Coûts unitaires de reconstruction de l'égout 174
Tableau II	Coûts unitaires de reconstruction de l'aqueduc 175
Tableau III	Performance de calcul du module d'optimisation 176
Tableau IV	Liste des actions envisagées sur chaque infrastructure 179
Tableau V	Compilation des coûts pour période de planification 187
Tableau VI	Compilation des interventions pendant la première période de planification 188
Tableau VII	Tableau synthèse selon une planification triennale 190
Tableau VIII	Comparaison des coûts de première période selon l'horizon de planification 191
Tableau IX	Interventions compilées sur un horizon de 18 ans pendant la première période de planification triennale 196
Tableau X	Interventions compilées sur un horizon de 18 ans..... 199
Tableau XI	Coûts d'intervention générés par une planification triennale avec des seuils minimums de 5, 18 et 20 respectivement pour la chaussée, l'aqueduc et l'égout 201
Tableau XII	Interventions compilées sur un horizon de 18 ans pendant la première période de planification triennale avec des seuils minimums de 5, 18 et 20 respectivement pour la chaussée, l'aqueduc et l'égout..... 203

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Catégories d'infrastructures 5
Figure 2	Comparaison entre des sections types en milieu rural et milieu urbain..... 28
Figure 3	Courbes de comportement générées par AGIR 39
Figure 4	Cadre intégré pour l'évaluation des différentes stratégies d'intervention . 42
Figure 5	Cadre de prise de décision 45
Figure 6	Rôle de l'entretien préventif dans la gestion d'actifs..... 46
Figure 7	Arbre de décision pour la fissuration 47
Figure 8	Système de gestion des chaussées du WisDOT 49
Figure 9	Description schématique de WARP 59
Figure 10	Schéma de principe pour choisir la technique de réhabilitation 62
Figure 11	Schéma affichant les possibilités de transition d'un état à un autre 68
Figure 12	Principales composantes d'un système intégré de gestion des égouts..... 70
Figure 13	Processus de sélection des options de réhabilitation..... 71
Figure 14	Schéma d'évaluation des puits d'accès et des égouts de grande dimension..... 73
Figure 15	Détermination des techniques disponibles..... 77
Figure 16	Principales composantes d'un système de gestion..... 80
Figure 17	Interrelations entre utilisateurs, logiciels et base de données 82
Figure 18	Page-écran du logiciel IIMS 82
Figure 19	Définition globale du SIAD 85
Figure 20	Schéma de fonctionnement d'INFRALOGIK 86
Figure 21	Page-écran de la visionneuse spatiale MIMS 88
Figure 22	Page-écran de l'inventaire des infrastructures 89
Figure 23	Page-écran de l'état des infrastructures 89
Figure 24	Page-écran des interventions sur les infrastructures 90
Figure 25	Formulaire d'identification d'un tronçon..... 120

Figure 26	Énumération explicite d'un problème à 5 variables	142
Figure 27	Énumération implicite d'un problème à 3 variables	144
Figure 28	Localisation de Verdun sur le territoire de l'île de Montréal.....	152
Figure 29	Page-écran de Pave 1991	157
Figure 30	Page-écran du menu principal de Pave 2002	158
Figure 31	Page-écran de saisie des défauts de surface	159
Figure 32	Page-écran montrant les relations entre les tables	159
Figure 33	Page-écran des données des sections de rue	160
Figure 34	Territoire de l'arrondissement Verdun.....	162
Figure 35	Délimitation du secteur étudié	165
Figure 36	Page-titre du prototype SAGE	167
Figure 37	Page-écran d'identification du tronçon.....	168
Figure 38	Page-écran des données sur les sections d'infrastructures.....	169
Figure 39	Page-écran des données sur les paramètres d'intervention.....	172
Figure 40	Page-écran montrant l'analyse sur un tronçon.....	178
Figure 41	Analyse de l'état du tronçon : planification annuelle sur 10 ans	182
Figure 42	Analyse du coût du tronçon : planification annuelle sur 10 ans	182
Figure 43	Analyse des interventions sur le tronçon : planification annuelle sur 10 ans	183
Figure 44	Analyse de l'état du tronçon : planification triennale sur 21 ans.....	184
Figure 45	Analyse du coût du tronçon : planification triennale sur 21 ans.....	184
Figure 46	Analyse des interventions sur le tronçon : planification triennale sur 21 ans	185
Figure 47	Analyse des interventions sur l'ensemble du réseau.....	186
Figure 48	Analyse des interventions sur une partie du réseau	186
Figure 49	Logigramme de l'énumération implicite	221
Figure 50	Représentation graphique de l'exemple de minimisation.....	231

LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 1	Courbe de comportement 31
Graphique 2	Cycle de vie typique d'une chaussée..... 33
Graphique 3	Illustration de la prévision de la détérioration de la chaussée..... 33
Graphique 4	Mesure de la détérioration selon l'âge 34
Graphique 5	Effet d'une intervention d'entretien 36
Graphique 6	Analyse du coût sur le cycle de vie 41
Graphique 7	Stratégies alternatives avec leur niveau de performance 42
Graphique 8	Méthodes utilisées par les municipalités canadiennes 44
Graphique 9	Application périodique des traitements d'entretien 51
Graphique 10	Fonction de survie par matériau pour le premier bris 56
Graphique 11	Fonction de survie par matériau pour les bris subséquents..... 57
Graphique 12	Courbes de détérioration du modèle Harfan 93
Graphique 13	Courbe de détérioration pour l'égout..... 95
Graphique 14	Courbe de détérioration pour l'aqueduc..... 95
Graphique 15	Espace multidimensionnel de la zone de solutions réalisables 132
Graphique 16	Illustration d'un problème de programmation linéaire 135
Graphique 17	Illustration d'un problème de programmation en nombre entier 138
Graphique 18	Calibration du coût unitaire de reconstruction de l'égout..... 174
Graphique 19	Calibration du coût unitaire de reconstruction de l'aqueduc..... 175
Graphique 20	État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 5 périodes 193
Graphique 21	État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 6 périodes 193
Graphique 22	État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 7 périodes 194
Graphique 23	État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 8 périodes 195
Graphique 24	État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 9 périodes 195
Graphique 25	État du tronçon EGLI0T008 : économie sur 3 infrastructures 205

Graphique 26	État du tronçon EGLI0T008 : économie sur 2 infrastructures	205
Graphique 27	État du tronçon EVEL0T005 : économie sur 3 infrastructures	206
Graphique 28	État du tronçon EVEL0T005 : économie sur 2 infrastructures	206
Graphique 29	État du tronçon EGLI0T011 : économie sur 3 infrastructures	207
Graphique 30	État du tronçon EGLI0T011 : économie sur 2 infrastructures	207

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AC	<i>Agency Cost</i>
ADOT	<i>Arizona Department of Transportation</i>
AGIR	Auscultation et Gestion des Infrastructures Routières
AQTR	Association québécoise du transport et des routes
ARTC	Association des routes et transports du Canada
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
B/C	Rapport bénéfice/coût
cdf	Fonction de distribution cumulative
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CIMMS	<i>Civil Infrastructure Maintenance and Management Support</i>
CUM	Communauté urbaine de Montréal
DOD	<i>Department of Defense</i>
ÉTS	École de technologie supérieure
FA	Facteur d'actualisation
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GIS	<i>Geographical Information System</i>
GNIMD	Guide national pour des infrastructures municipales durables
IAS	Indice d'aptitude structurale
ICC	Indice de la condition de la chaussée
ICR	Indice de confort au roulement
IDS	Indice de défaut de surface
IGQ	Indice agrégé ou global de la qualité
IIAM	<i>Integrated Infrastructure Asset Management</i>
IIMS	<i>Integrated Infrastructure Management System</i>
ILLUDAS	<i>Illinois Urban Drainage Area Simulator</i>

IRI	Indice de rugosité internationale
LARIM	Laboratoire de recherche en réseautique et informatique mobile
LCCA	Analyse du coût sur le cycle de vie
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
IRC	Institut de recherche en construction
LP	Programmation linéaire
M&R	<i>Maintenance and Rehabilitation</i>
MDP	<i>Markov Decision Process</i>
MIMS	<i>Municipal Infrastructure Management System</i>
Mn/DOT	<i>Minnesota Department of Transportation</i>
MTQ	Ministère des transports du Québec
NDOT	<i>Nevada Department of Transportation</i>
ODOT	<i>Ohio Department of Transportation</i>
pdf	Fonction de densité de probabilité
PSI	<i>Present Serviceability Index</i>
RAU	Réseau d'assainissement urbain
RIMES	<i>Road Infrastructure Maintenance Evaluation Study</i>
SAGE	Système d'aide à la gestion et à l'entretien
SIAD	Système intégré d'aide à la décision
SIDEX	Système intégré d'exploitation
SIG	Système d'information géographique
SIGEC	Système intégré de gestion coordonnée d'infrastructures urbaines
SIGIC	Système intégré de gestion des infrastructures civiles
SGC	Système de gestion des chaussées
SPVM	Service de police de la ville de Montréal
STCUM	Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal
STM	Société de transport de Montréal
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TIC	Technologies de l'information et des communications

TRAM	Taux de rendement acceptable minimum
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TxDOT	<i>Texas Department of Transportation</i>
UC	<i>User Cost</i>
USACERL	<i>U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory</i>
VP	Valeur présente
WARP	<i>Water Mains Renewal Planner</i>
WisDOT	<i>Wisconsin Department of Transportation</i>
WRc	<i>Water Research centre</i>

INTRODUCTION

Cette thèse vise à élaborer le cadre d'un système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles. Ce document énonce le plan de recherche proposé par Claude Bruxelles pour l'obtention du doctorat en génie Ph.D. offert au département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure. Le projet intitulé «Élaboration d'un cadre de système d'aide à la gestion et à l'entretien des infrastructures civiles» est dirigé conjointement par les professeurs Robert Leconte, ing., Ph.D. et Gabriel J. Assaf, ing., Ph.D.

Les infrastructures civiles considérées dans cette thèse sont les chaussées et les réseaux d'aqueduc et d'égout unitaire. Elles comprennent aussi les services d'utilités publiques tels les réseaux de distribution d'énergie, de gaz et d'électricité, et les réseaux de communication, de téléphonie et de câblodistribution. Pour l'ensemble du Québec, les infrastructures civiles ont une valeur de remplacement considérable. La préservation de cet actif est grandement tributaire des infrastructures souterraines qui sont étroitement liées au réseau routier. Les informations requises par les gestionnaires des infrastructures civiles, au sein des villes et des municipalités sont nombreuses, les besoins financiers énormes et les budgets de plus en plus réduits. Face à ce nouveau défi, il est primordial de poser les bons gestes et d'effectuer des investissements optimaux d'entretien, de réhabilitation et d'aménagement de nouvelles infrastructures selon des considérations quantitatives simples, mais néanmoins techniquement saines, économiquement rentables et socialement soucieuses des besoins des citoyens¹.

L'énoncé du contexte de la gestion des infrastructures civiles présente les besoins d'un système intégré requis pour réaliser des projets publics. Les différentes composantes des infrastructures civiles sont définies afin de situer les caractéristiques propres à chacun de

¹ Dans ce document, le générique masculin est utilisé sans aucune discrimination et uniquement dans le but d'alléger le texte.

leur mode de gestion. Les informations recueillies sont conservées dans la base de données, pour être traitées afin de modéliser le comportement des infrastructures. Puis, le diagnostic est posé, les stratégies d'intervention sont élaborées et la meilleure décision d'intervention est alors retenue.

Le projet d'élaboration d'un cadre de système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) a pour objectifs d'explorer et d'évaluer l'applicabilité des connaissances acquises et publiées sur le sujet de la gestion technico-économique des infrastructures civiles et de dresser brièvement l'architecture d'un système qui intégrera les fonctions techniques et de gestion nécessaires pour l'exploitation efficace de ces infrastructures.

La gestion intégrée des infrastructures civiles regroupe une multitude d'activités visant à assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des usagers. Les principaux modules d'un SAGE sont :

- a. l'acquisition des données;
- b. la modélisation du comportement des infrastructures;
- c. l'optimisation du processus de prise de décision;
- d. la planification et la programmation des interventions;
- e. l'établissement d'un système de suivi.

Cette thèse développe, dans le contexte d'une approche intégrée et rigoureuse de la gestion des infrastructures civiles, l'aspect concernant l'optimisation de la prise de décision. La formulation du problème d'optimisation est posée sous la forme d'une fonction objectif à minimiser et soumise à un certain nombre de contraintes. La fonction objectif visée est une fonction économique qui minimise les coûts d'intervention sur les infrastructures. Des contraintes de faisabilité et d'acceptabilité simulent le comportement des infrastructures en fonction des interventions envisagées.

La stratégie de résolution est décrite en présentant les principales techniques de résolution de problèmes de recherche opérationnelle. L'emphasis est mise sur la programmation en nombre entier binaire puisque les variables de décision ne peuvent prendre qu'une valeur, zéro ou un, pour faire ou ne pas faire une telle intervention.

Un prototype de SAGE est ensuite développé et appliqué à un secteur de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal. Ce prototype, programmé en Visual Basic, lit les données nécessaires à son traitement, directement dans les bases de données Microsoft Access conçues pour les systèmes de gestion de la chaussée, de l'aqueduc et de l'égout. L'objectif ultime est donc de fournir aux gestionnaires un outil pour leur permettre une programmation efficiente des interventions à entreprendre, année après année, durant toute la période de planification. Le prototype fournit également une synthèse des interventions envisagées au cours de la première période de planification pour aider le gestionnaire à planifier le plan triennal d'intervention des infrastructures municipales.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE

Ce chapitre premier décrit les infrastructures civiles et présente le contexte dans lequel elles sont gérées et entretenues. Les caractéristiques et les méthodes d'analyse économique des projets publics sont identifiées par rapport à ceux du secteur privé. Après une description sommaire de l'approche systémique appliquée à la gestion des infrastructures, les besoins et l'intérêt des gestionnaires pour un système d'aide à la gestion et l'entretien de ces infrastructures sont mis en évidence. Enfin, cette partie se termine avec la méthodologie de recherche où la démarche retenue est présentée, structurée chapitre par chapitre.

1.1 Description des infrastructures civiles

Les infrastructures civiles concernées sont, de prime abord, les chaussées, les réseaux d'égouts pluvial et sanitaire, le réseau d'aqueduc et les ouvrages d'art, mais également les services d'utilités publiques tels les réseaux de distribution d'énergie, de gaz et d'électricité, et les réseaux de communication, de téléphonie et de câblodistribution. Hudson et al. (1997) classent en sept catégories les infrastructures civiles. Celles-ci sont illustrées à la figure 1.

Hudson et Hudson (1989) élargissent le concept de gestion des chaussées en englobant plusieurs domaines conduisant ainsi à celui de système intégré de gestion des infrastructures civiles. La définition d'un tel système appelé SIGIC est décrite en détail dans le projet d'application réalisé par Bruxelles (1999) dans le cadre d'un mémoire de maîtrise à l'École de technologie supérieure.

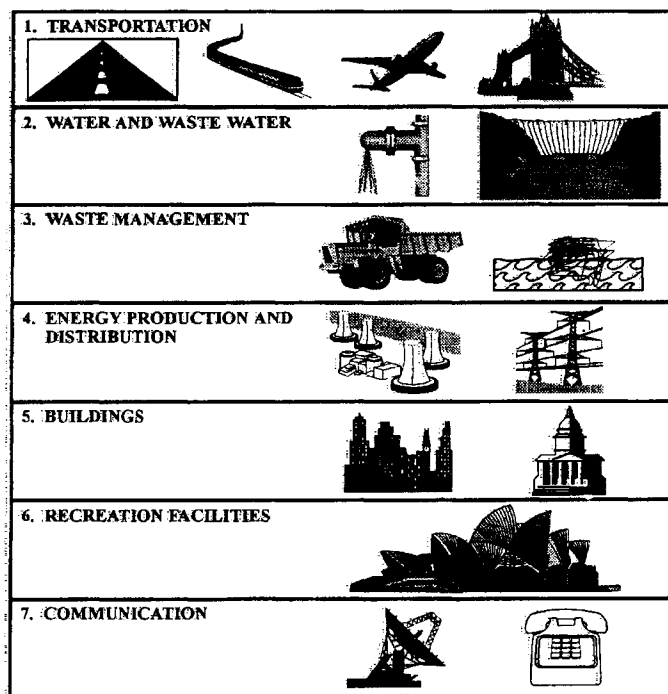


Figure 1 Catégories d'infrastructures
(Tirée de Hudson et al., 1997)

Selon Hudson et Hudson (1989), les infrastructures civiles impliquées sont :

- a. les réseaux de transport :
 - chaussées (rues, trottoirs, bordures, pistes cyclables, etc.);
 - ponts et viaducs;
 - sécurité;
 - congestion, circulation;
 - transport public;
 - transport intermodal;
- b. les infrastructures municipales incluant les six éléments précédents ainsi que :
 - aqueduc;
 - égouts (sanitaire, pluvial, combiné);
 - signalisation routière;
 - service d'urgence;

- électricité;
 - collecte des déchets;
 - sites de disposition des déchets dangereux et des déchets domestiques;
 - recyclage;
 - drainage;
 - stationnement;
- c. les ouvrages majeurs, publics ou privés :
- édifices publics;
 - centres communautaires (bibliothèques, garderies, etc.);
 - aéroports;
 - usines de production électrique;
 - raffineries;
 - parcs et loisirs;
 - autres.

Pour l'ingénieur civil, Bernard (2000) considère qu'un système intégré de gestion regroupe les infrastructures municipales suivantes :

- a. chaussées et trottoirs;
- b. réseaux d'égouts;
- c. réseau d'aqueduc;
- d. ouvrages d'art;
- e. réseaux de services d'utilités publiques (énergie, communication, etc.);
- f. éléments situés physiquement dans l'emprise de la route.

Toujours selon Bernard (2000), les différents domaines couvrent plusieurs aspects communs dont :

- a. l'établissement d'une base de données d'inventaire sur les chaussées et les infrastructures dépendantes en termes de synergie d'intervention;
- b. l'évaluation des données sur l'état actuel des infrastructures;

- c. la représentation des informations géoréférencées;
- d. la génération de stratégies et d'alternatives;
- e. l'élaboration d'outils d'analyse des besoins;
- f. le développement d'un cadre pour l'établissement d'un ordre de priorités décroissantes;
- g. l'élaboration des rapports et graphiques;
- h. la génération d'outils de suivis de performance;
- i. la modélisation du comportement;
- j. la répartition des capitaux entre entretien et réhabilitation.

1.2 Contexte de gestion et d'entretien des infrastructures civiles

Tous s'entendent pour dire que les gouvernements manquent d'argent! Peu importe le palier concerné, les gouvernements veulent redresser leurs revenus. Ils éprouvent parfois des difficultés à assurer les services de base à la population. Les gestionnaires cherchent à «faire plus avec moins». Les citoyens ne peuvent ou ne veulent plus payer de nouvelles taxes mais réclament le même niveau de service en dépit du fait que le coût des opérations s'accroît sans cesse. Il faut tenir compte d'un certain niveau de croissance des villes même si les routes et les infrastructures se détériorent. Dans ce contexte, il devient difficile de maintenir le même niveau de service. Tous les besoins ne pouvant être remplis, les gestionnaires des administrations publiques doivent établir des priorités et évaluer le rapport bénéfice/coût (B/C) de chaque projet : il leur faut agir de façon rentable.

Bernard (2000) décrit la situation où, devant l'ampleur du travail à accomplir et le manque de ressources, les gestionnaires sont démunis et se tournent vers des solutions informatiques pour que l'ordinateur réponde à leurs besoins. La difficulté réside dans le fait que les logiciels de gestion ne sont pas totalement applicables aux besoins spécifiques des services des travaux publics.

Les objectifs des administrations publiques sont la productivité, l'efficacité et la gestion des informations. Pour les atteindre, les gestionnaires doivent utiliser des ordinateurs et des logiciels répondant convenablement à leurs besoins. Bien qu'il existe des ordinateurs dans les administrations publiques, ceux-ci sont souvent équipés de logiciels généraux de traitement de texte, de comptabilité, etc., tandis que les besoins pour les services municipaux sont plutôt pour des logiciels spécialisés en gestion des chaussées, des égouts et des aqueducs, en gestion et suivi de projets, et en système d'information géographique.

Bernard (2000) cite une étude des besoins, réalisée à l'échelle des États-Unis, auprès des gestionnaires, directeurs et surintendants des services des travaux publics des villes et municipalités pour identifier les problèmes majeurs auxquels ils sont soumis. Cette enquête a été menée par Cititech Systems Inc. (1998), une compagnie impliquée dans le développement de logiciels spécialisés en travaux publics intégrés. Elle fait entre autres ressortir des besoins pour des systèmes de comptabilité spécifiques à leurs attentes, des systèmes de contrôle et de suivi des coûts, des systèmes informatiques capables de colliger des données et produire des plans et des rapports plus efficacement.

Dans un contexte d'infrastructures civiles vieillissantes et de recherche par les gouvernements d'un certain équilibre budgétaire, les administrateurs des services publics doivent rationaliser leurs activités. Ils recherchent des stratégies pour optimiser leurs interventions afin de conserver, voire même d'améliorer, l'état des réseaux d'infrastructures. Les gestionnaires municipaux doivent disposer d'un bon système de gestion des informations pour atteindre cet objectif. Le système d'information en place doit assurer un suivi adéquat du comportement des infrastructures pour améliorer la connaissance des réseaux et en faciliter l'entretien. Des outils informatiques sont à leur disposition grâce à l'évolution récente des micro-ordinateurs et au développement de logiciels de plus en plus performants.

Tout système de gestion dépend de l'information recueillie et de la qualité des banques de données. Des techniques d'auscultation et de collecte de données sont développées et sans cesse améliorées pour mieux cerner les phénomènes de dégradation. Bruxelles (1999) rappelle que l'utilisation d'un système d'information géographique facilite la visualisation des données et la représentation des phénomènes à l'étude.

1.3 Caractéristiques des projets publics

Dans le secteur privé, l'objectif premier de tout investissement est de viser à maximiser le rendement et les bénéfices, et à minimiser les coûts. Quant au secteur public, la principale préoccupation se situe au niveau des bénéfices sociaux. Les gouvernements établissent le taux, collectent les impôts, redistribuent les revenus et allouent des ressources à des programmes et des projets pour le bénéfice de la société. Même si les bénéfices sont de nature sociale, en tout ou en partie, il est d'usage que les projets fassent l'objet d'une étude économique. La méthode bénéfice/coût (B/C) est alors la plus populaire.

Plusieurs difficultés émergent lors de l'étude de projets publics, les bénéfices n'étant pas toujours convertibles en montants monétaires. Gharbi (1995) propose alors de procéder à une analyse efficacité/coût où les bénéfices sont exprimés en termes d'efficacité. D'autres facteurs tangibles et intangibles doivent être considérés; il faut évaluer leurs avantages avec la méthode avantage/coût. Cette méthode en est une d'appréciation des décisions qui généralise le critère du profit en considérant aussi bien les effets tangibles et intangibles des décisions.

Gharbi (1995) précise que dans le cas de considérations de différentes natures, une analyse multicritère s'impose. Cette analyse regroupe les techniques permettant d'établir un ordre de priorité dans un ensemble de projets. Les projets publics et privés sont

différents sous plusieurs aspects, ce qui influence la méthodologie de l'évaluation économique.

Gharbi (1995) signale également que d'autres difficultés résident dans le choix du taux d'actualisation et que celui-ci dépend souvent du niveau de risque que l'investisseur est prêt à encourir. Plusieurs approches sont utilisées pour fixer le taux de rendement acceptable minimum (TRAM) selon les coûts d'emprunts du gouvernement et les intérêts payés sur les obligations. Dans le secteur public, les projets ont une durée de vie généralement plus longue que dans le secteur privé. Par exemple, Brière (2000) indique que pour un barrage, elle se situe à environ 50 à 75 ans.

Les gestionnaires des infrastructures routières considèrent les routes de plus en plus comme des actifs qu'il faut gérer. En utilisant les termes «actifs» ou «gestion des biens» et en minimisant la dépréciation, le concept de gestion des chaussées est plus facilement compréhensible par les élus. Pour l'ensemble du Canada, selon le *National Project Team* (1997), la valeur de l'actif routier représente 145 milliards de dollars. Ainsi, des dépenses annuelles d'entretien du réseau routier d'environ quelques milliards de dollars semblent tout à fait acceptables.

La gestion des actifs routiers cherche à prioriser l'entretien et la réhabilitation nécessaires sur une période de temps donnée et à optimiser les budgets disponibles tout en minimisant la dépréciation. En comptabilité du secteur public, il n'est généralement pas permis d'amortir les biens; autant les immobilisations que les opérations sont considérées comme des dépenses effectuées dans l'année. Dans ces conditions, plusieurs administrations routières se questionnent sur la prévision des budgets requis pour maintenir le réseau dans le même état et les conséquences d'une hausse ou d'une baisse des dits budgets. Par exemple, la province de la Saskatchewan a adopté la philosophie et les principes de la gestion de l'actif. Pour déterminer la valeur de l'actif qu'est le réseau d'infrastructures, il faut connaître son coût de remplacement.

1.4 Analyse économique des projets publics

Les principes de base d'une étude économique pour un projet public ne diffèrent pas de ceux d'un projet privé. Bernard (2000) réfère au modèle HDM-IV pour l'évaluation économique des différents traitements d'entretien ou de réhabilitation qui peut se limiter aux coûts et économies suivants :

- a. le coût d'une réhabilitation par rapport à l'option du statu quo;
- b. les économies en entretien courant par rapport à l'option du statu quo;
- c. les économies en termes de coûts d'exploitation des véhicules et en temps de déplacement par rapport à l'option du statu quo;
- d. les économies en termes d'accidents par rapport à l'option du statu quo;
- e. les économies au point de vue environnemental.

L'évaluation économique, au niveau réseau, des options de réhabilitation devrait être envisagée sur un horizon d'au moins dix ans. La méthode de la valeur présente peut être utilisée pour ramener tous les coûts présents et futurs à une année de référence dite présente à l'aide de la formule d'actualisation suivante :

$$\text{Valeur présente (VP)} = \text{Coûts futurs} \times \text{facteur d'actualisation (FA)} \quad (1.1)$$

Dans cette équation 1.1, le facteur d'actualisation (FA) est égal à $(1+i)^{-n}$ avec n le nombre d'années entre l'année de référence et l'année au cours de laquelle le coût sera encouru et i le taux d'actualisation.

Une gestion efficace doit avoir pour objectif que chaque intervention est toujours le meilleur choix, grâce à l'élaboration et à l'application de solutions appropriées en fonction des niveaux de qualité et de performance escomptés.

En pratique, l'évaluation monétaire des bénéfices devient une opération souvent plus difficile. La méthode bénéfice/coût vise l'atteinte de trois types d'objectifs :

- a. la maximisation des bénéfices pour un coût donné;
- b. la maximisation des bénéfices nets lorsque les coûts et les bénéfices varient;
- c. la minimisation des coûts pour atteindre un niveau donné de bénéfices.

Garceau et al. (1996) définissent le bénéfice/coût comme le rapport entre les bénéfices nets (B) d'un projet et ses coûts nets (C). Les bénéfices nets correspondent aux gains de bénéfices actualisés moins les pertes de bénéfices actualisées pour les utilisateurs. Les coûts nets correspondent aux coûts d'investissement et de fonctionnement actualisés moins les revenus actualisés aux promoteurs du projet. Ce rapport s'exprime ainsi :

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Bénéfices annuels}}{\text{Coûts incluant la récupération du capital}} = \frac{B}{C + R.C.} \quad (1.2)$$

L'analyste recommande d'accepter un projet lorsque le rapport bénéfice/coût est supérieur à l'unité. Gharbi (1995) note que lorsque les projets sont indépendants, il faut identifier et quantifier les bénéfices nets et les coûts nets pour déterminer le ratio bénéfice/coût. Cette méthode est compatible avec les autres méthodes classiques d'évaluation. Lorsque les projets sont mutuellement exclusifs où un seul projet doit être retenu, il faut choisir celui qui offre le maximum de profits; ceux-ci sont calculés par la différence entre les bénéfices et les coûts. Ce n'est pas nécessairement celui qui a le ratio bénéfice/coût le plus élevé qui est retenu. Dans ce cas, il faut procéder à une analyse incrémentielle.

L'analyse incrémentielle consiste à éliminer les projets où les rapports bénéfice/coût sont inférieurs à l'unité, les classer, et calculer la différence de bénéfices (ΔB) et la différence de coûts (ΔC) ainsi que le ratio bénéfice/coût correspondant; si celui-ci est supérieur à l'unité, il faut conserver ce projet, sinon le rejeter. En fin de compte, le projet retenu sera celui de la dernière paire de comparaison. L'emploi de l'analyse incrémentielle est obligatoire, et les résultats sont cohérents avec les méthodes d'analyse traditionnelle.

L'analyse efficacité/coût est utilisée lorsqu'il est impossible de quantifier monétairement les bénéfices qui sont alors exprimés selon une mesure d'efficacité. Dans la littérature, plusieurs auteurs reprennent les travaux de Kazanowski (1968) qui a déterminé trois conditions à satisfaire :

- a. l'identification de propositions ou d'objectifs communs et réalisables;
- b. la sélection de différentes possibilités permettant d'atteindre ces objectifs;
- c. la définition de contraintes identifiables pour le projet.

Kazanowski (1968) a aussi établi dix étapes normalisées de l'analyse efficacité/coût :

- a. définir les objectifs;
- b. établir les acquis et identifier les contraintes nécessaires pour rencontrer les objectifs;
- c. développer les choix possibles;
- d. établir une mesure d'efficacité et choisir un taux d'intérêt pertinent pour escompter les valeurs monétaires; plusieurs catégories de mesures d'efficacité peuvent être utilisées;
- e. sélectionner l'une des deux approches : efficacité donnée ou coût donné. La première approche consiste à trouver le choix qui nécessite le coût minimal pour atteindre les objectifs ou le niveau d'efficacité. Dans la deuxième approche, il faut trouver, pour un coût donné, le niveau d'efficacité possible;
- f. déterminer le rendement de chaque choix en fonction de la mesure d'évaluation;
- g. représenter graphiquement ces rendements;
- h. analyser les différents choix en fonction de l'approche retenue. Éliminer les choix où il y a dominance;
- i. effectuer une analyse de sensibilité;
- j. présenter une discussion de toutes les considérations, analyses et décisions prises précédemment.

1.5 Approche systémique appliquée à la gestion des infrastructures

Le dictionnaire Larousse définit l'approche systémique comme une «analyse qui envisage les éléments d'une confrontation complexe, les faits, non pas isolément mais globalement, en tant que parties intégrantes d'un ensemble dont les différents composants sont dans une relation de dépendance réciproque». L'approche systémique insiste donc sur les transformations des données à l'intérieur du phénomène à l'étude. Ces modifications convertissent les intrants en extrants, en informations qui peuvent alimenter d'autres systèmes.

Pour circonscrire un système, il faut le distinguer des autres systèmes et de son environnement. Le choix des limites n'est pas toujours évident; un système ainsi délimité fait partie intégrante d'un ensemble plus englobant, lui-même étant un sous-système d'un ensemble plus vaste. Un réseau de communication permet l'échange d'informations entre les différentes composantes du système, et entre les systèmes entre eux.

La connaissance des phénomènes passe par l'étude des relations et interactions qu'ont ces phénomènes avec leur environnement. Dans ce contexte de multiplication des ensembles, l'approche systémique permet de combler certaines lacunes de la méthode scientifique. Cette méthode scientifique est une procédure qui consiste à observer les phénomènes, poser des hypothèses et vérifier les conséquences de ces hypothèses par une expérimentation scientifique. Bruxelles (1999) mentionne que cette méthode héritée d'Aristote est nommée scientifique, expérimentale ou analytique. Elle est décrite par Descartes qui énonce quatre préceptes observés dans le discours sur la méthode. Ces préceptes permettent de dégager une approche scientifique allant du simple au complexe; cette conception de la science édicte la difficulté voire l'impossibilité de parvenir à comprendre des phénomènes complexes lorsqu'on n'a pas préalablement isolé les divers éléments qui les composent.

Conscients de l'incapacité de la science à résoudre des problèmes complexes, des chercheurs doutent de l'efficacité du précepte réductionniste et remettent en question la fragmentation en plusieurs disciplines isolées. Cela incite ces chercheurs, d'après Le Moigne (1977), à «explorer des méthodologies susceptibles de mieux composer avec la complexité des phénomènes qui nous entourent sans les isoler de l'environnement dans lequel ils naissent et évoluent».

Les systèmes à analyser sont de plus en plus complexes et interdépendants, avec une évolution technologique, économique et sociale de plus en plus rapide. Les données contenues dans chaque système sont traitées pour produire de l'information utile à l'interprétation du phénomène. Les données sont des éléments fondamentaux de représentation décrivant des lieux, des objets, des faits ou des individus qui sont transformés pour devenir une information. La multitude des données à traiter a forcé les organisations à rationaliser leurs pratiques en matière de gestion, et ce dans un contexte d'accroissement de la productivité. Les données sont disparates et conservées par plusieurs partenaires au sein de l'organisation. Ainsi, la mise en place d'un référentiel commun est indispensable pour donner à tous les utilisateurs accès à l'ensemble des données disponibles.

La difficulté d'un tel projet réside en l'intégration et la cohérence d'un vaste ensemble de données hétérogènes, numériques ou non, et dispersées dans les différents départements de l'organisation. Pour trouver ce facteur d'intégration, il faut rechercher le point commun entre les différents éléments situés sur le territoire.

Avec une approche de gestion intégrée des données, les gestionnaires seront en mesure de rationaliser les tâches, et surtout d'obtenir des résultats plus fiables. Le territoire représente le concept central de la géographie : il est stable et perpétuel. Un système d'information reposant sur le territoire fournit une vision globale et précise des projets à l'étude dans un cadre défini, en l'occurrence, spatial et temporel. La finalité recherchée

diffère d'un utilisateur à l'autre. Les gestionnaires recherchent un outil de gestion qui soit un véritable système d'aide à la décision. Les systèmes d'information géographique répondent à plusieurs requêtes allant de la localisation à l'optimisation, en passant par la modélisation.

La caractéristique principale d'un système d'information géographique (SIG) consiste à permettre le rattachement de chaque donnée à une position dans l'espace. Un SIG est un outil de gestion qui offre la possibilité d'intégrer de nombreux fichiers de données et un traitement logique de ces informations afin de produire le résultat attendu. Les innovations technologiques des 30 dernières années et les besoins en outils de gestion performants pour faciliter le processus de prise de décision, ont amené le développement de systèmes intégrés d'information à référence spatiale.

L'accès à des ordinateurs puissants et le développement de techniques analytiques ont permis aux SIG de devenir un outil indispensable en gestion des infrastructures civiles. Bruxelles (1999) précise que ce concept de SIG, comme système d'emménagement de données, a été amélioré au cours des dernières années jusqu'à un système de gestion muni d'outils automatisés pour entrer, stocker, retrouver, manipuler et analyser des données pertinentes à la localisation géographique, pour finalement représenter ces informations sous une forme graphique beaucoup plus compréhensible.

Beaulieu et al. (1990) rapportent que les SIG possèdent une organisation structurée des composantes du système, avec quatre fonctions principales :

- a. l'acquisition des données à partir de formulaires, rapports, carnets d'arpentage, cartes, etc.;
- b. stockage de ces données sur support ou fichier quelconque permettant une actualisation rapide;
- c. traitement pour des applications spécifiques;
- d. diffusion et communication des résultats.

1.6 Besoins d'un SAGE des infrastructures civiles

Le but d'un système d'aide à la gestion technico-économique et à l'entretien des infrastructures civiles est double. Il s'agit d'une part d'établir la relation la plus efficace entre les différentes unités d'organisation pour déterminer les responsabilités pour chaque action et d'autre part de préciser une mécanique claire et multidimensionnelle pour le choix de stratégies de préservation conscientes des interrelations entre les diverses infrastructures, techniquement justifiées, économiquement les plus efficaces, et socialement conscientes des objectifs de fonctionnalité des citoyens.

Pour qu'un système de gestion des infrastructures soit réellement intégré, il faut la collaboration des diverses équipes du service afin d'améliorer les processus de travail et ainsi faire mieux, plus vite et à moindre coût. Cette démarche facilite l'atteinte des objectifs et peut être encadrée par un programme d'assurance de la qualité. Elle accorde au service des travaux publics la possibilité de maintenir le niveau de service auquel la population est en droit de s'attendre.

Les réseaux d'infrastructures ont une valeur de remplacement de plusieurs centaines de milliards de dollars. La préservation éclairée de cet actif demeure cependant largement tributaire de l'ensemble des infrastructures étroitement inter reliées au réseau routier. Celles-ci représentent également un actif considérable et répondent à des besoins indispensables tels la distribution et la collecte des eaux, mais aussi les utilités telles les services de câblodistribution, téléphonie, électricité, gaz, et les ponts et viaducs qui constituent les parties les plus vulnérables du réseau intégré d'infrastructures. Afin de préserver ce patrimoine et d'assurer la sécurité des citoyens, plusieurs administrations municipales sollicitent la recherche active et le développement d'outils de décision qui visent à formuler les bases scientifiques et économiques ainsi que les interactions entre les diverses composantes des infrastructures civiles.

Nul doute que les ingénieurs et les administrateurs des services publics ont besoin d'un outil rationnel, scientifique et organisationnel qui leur permet de remplir leurs tâches d'une manière efficace et garantir le bon fonctionnement et la sécurité des infrastructures de la façon la plus économique. En effet, le nombre élevé de composantes interdépendantes ainsi que l'importance des budgets impliqués nécessitent d'intégrer une approche globale de type réseau, complémentaire à l'approche traditionnelle de type projet où chaque infrastructure est analysée d'une façon isolée.

La gestion intégrée des infrastructures civiles regroupe une multitude d'activités visant à assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des usagers. Un dispositif de gestion efficace est nécessaire pour appuyer la structure organisationnelle et seconder les ingénieurs et administrateurs dans leurs fonctions techniques et administratives.

Un tel outil aide les services de génie et des travaux publics ainsi que les directions générales des municipalités dans le choix d'améliorations optimales. Il fournit des recommandations cohérentes avec les politiques, les objectifs et les contraintes budgétaires.

1.7 Objectifs et originalité de la recherche

Les ingénieurs, gestionnaires et administrateurs des services publics ont maintes fois exprimés leurs besoins pour un outil simple et convivial qui leur permettrait de mieux gérer «leurs infrastructures». Le but ultime du projet d'élaboration d'un cadre de système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles est de développer cet outil. Globalement, le projet SAGE a pour objectifs d'explorer et d'évaluer l'applicabilité des connaissances acquises et publiées sur le sujet de la gestion technico-économique des infrastructures civiles et de dresser l'architecture d'un système qui intégrera les fonctions techniques et de gestion nécessaires pour l'exploitation efficace de ces infrastructures.

Cette approche repose sur une caractérisation de l'état, l'identification de la cause de la détérioration et de la simulation de divers scénarios pour convenir de la meilleure intervention selon des considérations techniques et économiques. L'effet du report des interventions sur les coûts futurs, la réduction consécutive de la durée de vie ainsi que l'impact sur la sécurité constituent, de toute évidence, des facteurs économiques importants pour la société. Les procédures doivent également reposer, dans une certaine mesure, sur des modèles analytiques permettant d'identifier les besoins et d'établir les priorités. Le fondement de cette démarche intégrée repose sur l'analyse de toutes les activités techniques, économiques, organisationnelles et administratives liées à la conception, la surveillance, les analyses de suivi, l'exploitation, l'entretien, la remise en état et le remplacement des composantes lorsque techniquement et économiquement nécessaire.

Une gestion technico-économique valable des infrastructures de chaussée, d'égouts pluvial et sanitaire, d'aqueduc, de pont et de viaduc doit composer avec les aléas de circulation et d'urbanisme et forcément se synchroniser avec les utilités. Dans le cadre d'une gestion intégrée des infrastructures, cette pratique doit couvrir toutes les activités de la conception à la reconstruction complète en passant par l'évaluation, l'entretien et la réhabilitation de celles-ci.

Un système d'aide à la gestion technico-économique et à l'entretien des infrastructures civiles établit la relation la plus efficace entre les différents services responsables des infrastructures civiles et précise une mécanique claire et multidimensionnelle pour le choix de stratégies de préservation. Un tel système comprend plusieurs activités dont les principaux modules vont de l'acquisition des données à l'établissement d'un système de suivi en passant par les phases de modélisation du comportement des infrastructures, d'optimisation du processus de prise de décision et de planification et programmation des interventions.

Devant l'étendue du problème, cette thèse se concentre sur le développement, dans le contexte d'une approche intégrée et rigoureuse de la gestion des infrastructures civiles, de l'aspect concernant l'optimisation de la prise de décision. Plus spécifiquement, la méthodologie retenue pour cette recherche consiste en une revue de la littérature, la formulation de la fonction à optimiser et sa résolution, ainsi que le développement d'un prototype.

La revue de littérature doit permettre de dresser le bilan des connaissances acquises en matière de gestion de chacune des infrastructures concernées, en occurrence la chaussée, l'aqueduc et l'égout. L'accent est mis sur les publications scientifiques traitant de gestion intégrée et de prise de décision. Cette démarche met en évidence la différence entre les façons de faire actuelles et l'approche proposée où les données des différentes infrastructures sont réellement intégrées dès l'étape d'optimisation.

La formulation de la fonction objectif doit tenir compte des données disponibles concernant les trois infrastructures et intégrer un modèle de prévision de leur comportement. Bien que la modélisation de la prédiction de l'état des infrastructures soit un élément très important du système SAGE, cette étape n'est pas visée dans le projet de recherche. Elle est toutefois prise en considération et une façon de faire est retenue et programmée dans le modèle d'optimisation. L'étape de la formulation de la prise de décision est l'élément clé de cette thèse qui doit prouver la faisabilité d'intégrer les trois infrastructures dans le même système de décision. Le chapitre qui lui est consacré présente aussi les avantages de la formulation retenue, sans oublier les aspects pragmatiques liés à sa résolution.

La partie de la recherche sur le choix de la meilleure stratégie de résolution consiste à distinguer, parmi les méthodes de recherche opérationnelle, celle qui procurera, de façon performante, un résultat valide et fiable. Cette méthode peut être considérée originale dans la mesure où elle n'a jamais été appliquée à des données d'infrastructures civiles.

Enfin, il est prévu de développer un prototype de SAGE pour appuyer les dires. Ce prototype sera appliqué à un secteur de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal. La description du fonctionnement du logiciel comprend, entre autres, des pages-écrans décrivant les diverses étapes du système d'aide à la décision. Les résultats seront analysés en procédant à une analyse de sensibilité où les paramètres d'entrée et les choix initiaux des gestionnaires seront nuancés.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de la littérature est un inventaire des documents et articles scientifiques et techniques publiés dans le domaine de la gestion intégrée des infrastructures civiles. Ce chapitre dresse le portrait des façons de faire en matière de gestion de chacune des infrastructures concernées par cette thèse. Ainsi, une section pour les chaussées, une pour les aqueducs et une autre pour les égouts rapportent les pratiques les plus couramment utilisées dans le domaine. Puis, les publications montrant l'état de l'art de l'intégration des différentes infrastructures municipales sont répertoriées. Enfin, des exemples d'optimisation appliqués aux infrastructures terminent ce chapitre.

Les articles cités dans cette revue de la littérature sont regroupés selon le thème abordé, l'importance et l'approfondissement du sujet traité, des généralités aux spécificités, et selon un ordre chronologique. Les ouvrages de base sur lesquels s'appuie cette thèse sont les publications, en gestion des chaussées, «*Modern Pavement Management*» de Haas et al. (1994) et «*Pavement Design and Management Guide*», du *National Project Team* (1997) de l'Association du transport du Canada; dans le domaine de la gestion des réseaux d'égouts et d'aqueduc, il s'agit de «*Urban Water Infrastructure, Planning Management and Operations*» de Grigg (1992). En gestion des infrastructures, «*Infrastructure Management*» de Hudson, Haas et Uddin (1997) est une référence majeure. Les publications du *Transportation Research Board (TRB)* et de l'*American Society of Civil Engineers (ASCE)* notamment les journaux intitulés «*Journal of Infrastructure Systems*», «*Journal of Transportation Engineering*», «*Journal of Water Resources Planning and Management*», «*Journal of Computing in Civil Engineering*» et, plus récemment, les documents du Guide national pour des infrastructures municipales durables (GNIMD) sont des références incontournables.

2.1 Système de gestion des chaussées

Cette partie du chapitre présente quelques publications qui traitent des systèmes de gestion des chaussées (SGC) en vigueur. Dans un premier temps, le SGC est défini et ses principales composantes sont décrites. Par la suite, les données qui le composent sont énoncées et quelques références portant sur la modélisation du comportement des chaussées pendant leur cycle de vie sont citées. Enfin, des exemples de prise de décision illustrant le choix des meilleures stratégies d'intervention complètent cette partie.

2.1.1 Caractéristiques du système de gestion des chaussées

Le ministère des transports du Québec MTQ (1996) définit le terme «chaussée» dans le lexique des normes d'ouvrages routiers par «surface de roulement des véhicules, excluant les accotements». Les éléments de la route englobent, en milieu rural, la chaussée et les accotements pour former la plate-forme, les talus, les fossés et la berge. En milieu urbain, il faut de plus inclure les trottoirs, les bordures et tous les éléments physiques se retrouvant à l'intérieur de l'emprise. La structure de la chaussée quant à elle englobe les différentes couches de matériaux situées au-dessus de la ligne d'infrastructure, notamment le revêtement, la ou les fondations et la sous-fondation.

L'AQTR (1977) adopte la définition d'un système de gestion de la chaussée proposée par le comité de gestion routière de l'Association des routes et transports du Canada (ARTC) :

«L'objectif principal d'un système de gestion routière est d'atteindre la meilleure valeur possible des fonds disponibles en vue de fournir un transport sécuritaire, confortable et économique. On atteint cet objectif en comparant des investissements différents tant au niveau du projet qu'au niveau du réseau, en coordonnant les diverses activités, et en mettant à profit les pratiques existantes.

Un système de gestion routière comprend donc un éventail complet des activités dans la planification des investissements, le design, la

construction, l'entretien et l'évaluation périodique du comportement. Les niveaux de gestion impliqués comprennent tant ceux qui sont responsables des décisions ayant trait à la politique et aux orientations pour un ensemble de projets, que les responsables de la mise en pratique et des décisions particulières d'un projet spécifique. Le rôle de la gestion à tous les niveaux est de comparer les options, de coordonner les activités, de prendre les décisions qui s'imposent et de voir à leur mise en application d'une manière efficace et économique.

Chaque palier de décision est important. Un système de gestion routière doit absolument reconnaître ces paliers, permettre que les personnes impliquées les identifient, et s'assurer qu'ils correspondent à la structure administrative de l'organisme en cause.

Le public doit être le premier bénéficiaire d'un système de gestion routière, puisque c'est son argent qui est impliqué dans la construction des routes. L'organisme qui l'utilise en retire aussi des avantages certains, puisqu'il augmente ses chances de prendre toujours de bonnes décisions, voit une meilleure coordination de ses activités et une amélioration dans le perfectionnement de son personnel.»

Cette définition est reprise par R. Haas pour le *National Project Team* (1997), lors de la mise à jour du guide de gestion des chaussées en 1997. Un système de gestion des chaussées doit permettre aux administrations routières de développer et d'entretenir le réseau routier pour répondre aux attentes des usagers. Un tel système comprend les éléments suivants qui sont considérés comme des sous-systèmes :

- a. conception des épaisseurs et conception géométrique;
- b. préparation des plans et devis;
- c. construction;
- d. contrôle de la qualité;
- e. suivi et prévision du comportement;
- f. essais de caractérisation;
- g. choix des interventions possibles;
- h. analyse économique;
- i. élaboration des priorités;
- j. entretien et réhabilitation.

Parmi les systèmes de gestion des chaussées les plus répandus au Québec, se retrouvent AGIR et PAVER. Le système de gestion des chaussées AGIR, pour «Auscultation et Gestion des Infrastructures Routières», est commercialisé par GIE Technologies (2004) dont le siège social est situé à Montréal. Le manuel de l'utilisateur du système AGIR définit les principaux objectifs du système comme étant de :

- a. dresser un bilan exhaustif de l'état des chaussées du réseau;
- b. identifier les causes des détériorations et prévoir l'évolution des dégradations des chaussées;
- c. proposer les interventions de réhabilitation les plus appropriées en fonction des budgets disponibles;
- d. renseigner sur les avantages socio-économiques de diverses options.

Quant au système de gestion des chaussées PAVER, il a été développé à la fin des années 1960 par le département de la défense (DOD) de l'armée américaine. C'est plus précisément en 1968 que la *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory* (USACERL) débute la conception de PAVER. Ce système a été conçu initialement pour assister les organisations militaires et civiles à optimiser l'utilisation des fonds disponibles pour la réfection des chaussées. Ce système se veut un outil qui permet la prise de décision en vue de déterminer les besoins et les priorités d'intervention pour l'entretien et la réhabilitation des chaussées des routes, des aéroports et des aires de stationnement. Une version destinée à l'utilisation sur micro-ordinateur, le «*Micro Paver*» a été développée au milieu des années 1990. La version 5.2 fonctionnant sous le système d'exploitation Windows conserve la majorité des fonctions de PAVER.

Boucher (1998) présente les principaux objectifs du système PAVER :

- a. la définition du réseau routier qui identifie les éléments de l'inventaire du réseau routier de l'administration routière;
- b. l'évaluation de l'état des chaussées selon une méthodologie spécifique, qui est d'ailleurs normalisée (ASTM D-5340);

- c. la modélisation de la prévision du comportement des chaussées par un regroupement des sections du réseau en familles;
- d. la détermination de l'état agrégé actuel et futur des chaussées;
- e. la détermination des besoins en entretien et en réhabilitation, l'évaluation des budgets requis ainsi que la planification du programme d'intervention.

Irrgang et Maze (1993) rappellent les origines des systèmes de gestion des chaussées tels que pratiqués par plusieurs administrations routières américaines. Une enquête a été conduite auprès de chaque administration routière pour connaître les objectifs de leur système de gestion des chaussées. Lorsqu'elles emploient un système de classification par rang pour prioriser les projets, quels sont les mécanismes et les variables du système de classification ? Quelles sont les contraintes et la fonction objectif lorsqu'elles emploient une méthodologie d'optimisation pour le choix des projets ? En 1991, environ le tiers des administrations routières avaient développé un système de gestion des chaussées qui inclut l'optimisation au niveau réseau. Un système de gestion des chaussées est structuré en trois composantes majeures :

- a. une base de données contenant l'information concernant l'inventaire de chaussée;
- b. un logiciel d'analyse de données qui traite l'information de la base de données pour allouer des ressources d'entretien et réhabilitation;
- c. un processus de rétroaction qui permet de vérifier et améliorer la fiabilité du système de gestion.

Al-Swailmi (1994) souligne que depuis les années 1960, les ingénieurs de chaussées ont travaillé sur le développement de systèmes de gestion des chaussées. Ces systèmes comprennent plusieurs activités principales telles que la planification, la budgétisation, la construction, l'entretien et la réhabilitation. Plusieurs techniques ont été proposées et évaluées mais aucune ne s'est avérée meilleure que les autres.

Les administrations routières n'utilisent pas toutes les mêmes systèmes de gestion des chaussées. Il y a une différence marquée entre les réseaux routiers urbains et ruraux : dans les villes, plusieurs gestionnaires partagent la gestion de leur réseau situé dans la même emprise de route. Les différentes administrations concernées par un système de gestion de l'entretien sont aussi responsables des réseaux de gaz, d'eau potable, de téléphonie, d'électricité, d'égouts sanitaires et pluviaux, ainsi que des services de circulation. Un cadre pour la gestion de l'entretien comprend deux éléments majeurs soit l'intégration des systèmes de gestion de l'entretien d'une ville avec les autres administrations concernées et la communication parmi les intervenants impliqués.

Des différences significatives existent entre les routes urbaines et celles rurales. En milieu urbain, de nombreuses lignes de service suivent les routes et les traversent. Les seuls moyens d'accès possibles à ces lignes de service consistent à creuser à partir du dessus de la chaussée. Dans ces conditions, le développement d'un système de gestion de l'entretien en milieu urbain est plus complexe que celui en milieu rural. La figure 2 tirée de Al-Swailmi (1994) compare une section typique de chaussée en milieu rural à celle équivalente en milieu urbain. Chaque service d'utilités publiques a une méthode unique de construction en termes de remblai, de protection de service, d'espace par rapport aux utilités adjacentes et de profondeur sous la surface de la chaussée. Par exemple un câble téléphonique devrait être éloigné d'une certaine distance d'un câble à haute tension d'énergie électrique. Une coupe pour accéder au service est considérée un défaut important de la performance de la chaussée. Un secteur rapiécé ou celui situé à côté d'une coupe ne répond pas aussi bien que la section originale de chaussée. La majorité des entrepreneurs des utilités publiques sont spécialisés dans l'infrastructure concernée mais possèdent relativement peu d'expérience en construction routière, ce qui a pour conséquence que des sections rapiécées de chaussée se retrouvent avec un état structural et une serviabilité faibles. Puisque les coupes de service augmentent en raison de l'entretien croissant des services, Al-Swailmi (1994) insiste sur l'importance de

développer une méthodologie pour augmenter la performance du système de gestion de l'entretien pour les routes municipales.

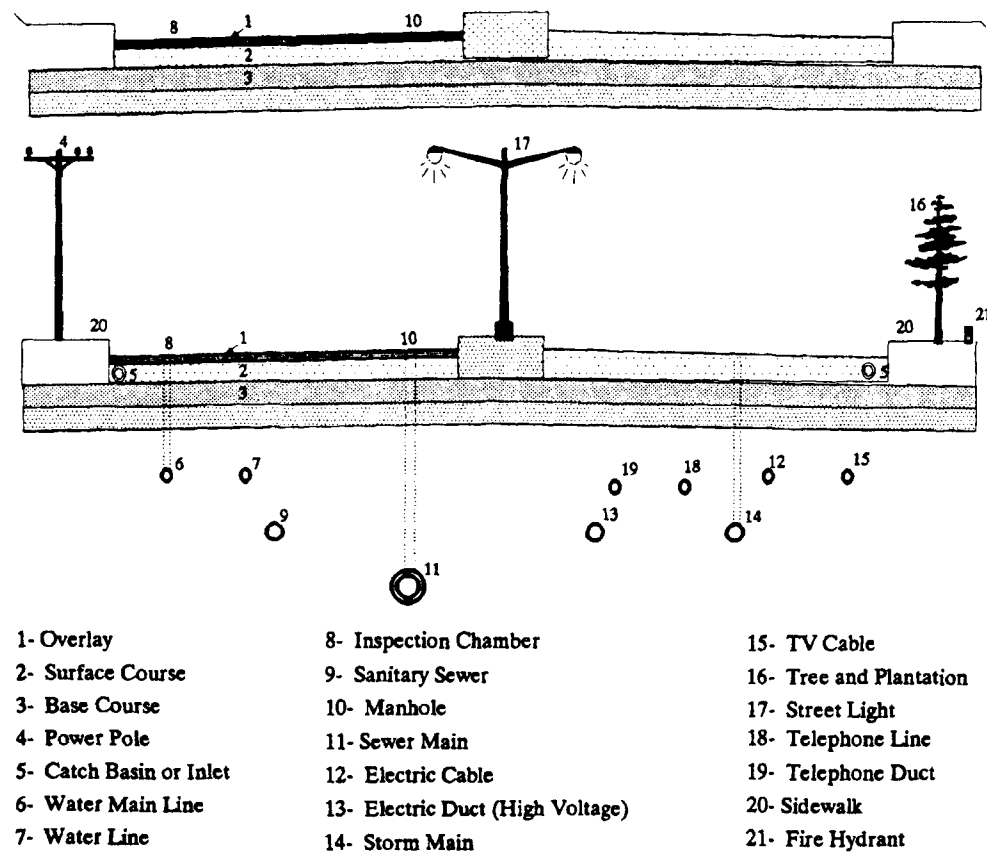


Figure 2 Comparaison entre des sections types en milieu rural et milieu urbain
(Tirée de Al-Swailmi, 1994)

Sebaaly et al. (1996) décrivent le système de gestion des chaussées du *Nevada Department of Transportation (NDOT)*. Ce système comprend l'analyse au niveau réseau et une évaluation de la chaussée au niveau projet. Les données provenant de ces deux modules sont rassemblées annuellement pour déterminer l'état de chaque section de chaussée. D'autres développements sont à venir pour incorporer la modélisation de la performance, l'analyse du coût sur le cycle de vie et le processus d'optimisation au niveau réseau. Lorsque le système sera entièrement développé, il permettra à l'ingénieur

de choisir la meilleure option de réhabilitation et d'entretien pour l'ensemble de la période d'analyse.

Haas et Hudson (1996) parlent de l'entière satisfaction des clients comme un but à atteindre pour n'importe quel fournisseur de services ou de produits, y compris les ingénieurs en chaussées. Dans ce cas, les clients des chaussées doivent être bien identifiés, tout comme les mesures servant à juger leur satisfaction. Des mesures de satisfaction du client sont établies, comprenant le confort au roulement, les déformations de surface, l'adéquation structurale, le frottement, le drainage de surface, le bruit, les retards et l'efficacité du cycle de vie de la chaussée. Les résultats d'une étude préliminaire pour déterminer la valeur des mesures de satisfaction sont fournis sur une échelle de 0 à 100, la qualité du confort au roulement contribuant pour environ 25 pour-cent de la satisfaction globale, les déformations de surface produisant presque 20 pour-cent, et les autres mesures entre 5 et 10 pour-cent chacune.

2.1.2 Données relatives à la chaussée

Les municipalités disposent d'un certain nombre de données sur la chaussée. Haas et al. (1994) classifient en sept catégories les données requises pour un système de gestion des chaussées : description de la section, comportement, historique, politique, géométrie, environnement et coût.

Les données relatives à la section identifient le tronçon et ses limites et sont souvent géoréférencées pour une utilisation appropriée avec un système d'information géographique. Les données relatives au comportement servent à caractériser l'état actuel de la chaussée par des mesures d'uni, des relevés des défauts de surface, des évaluations de la portance et de glissance. Les données relatives à l'historique incluent les interventions d'entretien ainsi que les informations concernant le trafic, leurs charges et les accidents. Les politiques d'entretien et de réhabilitation comprennent les niveaux de

qualité acceptables, les budgets et les techniques d'intervention à privilégier. Les données relatives à la géométrie incluent les dimensions de la section, les courbes, les dévers, les pentes, les trottoirs et les accotements. Les conditions environnementales et climatiques ainsi que les caractéristiques du drainage jouent de façon significative sur la performance de la chaussée. Enfin, les données relatives aux coûts comprennent les coûts de construction, d'entretien et de réhabilitation ainsi que les coûts aux usagers.

L'élaboration d'un système intégré de gestion des infrastructures civiles repose sur un minimum de données qui serviront à évaluer et prévoir l'état de chaque infrastructure. Le gestionnaire aura le loisir d'ajouter ou de supprimer des variables ainsi que de modifier le modèle prévisionnel. Bernard et al. (2000) énumèrent les données concernant les chaussées, celles-ci étant regroupées en cinq classes :

a. les données d'inventaire :

- segment de rue;
- localisation du début de la section;
- localisation de la fin de la section;
- type de structure;
- classe;
- longueur;
- largeur;
- matériau et épaisseur de la couche de roulement;
- matériau et épaisseur de la fondation;
- matériau et épaisseur de la sous-fondation;
- nature ou portance du sol d'infrastructure;
- bordure, trottoir, accotement;

b. les données sur l'état :

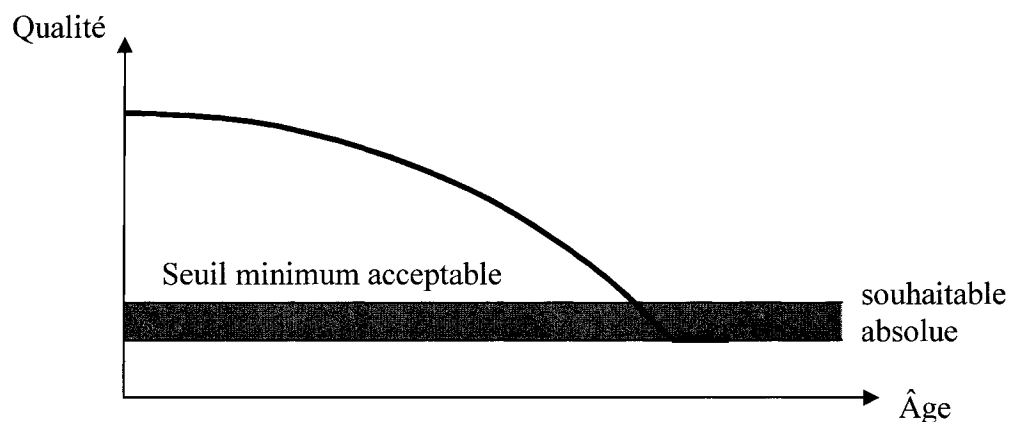
- relevé des défauts;
- confort au roulement;
- évaluation du trottoir;

- c. les données sur les sollicitations :
 - comptage;
 - pourcentage de camions;
- d. les données sur l'entretien;
- e. les données sur les plaintes.

2.1.3 Critères de performance de la chaussée

La nécessité d'intervenir sur la chaussée est dictée par l'état des différentes infrastructures. Bien que l'analyse soit essentiellement systémique, il importe, dans un premier temps, d'analyser le comportement de la chaussée seulement.

La prévision du comportement des infrastructures consiste à le modéliser et à l'interpréter. Pour une gestion globale intégrée, il faut déterminer le meilleur moment pour intervenir. En gestion des chaussées, des courbes de dégradation sont produites pour refléter la qualité de la chaussée selon l'âge. Ces courbes, de la forme de celle dessinée au graphique 1, permettent de prédire le comportement des chaussées, dans le temps et sous différentes circonstances.



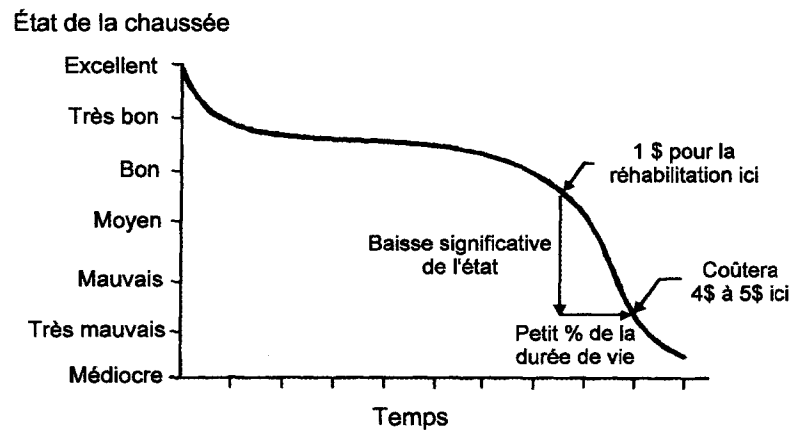
Graphique 1 Courbe de comportement

Des outils de modélisation faciliteront la démarche de définition du type de traitement, du choix du moment propice d'intervention et d'identification des impacts sur les budgets et la qualité globale du réseau. L'état des connaissances en gestion des conduites d'égouts et d'aqueduc ne permet pas encore de modéliser leur comportement de façon similaire à celui des chaussées.

Les courbes de dégradation des chaussées sont établies, par famille, à partir de modèles prévisionnels de la détérioration des chaussées. Ces modèles prévisionnels de la détérioration des chaussées sont nécessaires dans la conception et la gestion des chaussées. Ils sont conçus principalement au niveau projet pour la gestion des chaussées et plus précisément comme support à la conception.

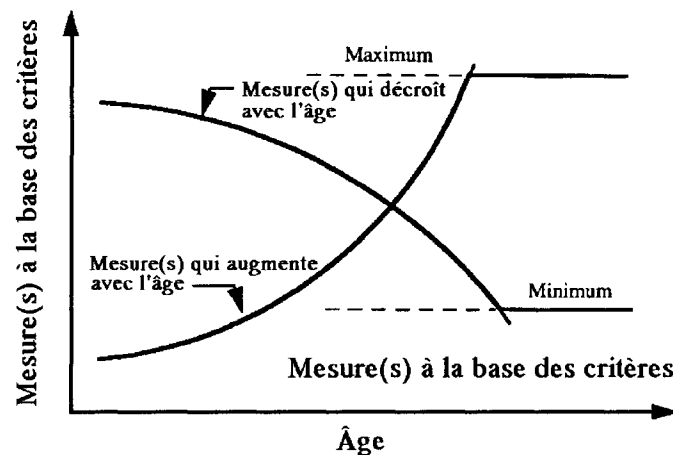
L'utilisation de ces modèles au niveau réseau a pour objectifs, dans un premier temps, d'estimer les taux futurs de détérioration des sections, et dans un second temps, d'estimer le moment où les sections atteindront leur seuil minimal. Ceci permet de prévoir le moment où le besoin en entretien ou en réhabilitation sera nécessaire sur les différentes sections. De plus, l'estimation de la vie résiduelle des sections est déduite selon le concept de prévision de la détérioration dépendant des options de réhabilitation appliquées au moment où le besoin survient.

Un système de gestion des chaussées constitue donc une méthode systématique et cohérente pour identifier les besoins et les priorités d'intervention au moment opportun. Le graphique 2 proposé par Shahin et Walter (1990) montre l'importance de détecter et de procéder à la réparation des dégradations au bon moment. Cet objectif est atteint en comparant des investissements différents tant au niveau projet qu'au niveau réseau, en coordonnant les diverses activités et en mettant à profit, les connaissances et les pratiques existantes.



Graphique 2 Cycle de vie typique d'une chaussée
(Adapté de Shahin et Walter, 1990)

Le *National Project Team* (1997) rappelle qu'un critère de performance est une valeur limite spécifiée pour une mesure du comportement. Si la mesure dépasse la limite, un défaut ou un besoin existe. Avec des mesures décroissant avec l'âge, comme montrées au graphique 3 et dans le cas où le seuil minimum acceptable du niveau de qualité est fixé à 2, les sections qui ont une valeur inférieure à ce seuil présentent une déficience ou un besoin pressant. Aussi, les indices peuvent être mesurés selon des valeurs décroissant avec l'âge; la cote visuelle utilisée par la ville de Montréal en est un exemple.

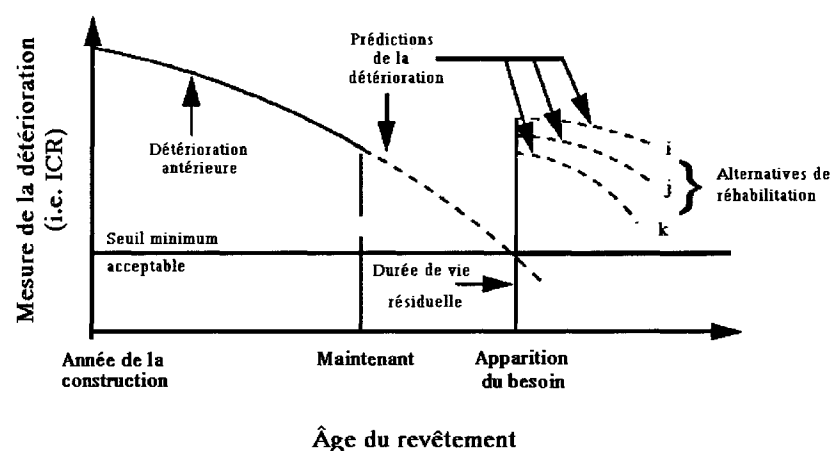


Graphique 3 Illustration de la prévision de la détérioration de la chaussée
(Traduit du *National Project Team*, 1997)

Il existe plusieurs critères d'appréciation pour lesquels des modèles prévisionnels peuvent être développés à l'échelle du réseau routier, entre autres :

- a. l'indice de confort au roulement (ICR);
- b. l'indice de défaut de surface (IDS);
- c. l'indice d'aptitude structurale (IAS);
- d. l'indice de la condition de la chaussée (ICC);
- e. l'uni, par exemple, l'indice de rugosité internationale (IRI);
- f. l'indice agrégé ou global de la qualité (IGQ);
- g. la résistance à la glissance;
- h. la durée de vie résiduelle.

Le graphique 4 tiré du *National Project Team* (1997) illustre la mesure de la détérioration selon l'âge de la chaussée. La courbe de comportement affiche les prédictions de détériorations futures et la durée de vie résiduelle.



Graphique 4 Mesure de la détérioration selon l'âge
(Traduit du *National Project Team*, 1997)

Le *National Project Team* (1997) rappelle la définition de serviabilité d'une chaussée proposée par Carey et Irick en 1960 «par son aptitude à satisfaire les usagers de la route par un niveau raisonnable de confort». Le confort est directement lié à l'uni de la surface de la chaussée. Ainsi, la serviabilité est fonction des facteurs suivants :

$$S_t = f(C, T_L, E_L, S, E, M, T) \quad (2.1)$$

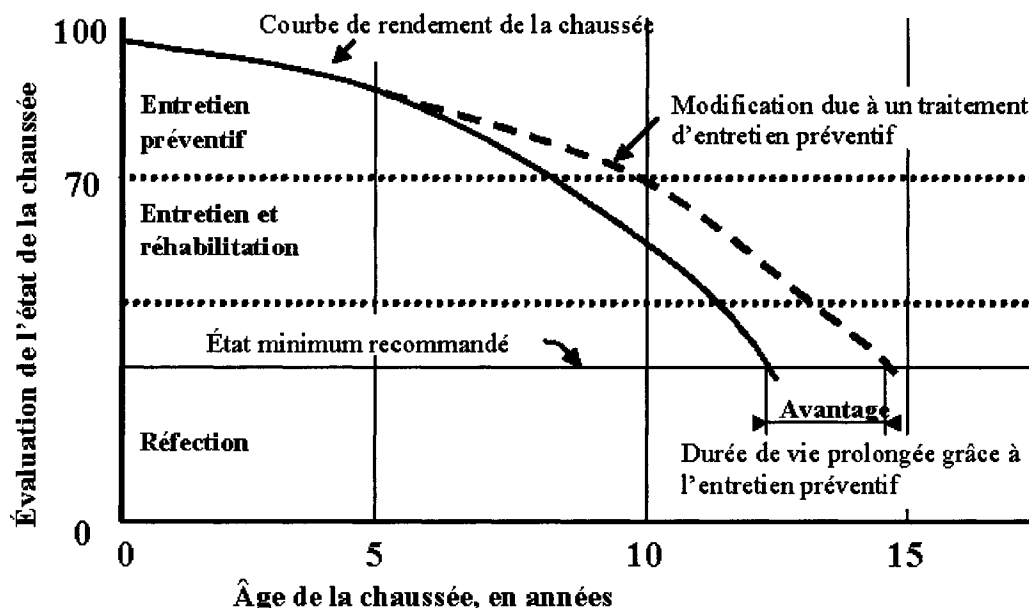
- où :
- S_t serviabilité de la chaussée à tout instant t
 - C facteur de qualité de la construction
 - T_L types et épaisseurs des différentes couches de la chaussée
 - E_L rigidités des couches de la chaussée
 - S nature du sol et conditions d'humidité
 - E effets de l'environnement
 - M types et efficience des activités d'entretien
 - T composition du trafic et distribution des charges

Le *National Project Team* (1997) nomme performance «le changement avec le temps du niveau de serviabilité de la chaussée, selon l'âge de la chaussée ou le trafic cumulé». La quantification de la serviabilité d'une chaussée est réalisée au moyen d'une mesure subjective telle que l'indice de confort au roulement proposé par Tessier (1990) ou l'indice de serviabilité actuel, le *Present Serviceability Index (PSI)* établi par l'*American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* en 1993.

Le Guide national pour des infrastructures durables (2002a) précise les raisons fondamentales pour déterminer des critères de performance au niveau réseau qui sont :

- a. fournir une base objective pour l'identification des besoins courants et l'estimation des besoins futurs;
- b. fournir une approche consistante entre les sections et entre les classes de rues;
- c. trouver les moyens de décrire les travaux à faire à court, moyen, long terme.

Le Guide national pour des infrastructures durables (2002a) reproduit au graphique 5 l'incidence d'un traitement d'entretien préventif en utilisant les courbes de comportement.



Graphique 5 Effet d'une intervention d'entretien
(Tiré du Guide national pour des infrastructures durables, 2002a)

2.1.4 Modèles de prévision du comportement de la chaussée

Les modèles prévisionnels de comportement de la chaussée autant au niveau projet qu'au niveau réseau sont habituellement classifiés selon qu'ils sont déterministes ou probabilistes. Pour des fins opérationnelles ou de développement, cette classification est détaillée selon quatre classes :

- purement analytique;
- analytique-empirique;
- empirique utilisant la régression ou variables de détérioration;
- subjective ou probabiliste.

Li, Xie et Haas (1996b) allèguent que la prévision de la détérioration de la chaussée est le facteur le plus important dans la détermination du moment le plus opportun pour programmer l'entretien du réseau routier. La modélisation basée sur les chaînes de Markov pour déterminer la détérioration de la chaussée utilise des matrices de probabilité de transition. Chaque élément de la matrice de transition est déterminé sur la base d'une analyse de fiabilité et d'une simulation selon la technique de Monte Carlo. Ceci évite l'utilisation de méthodes conventionnelles qui impliquent de prendre une opinion subjective moyenne des ingénieurs en chaussée ou d'observer un grand nombre de données sur plusieurs années pour évaluer la performance de la chaussée. Il en résulte une série de matrices de transition pour chaque section de chaussée. De plus, l'état de la chaussée est calculé pour chaque année.

En appliquant aussi le modèle de prévision de la circulation, en termes de charges axiales simples équivalentes, avec le trafic maximum que la chaussée peut supporter pour chaque état de la chaussée, les variables sont aléatoires. Ce modèle a été appliqué pour une section de chaussée située dans le sud-est de l'Ontario. Il prouve que la sensibilité des matrices de transition, le taux d'accroissement du trafic, la déflexion du sol porteur et l'épaisseur de chaussée sont significatifs.

De Melo e Silva et al. (2000) décrivent une étude qui propose un modèle de performance des chaussées pour l'État du Michigan. Ceux-ci utilisent généralement le système de gestion des chaussées appelé «*RoadSoft*». Un élément principal de n'importe quel système de gestion des chaussées est sa capacité de prévoir le comportement futur des chaussées. Cette étude comporte divers modèles déterministes et probabilistes qui ont été évalués en utilisant des données de deux comtés du Michigan. Le modèle de croissance logistique et celui de Markov ont fourni la meilleure combinaison de résultats. Une comparaison entre ces modèles a permis de constater que leurs capacités de prédiction pour des tronçons de chaussée avec différents taux de détérioration étaient

acceptables, le modèle de Markov offrant l'avantage supplémentaire de représenter la performance future selon une distribution de probabilité.

Tack et Chou (2001) analysent deux mesures de performance qui ont été employées dans 12 districts du *Ohio Department of Transportation* (ODOT) sur l'estimation de la détérioration de l'état des chaussées. Les mesures de performance sont établies à partir de cinq années de données réelles d'inspection des chaussées. L'étude était limitée aux routes divisées avec quatre voies ou plus. Pour développer les modèles de détérioration, les données existantes ont été transformées en modèle stochastique de détérioration en utilisant un système d'information géographique et un logiciel de gestion de base de données. Le modèle de détérioration est basé sur les chaînes de Markov pour développer les matrices de transition tandis qu'une simulation de Monte Carlo établit les prévisions de la détérioration. Un test d'hypothèses sur la moyenne est appliqué pour déterminer quelles étaient les zones les plus performantes que la moyenne de l'ensemble.

L'utilisation de chaînes de Markov pour modéliser la détérioration de la chaussée a pris en considération le trafic actuel et les conditions environnementales. Cela permet de conserver la nature aléatoire du comportement de la chaussée et différents taux de détérioration sont inclus dans le modèle. Les vecteurs de probabilité de l'état futur d'une section de chaussée peuvent être interprétés en tant que probabilité que la chaussée ou le pourcentage de section dans chaque catégorie, en termes de longueur, sera dans un certain état. Cette nouvelle technique a pu être employée en gestion des chaussées pour exécuter quatre fonctions importantes :

- a. pour simuler le comportement stochastique de la détérioration de la chaussée en prévoyant le niveau de serviabilité à différentes étapes;
- b. pour établir les matrices de transition de Markov en considérant les variations du trafic et les effets de l'environnement les chaussées;
- c. pour déterminer le meilleur moment pour intervenir et pour établir la programmation des activités d'entretien et de réhabilitation;

- d. pour fournir une base à l'optimisation pour l'établissement de solutions alternatives.

Boucher (1998) décrit le modèle de comportement des chaussées du système AGIR. Ce système tire profit d'un algorithme basé principalement sur l'analyse de régression en statistiques et génère des modèles de dégradation pour chaque famille de section des chaussées du réseau. Ces modèles prévoient le comportement futur de chaque section sans qu'aucun relevé passé ni opinion subjective ou classification arbitraire ne soient requis. Les courbes de comportement générées par AGIR sont présentées dans une fenêtre semblable à celle illustrée à la figure 3.

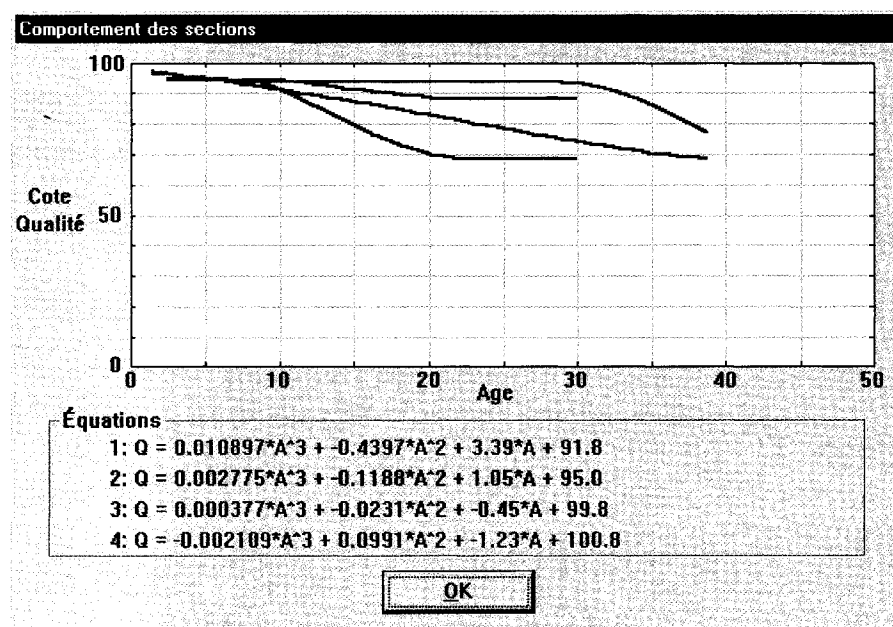


Figure 3 Courbes de comportement générées par AGIR
(Tirée de Boucher, 1998)

Assaf (1988) a établi une procédure de modélisation qui développe, pour chaque famille, une série d'équations reliant l'indice global de qualité à l'âge du revêtement. Chacune de

ces équations exprime l'évolution des dégradations des chaussées appartenant à une famille spécifique et donc, à une cause de détérioration donnée.

Les équations sont exprimées sous forme polynomiale du troisième degré de la forme :

$$\text{Qualité} = [a \times (\text{age})] + [b \times (\text{age})^2] + [c \times (\text{age})^3] + d \quad (2.2)$$

où : l'âge est exprimé en années

la qualité sur une échelle de 100 (excellent) à 0 (médiocre)

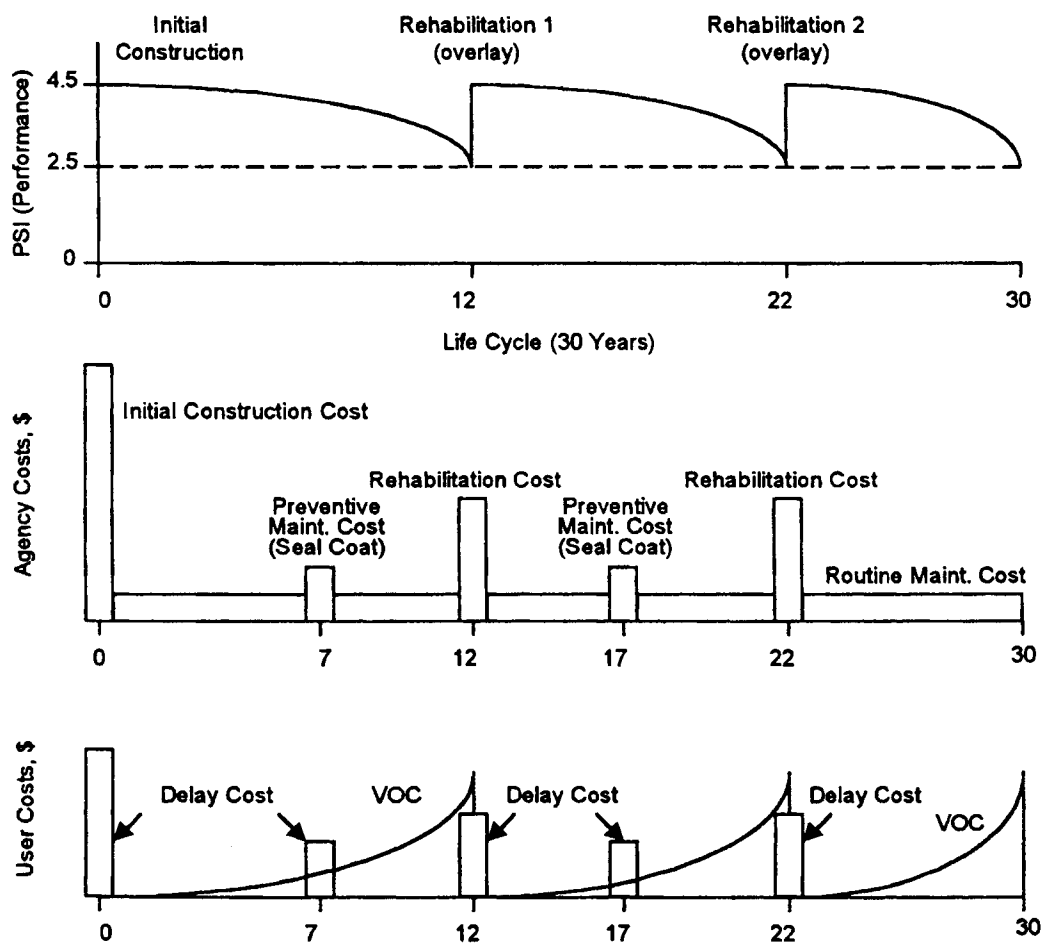
les paramètres a, b, c et d étant les coefficients respectifs associés à la variable explicative âge (Assaf 1988)

Hill et al. (1991) exposent le système de gestion des chaussées du *Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT)* à la fin des années 80. Deux sous-systèmes ont alors été ajoutés : le premier montre l'état et les besoins de chaque tronçon tandis que le second optimise la réhabilitation. Le premier est capable de visualiser le statut actuel de chaque section du réseau, en termes d'indice de serviabilité, d'indice d'aptitude structurale, d'indice des défauts de surface, ainsi qu'un indice composé de qualité de la chaussée. Le second considère un grand nombre d'options en calculant le coût des différentes options et le coût des retards aux usagers pour chaque combinaison de solutions. L'année de l'intervention la plus économique est considérée et les coûts des reports sont envisagés.

Beg, Zhang et Hudson (2000) soumettent une procédure pour déterminer des choix d'intervention sur le réseau routier. Les coûts déboursés par les administrations routières, les coûts générés par les retards des utilisateurs et les niveaux des performances sont les facteurs les plus importants pour comparer les diverses stratégies d'intervention sur les chaussées. Des évaluations économiques sont basées sur l'analyse du coût sur le cycle de vie. L'analyse de rentabilité économique est également incluse dans la procédure. La superficie sur la courbe de comportement qui détermine la performance est une mesure de l'efficacité d'une stratégie analysée. Un programme

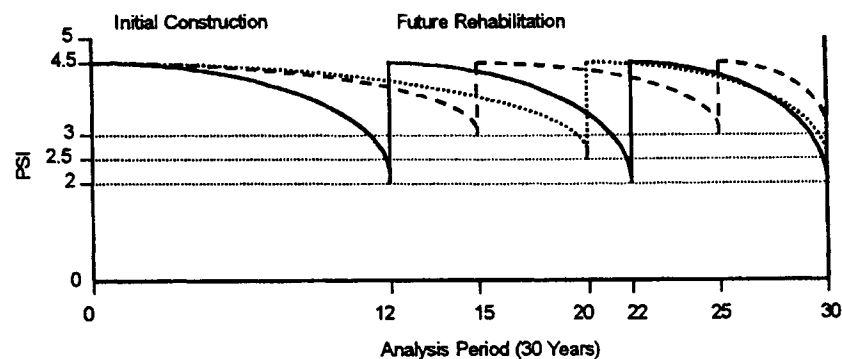
informatique TxPTS a été développé pour automatiser la procédure; celui-ci a été validé au *Texas Department of Transportation* (TxDOT).

Le graphique 6 illustre le cycle de vie d'une chaussée, sa performance et les coûts associés pour un cycle de vie de 30 années.



Graphique 6 Analyse du coût sur le cycle de vie
(Tiré de Beg, Zhang et Hudson, 2000)

Quant au graphique 7, il montre différentes stratégies d'intervention sur la chaussée avec différents niveaux de performance.



Graphique 7 Stratégies alternatives avec leur niveau de performance
(Tiré de Beg, Zhang et Hudson, 2000)

La figure 4 propose un cadre intégré pour l'évaluation des différentes stratégies d'intervention. Le système fournit les coûts initiaux, les coûts de l'administration routière durant le cycle de vie de la chaussée, les coûts totaux sur toute la période d'analyse ainsi que des indices d'efficacité économique. Cette approche permet de comparer différentes options sur la base du coût annuel actualisé.

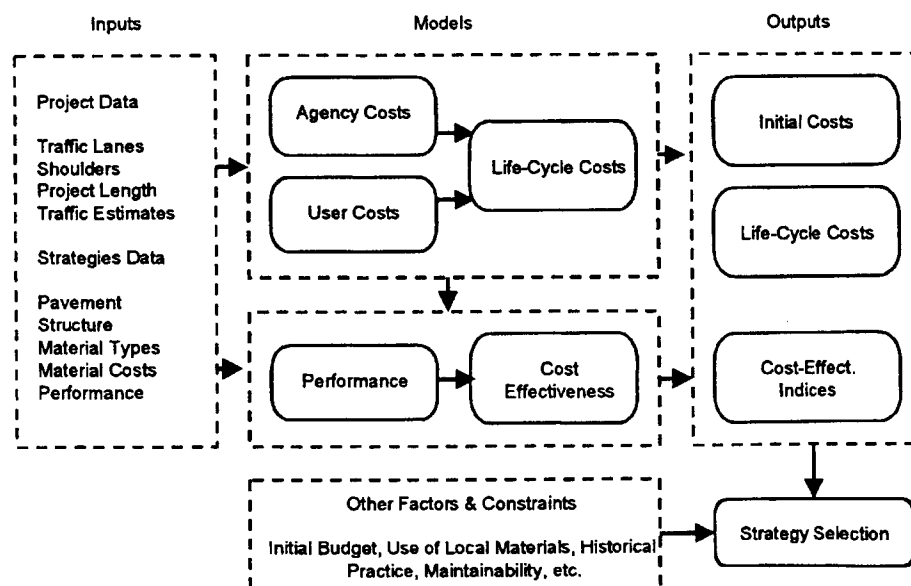


Figure 4 Cadre intégré pour l'évaluation des différentes stratégies d'intervention
(Tirée de Beg, Zhang et Hudson, 2000)

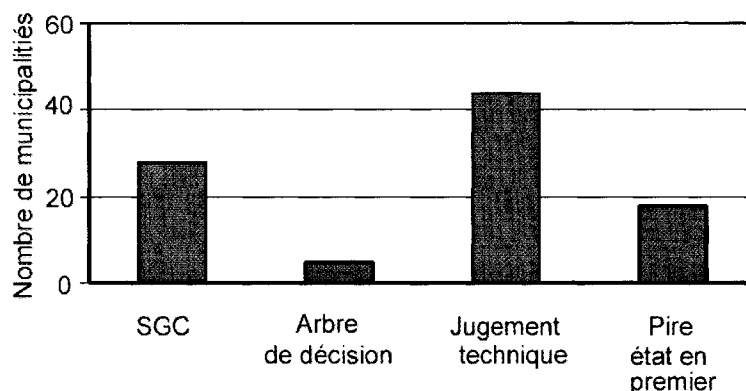
L'analyse du coût sur le cycle de vie (LCCA) représente l'évaluation économique au cours de la vie utile, exprimée en termes de dollars escomptés. En gestion des chaussées, le coût sur le cycle de vie comprend tous les coûts impliqués de la construction, l'entretien, et la réhabilitation de la chaussée sur une période d'analyse donnée. Un LCCA permet à l'ingénieur d'optimiser les dépenses en fournissant des solutions économiques de différentes stratégies de réhabilitation et d'entretien. Sebaaly et al. (1996) mentionnent que le NDOT emploie LCCA pour distinguer l'option la plus économique dans le temps.

Le système de gestion des chaussées du NDOT inclut un processus de LCCA où les coûts sont actualisés en appliquant l'analyse économique par la méthode de la valeur présente. L'optimisation au niveau réseau calcule le processus pour combiner la performance et l'analyse des coûts sur le cycle de vie, le tout dans un système pour donner la priorité à la technique de réhabilitation ou d'entretien qui fournira la meilleure performance au plus bas prix.

2.1.5 Système de prise de décision

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2002a) cite une enquête menée auprès de 56 municipalités canadiennes pour connaître la méthode utilisée pour choisir les projets d'entretien ou de réhabilitation de chaussées. Le graphique 8 montre la répartition des méthodes choisies par les municipalités canadiennes. Les réponses rapportées sont les suivantes :

- a. l'utilisation d'un système de gestion des chaussées;
- b. les arbres de décision;
- c. le discernement technique;
- d. le pire état en premier.



Graphique 8 Méthodes utilisées par les municipalités canadiennes
(Tiré du Guide national pour des infrastructures municipales durables, 2002a)

Le processus décisionnel pour intervenir sur les infrastructures est intégré à un cycle annuel de gestion qui réunit les nombreuses activités nécessaires à une saine gestion. Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003a) résume à la figure 5 le cadre de prise de décisions relatif à la préservation des chaussées. Le cycle de gestion comprend les huit étapes fondamentales :

- a. l'établissement ou la révision de niveaux de service;
- b. l'inventaire des chaussées;
- c. la détermination des besoins;
- d. la priorisation;
- e. la budgétisation;
- f. la conception de projets;
- g. la mise en œuvre de projets;
- h. le contrôle des résultats obtenus.

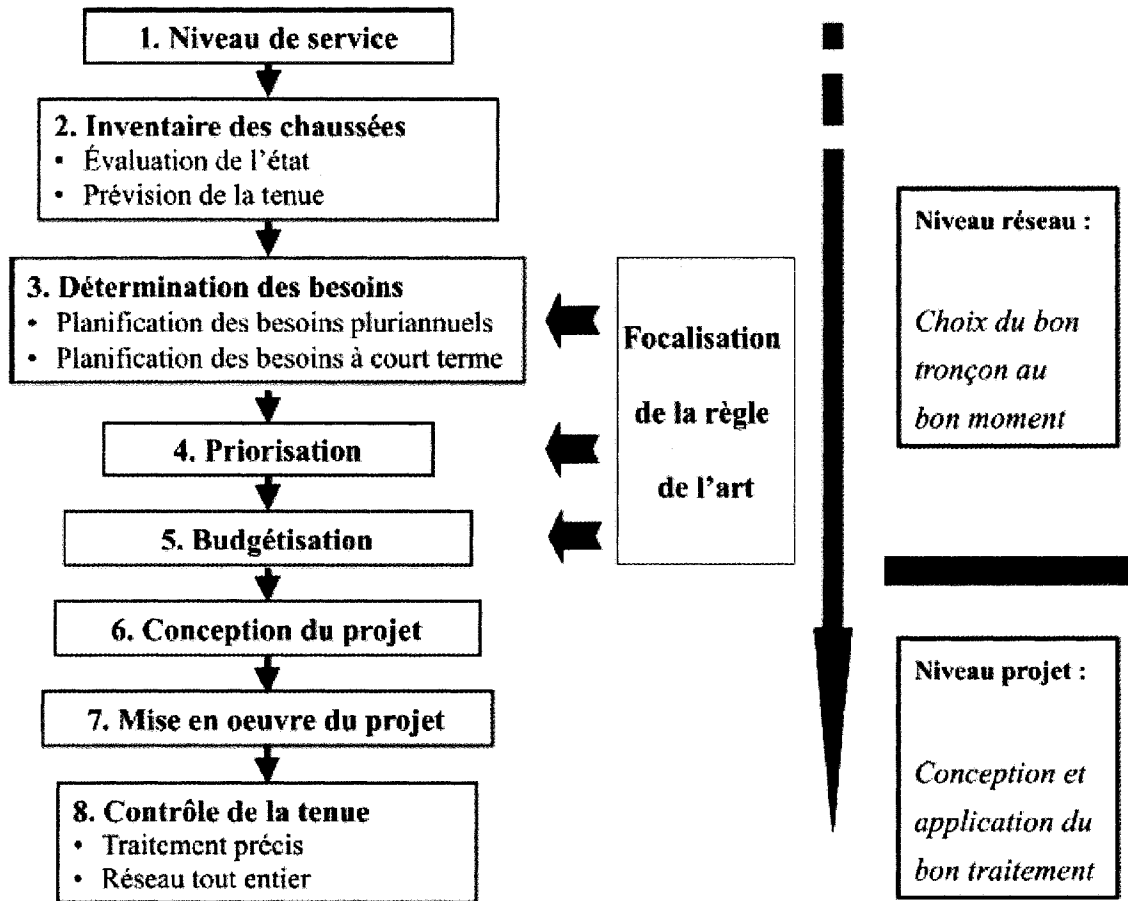


Figure 5 Cadre de prise de décision
(Tirée du Guide national pour des infrastructures municipales durables, 2003a)

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003a) rappelle la définition de la gestion d'actifs proposée par l'Association des transports du Canada. Il s'agit du «processus systématique qui consiste à entretenir, à améliorer et à exploiter des actifs matériels de façon efficace, à allier des principes d'ingénierie à des pratiques commerciales et à une théorie économique judicieuse, et à proposer des outils qui facilitent le recours à une approche plus logique et mieux organisée du processus de prise de décision».

En tenant compte de cette définition et de celle de la gestion des chaussées citée à la section suivante, le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2002a) met en évidence l'importance de l'entretien. Ainsi, l'entretien préventif fait partie intégrante de la gestion des chaussées et celle-ci, à son tour, fait partie de la gestion d'actifs. La figure 6 illustre bien le lien qui existe entre la gestion d'actifs, la gestion des chaussées et l'entretien préventif.

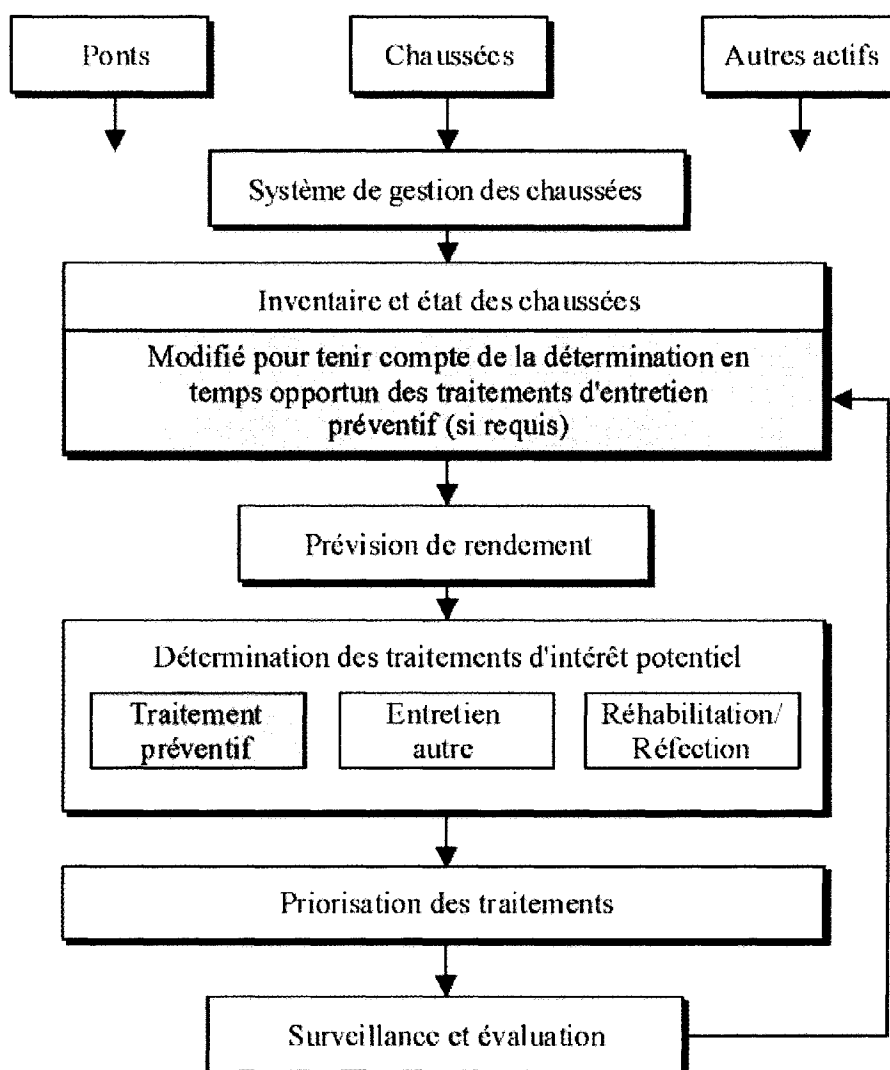


Figure 6 Rôle de l'entretien préventif dans la gestion d'actifs
(Tirée du Guide national pour des infrastructures municipales durables, 2002a)

Hicks et al. (1997) soutiennent que les techniques d'entretien préventif sont utiles pour prolonger la vie d'une chaussée, si elles sont appliquées au bon moment. Ils proposent un processus pour choisir les stratégies appropriées d'entretien pour différents types de déformation des chaussées, selon le niveau du trafic et l'environnement. Les auteurs ont développé des arbres de décision, basés sur leurs expériences, pour choisir les traitements d'entretien appropriés dans chacun des cas suivants : la rugosité, l'orniérage, les fissurations transversales et longitudinales, le désenrobage, l'arrachement et le ressuage. Les traitements d'entretien concernent seulement les scellements de fissures, le coulis de scellement, le micro-resurfacement, le traitement de surface additionnel, les recouvrements d'enrobés minces et d'autres traitements de surface minces. Par exemple, lorsque la chaussée est fissurée, l'arbre de décision est tel que représenté à la figure 7.

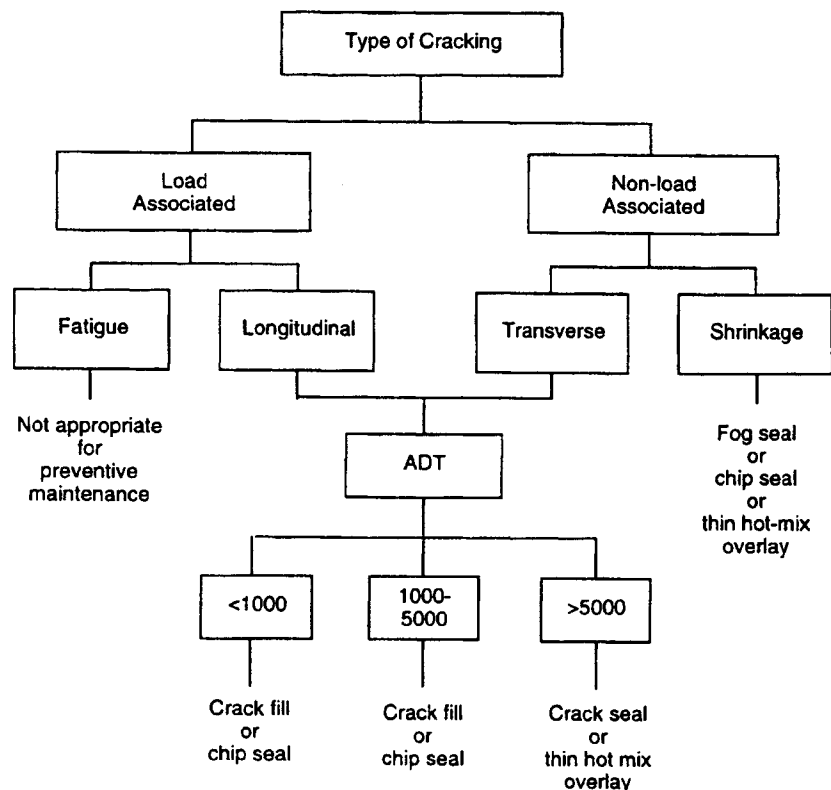


Figure 7 Arbre de décision pour la fissuration
(Tirée de Hicks et al., 1997)

Shober et Friedrichs (1998) signalent qu'un système de gestion efficace des chaussées exige une stratégie complète de conservation. Celui du *Wisconsin Department of Transportation* WisDOT est guidé par une philosophie qui a pour but d'optimiser la performance des chaussées pour fournir la plus haute qualité service au client par dollar dépensé. Cette qualité est exprimée en termes de confort, de commodité et de sécurité.

Les décisions sont guidées principalement par trois facteurs :

- a. les déformations;
- b. le roulement;
- c. l'orniérage.

Le but de cette stratégie est de déterminer un traitement logique à appliquer à la chaussée. En procédant ainsi, les dépenses reliées à la chaussée sont plus facilement défendables auprès de la population.

Pour chaque section de chaussée, il faut :

- a. déterminer les défauts de la chaussée;
- b. classer chaque défaut selon le niveau : aucun, mineur, modéré et grave;
- c. déterminer si la section excède un ou plusieurs seuils;
- d. évaluer le problème spécifique, si la section excède le seuil acceptable;
- e. évaluer le problème pour en déterminer le niveau;
- f. déterminer les solutions de traitement pour chaque problème;
- g. évaluer chaque problème, dans le cas de problèmes multiples;
- h. déterminer les options finales sur toute la longueur du projet.

Ce procédé est représenté à la figure 8 tirée de Shober et Friedrichs (1998).

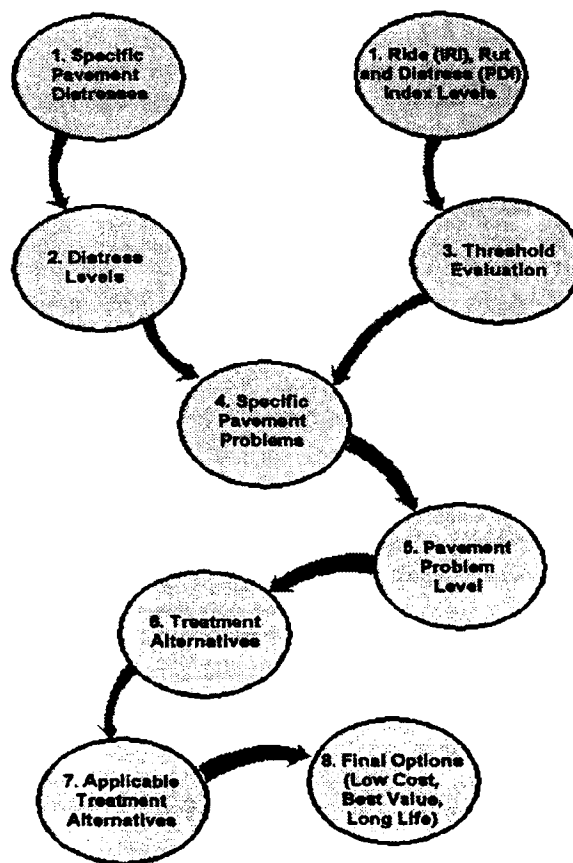


Figure 8 Système de gestion des chaussées du WisDOT
(Tirée de Shober et Friedrichs, 1998)

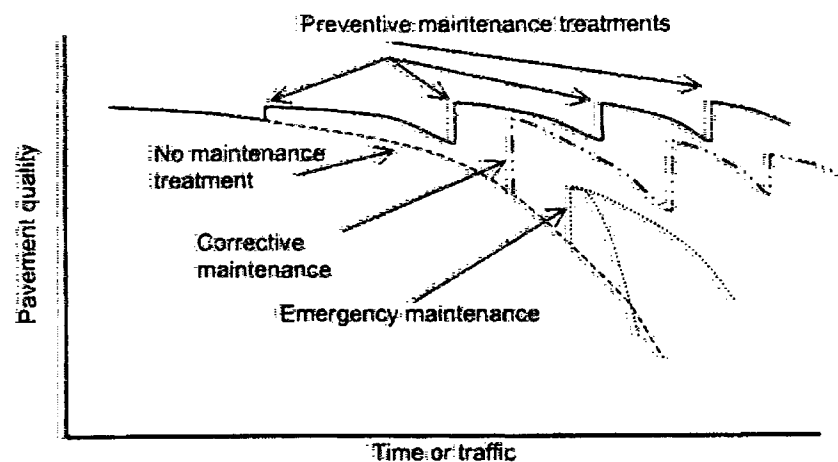
Flintsch et al. (1998) ont développé une formule basée sur l'opinion d'experts pour prioriser les projets de réhabilitation des chaussées. Cette formule est employée pour la préparation d'un programme quinquennal de conservation des chaussées, au département des transports de l'Arizona (ADOT). Un questionnaire comprenant un ensemble de sections de chaussées avec différentes caractéristiques est rempli par des experts pour qu'ils indiquent quelles sections devraient recevoir un traitement de réhabilitation, quel type de traitement ils recommanderaient sur chaque section, et quelle priorité devrait être assignée. Huit caractéristiques de chaussée, identifiées comme les variables les plus influentes, étaient la classification fonctionnelle, la région géographique, le nombre structural, le trafic, le confort au roulement, la fissuration,

l'orniérage, et finalement le coût d'entretien moyen des trois dernières années. En général, les experts ont indiqué que les critères basés sur l'orniérage, la classification fonctionnelle, la rugosité de la chaussée, la fissuration, le trafic et le coût d'entretien moyen influençaient de façon significative les décisions. Cependant, pour qu'elle soit plus fiable, cette approche requiert un nombre plus important d'experts.

Pour Zaniewski et Mamlouk (1999), le financement des infrastructures routières est insuffisant pour maintenir les chaussées dans leur état actuel en continuant à appliquer les mêmes politiques d'entretien et de réhabilitation. Avec un programme d'entretien préventif, l'état des chaussées peut être maintenu, d'une façon rentable menant à une meilleure qualité de la chaussée, à coût total moindre. L'entretien préventif est un programme qui fixe la stratégie d'intervention afin d'arrêter la progression de la détérioration, de retarder les dégradations progressives et réduire les besoins en matière d'activités d'entretien. L'objectif de cette stratégie est de prolonger la vie fonctionnelle de la chaussée en appliquant des traitements avant que la chaussée ne se détériore jusqu'à un état exigeant un traitement correctif. Une stratégie efficace comporte une combinaison de traitements, tels que le traitement périodique des fissures suivi d'un traitement de surface additionnel.

Plusieurs administrations routières ont employé des stratégies d'entretien préventif avec succès pour des routes à faible volume et à fort débit. L'entretien préventif des chaussées flexibles incluent les traitements suivants : le scellement d'imperméabilisation, le traitement de surface additionnel, le coulis de scellement, le micro-resurfaçage, le traitement des fissures et les couches d'enrobés minces. Le traitement devrait être basé sur l'état de la chaussée existante, le volume de circulation, et les conditions environnementales. D'autres facteurs tiennent compte de l'expérience, des contraintes de budget et de la réalité politique.

Un programme d'entretien préventif exige une application périodique des traitements, voir le graphique 9; ceci peut inclure un mélange de traitements. Par exemple, le programme d'entretien préventif de Mesa, en Arizona utilise un scellement d'imperméabilisation, trois et six ans après la construction ou la réhabilitation. Dans la huitième année, les fissures sont scellées. Dans la neuvième année, un traitement de surface additionnel ou un coulis de scellement est appliqué. Cette combinaison de traitement est rentable pour le programme d'entretien préventif de Mesa dans une région où le climat est chaud et sec et pour un tel niveau de circulation.



Graphique 9 Application périodique des traitements d'entretien
(Tiré de Zaniewski et Mamlouk, 1999)

Zimmerman et al. (2000) soulignent les efforts des dernières années au cours desquelles la *Federal Highway Administration* (FHWA) a développé des lignes directrices pour appliquer l'analyse sur le cycle de vie et favoriser l'utilisation d'une approche sur plusieurs années pour prioriser les interventions sur les chaussées. Ces efforts ont permis le développement d'un bulletin technique. Cette approche repose sur plusieurs années en utilisant des informations de coût sur l'ensemble du cycle de vie dans les calculs de rentabilité. La méthode d'analyse économique retenue est l'analyse bénéfice/coût appliquée de façon incrémentielle.

Evdorides et al. (2002) ont élaboré des modèles pour la détermination optimale des projets d'entretien d'infrastructure de chaussées considérés dans le projet RIMES (*Road Infrastructure Maintenance Evaluation Study*) du volet IV du programme de transports routiers de la Commission de l'Union européenne. La méthodologie proposée emploie des critères tels que l'évaluation de l'état de la chaussée et leur connaissance empirique associée pour faciliter le choix des tronçons de route dans lesquels une solution simple d'entretien peut corriger un ensemble de défauts observés.

Des règles de priorité sont définies pour prioriser les interventions. Ces règles, avec des calculs économiques simples, établissent un cadre pour la programmation des travaux à court terme. Des indicateurs économiques tels que des coûts annualisés sont calculés pour fournir une base commune afin d'évaluer la rentabilité de l'investissement.

2.2 Système de gestion des réseaux d'aqueduc

Cette partie du chapitre retrace quelques articles qui traitent des systèmes de gestion des réseaux d'aqueduc. Dans un premier temps, les caractéristiques des réseaux d'alimentation en eau potable sont expliquées ainsi que les données qui les composent. Puis, des modèles de prévision du comportement de l'aqueduc sont soumis. Enfin, des exemples de prise de décision illustrant le choix des meilleures stratégies d'interventions terminent cette partie.

2.2.1 Caractéristiques du système de gestion des réseaux d'aqueduc

Les réseaux d'aqueduc comprennent l'ensemble des installations nécessaires à l'alimentation d'une zone urbaine ou rurale en eau brute et en eau potable. La gestion de ceux-ci pose un problème complexe. La détérioration avancée des conduites souterraines, et plus particulièrement celles en fonte, cause de nombreux inconvénients au réseau de distribution. Une difficulté majeure est la perte de la capacité hydraulique

due à la corrosion des conduites; cela veut dire que le système n'est plus en mesure de fournir les débits en cas d'incendies, ni de répondre à la demande de consommation journalière. Dans les conduites d'aqueduc coulant sous pression, des fuites peuvent survenir.

D'après une étude de l'Association québécoise des techniques de l'eau publiée dans la revue «Eau du Québec» en 1974 dont fait état Brière (2000), ces fuites de l'ordre de 20% sur l'ensemble du réseau peuvent atteindre 42% dans le cas du réseau d'aqueduc de la ville de Sainte-Foy. Depuis ce temps, le réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Sainte-Foy s'est beaucoup amélioré (environ 15% de fuite), tandis que celui des autres municipalités s'est grandement détérioré : certains experts quantifient les fuites à plus de 50%. Réseau environnement (1999) a produit un guide à l'usage des responsables municipaux afin de les contrôler.

Le développement de nouvelles technologies dites «sans tranchée» permet de réhabiliter les conduites sans occasionner d'inconvénients à la surface de la chaussée. La gestion des réseaux d'aqueduc consiste à prendre les décisions les plus rentables concernant l'entretien et la réparation des conduites enfouies. Un tel système doit faire l'inventaire du réseau d'aqueduc, établir des modèles hydrauliques, analyser les données et prévoir la modélisation du coefficient C de Hazen-Williams. Ce coefficient C est dû à la rugosité de la surface intérieure des parois des conduites. La dégradation de ce coefficient C entraîne une réduction de la capacité hydraulique de la conduite. Il faut alors déterminer si la demande et la protection incendie sont assurées.

Le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) a produit les classeurs du CERIU (1997) : un pour les chaussées et un autre pour les infrastructures souterraines. Celui des conduites souterraines comporte une revue des techniques d'auscultation et des fiches descriptives des interventions dites «sans tranchée».

2.2.2 Données relatives à l'aqueduc

L'opération optimale des systèmes de distribution en eau potable requiert de nombreuses données que les administrations publiques ne possèdent généralement pas. Plusieurs auteurs ont publié sur le sujet, dont Yang, Sun et Yeh (2000).

Bernard et al. (2000) énumèrent les données concernant l'aqueduc selon les cinq classes suivantes :

- a. les données d'inventaire :
 - identifiant de la conduite;
 - type de conduite;
 - type d'eau;
 - diamètre;
 - matériau de fabrication;
 - profondeur;
 - longueur;
 - date d'installation;
- b. les données sur l'état :
 - état structural;
- c. les données sur les sollicitations :
 - pression;
- d. les données sur l'entretien :
 - réparations de fuites;
 - rinçage;
- e. les données sur les plaintes :
 - basse pression;
 - qualité de l'eau.

2.2.3 Modèle de prévision du comportement de l'aqueduc

Comme pour l'égout, les causes de détérioration des réseaux d'aqueduc sont regroupées en trois types : structurale, hydraulique et environnementale. Elles sont également interdépendantes et doivent être analysées conjointement. Une évaluation intelligente de l'état d'un système de distribution d'eau doit reposer sur quatre éléments principaux :

- a. l'intégrité structurale;
- b. la qualité de l'eau;
- c. les conditions hydrauliques;
- d. les fuites.

Une méthode développée par Mailhot et al. (2000a) et appliquée à quatre municipalités du Québec permet de modéliser l'état structural des conduites d'aqueduc à partir d'un court historique de bris. Ce modèle détermine l'évolution probable de l'état structural en estimant la probabilité d'apparition de bris.

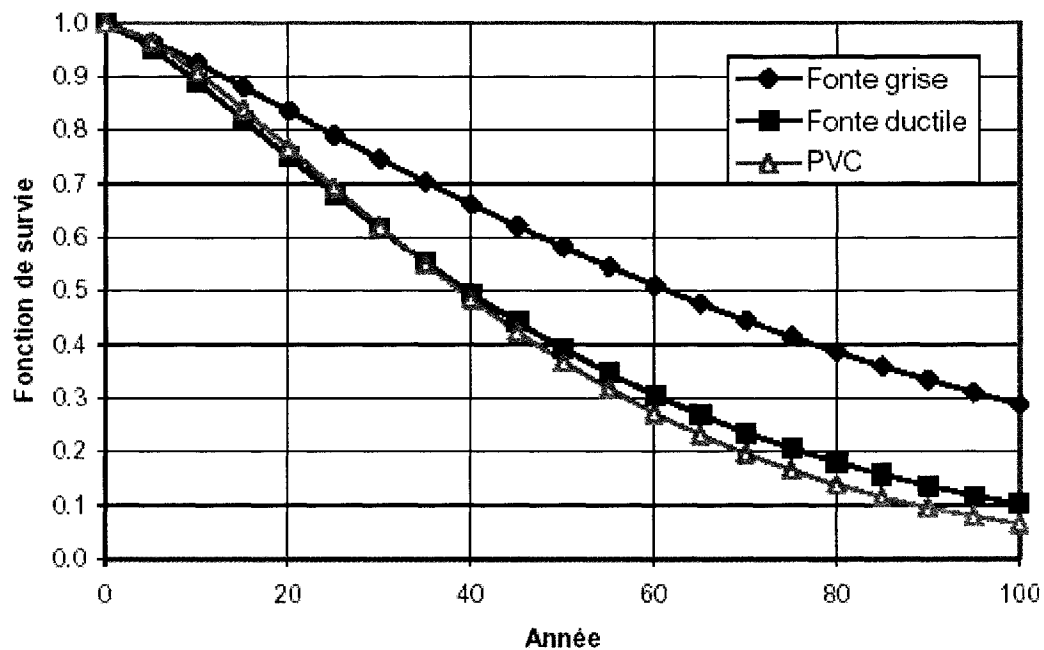
Mailhot et al. (2000a) rapportent plusieurs études montrant que la détérioration est liée aux caractéristiques des conduites et que l'ordre des bris doit être considéré. L'ordre des bris désigne le nombre de bris subis par une conduite à un moment donné. L'une d'entre elles révèle que plus une section a subi de bris, plus la probabilité qu'elle subisse d'autres bris est élevée.

Les auteurs ont utilisé une fonction de distribution pour représenter chaque ordre de bris. En fait, deux types de distribution ont été considérés : une distribution de Weibull pour modéliser les temps entre les premiers bris et la pose et une distribution exponentielle pour modéliser les bris d'ordres supérieurs. Une fonction de survie est notée :

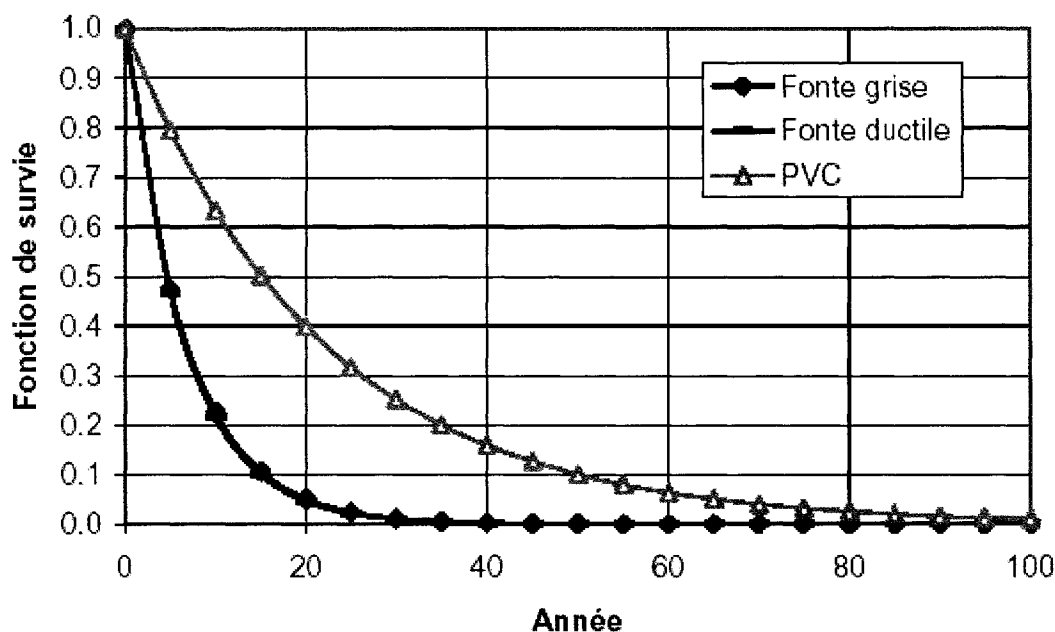
$$S(t) = \Pr\{T > t\} = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2.3)$$

Cette fonction correspond à la probabilité qu'un événement n'ait pas eu lieu au temps t ; dans cette équation, T est une variable aléatoire continue, $f(t)$ une fonction de densité de probabilité (pdf) et $F(t) = \Pr\{T \leq t\}$ est une fonction de distribution cumulative (cdf) donnant la probabilité que l'événement se produise pendant la durée t . Il est plus commode de travailler avec le complément de la fonction cumulative (cdf) soit la fonction de survie qui fournit la probabilité que la conduite d'aqueduc n'ait pas subi de bris au temps t .

Mailhot et al. (2000b) présentent, entre autres, les courbes de survie par type de matériau pour la ville de Chicoutimi : la première représentée au graphique 10 concerne le premier bris et la seconde au graphique 11 pour les bris subséquents.



Graphique 10 Fonction de survie par matériau pour le premier bris
(Tiré de Mailhot et al., 2000b)



Graphique 11 Fonction de survie par matériau pour les bris subséquents
(Tiré de Mailhot et al., 2000b)

Les fonctions de survie prennent les formes suivantes : $S(t) = e^{-\lambda t}$ pour la distribution exponentielle et $S(t) = e^{-\left(\frac{t}{m}\right)^{\beta}}$ pour la loi de Weibull. La valeur des paramètres sera déterminée afin de caler le modèle.

2.2.4 Choix des interventions

IRC (2002) a publié sur le site web de l'Institut de recherche en construction (IRC) une démarche conviviale pour réhabiliter des infrastructures urbaines. La recherche vise la performance des réseaux d'égouts collecteurs et des conduites principales de distribution d'eau, ainsi que des canalisations de drainage et d'égouts de faible et de fort diamètre, ordinairement en fonte grise, en fonte ductile, en PVC, en plastique ou en béton. Cette démarche aide les ingénieurs municipaux à prendre des décisions éclairées relativement

à l'entretien, à la remise en état ou au remplacement des canalisations enfouies existantes, en utilisant et en mettant au point des technologies nouvelles et améliorées.

Étant donné que la planification du renouvellement des réseaux de distribution exige une évaluation précise du degré de détérioration des conduites que les municipalités ne possèdent pas, Rajani et Kleiner (2001) ont identifié un modèle de fréquence des bris de conduites à partir des données existantes.

Avec des modèles déterministes disponibles dans la littérature technique, ces chercheurs ont développé WARP qui signifie «*Water Mains Renewal Planner*»; il s'agit d'un logiciel qui aide les municipalités à planifier le renouvellement de leurs conduites d'eau en modélisant les taux de détérioration et de bris des conduites.

L'analyse du modèle de fréquence des bris de conduites tient compte de facteurs tels que :

- a. la température;
- b. l'humidité du sol et le déficit pluvial;
- c. la fréquence de remplacement des conduites;
- d. les différentes stratégies de réhabilitation par protection cathodique.

Le prototype se compose de trois modules distincts, soit :

- a. analyse des modèles de fréquence des bris de conduites;
- b. prévisions à court terme;
- c. planification à long terme.

La description schématique de WARP est représentée à la figure 9.

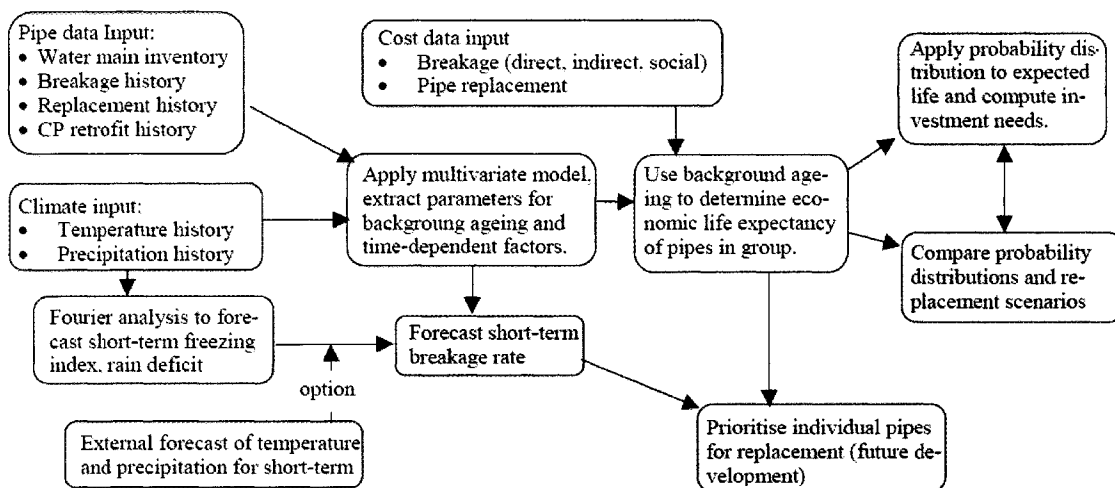


Figure 9 Description schématique de WARP
(Tirée de Rajani et Kleiner, 2001)

L'IRC (2003) spécifie que le logiciel WARP quantifie l'influence de chacun de ces facteurs sur le taux de bris des conduites pour déterminer le «vrai» taux de détérioration des conduites souterraines et pour prédire l'impact de différentes stratégies opérationnelles sur les taux de bris futurs.

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2002b) expose les grandes lignes de la règle de l'art relative à l'inspection d'un réseau de distribution d'eau en vue de déceler tout signe de détérioration. Les processus de détérioration des réseaux de distribution d'eau potable et les facteurs qui peuvent avoir une incidence sur la vitesse à laquelle ceux-ci se détériorent sont décrits. Les municipalités, préoccupées en matière de santé et de sécurité, se doivent d'offrir une réserve d'eau potable adéquate de manière rentable, fiable et durable. Leur réseau de distribution d'eau doit être soumis à un programme d'inspection stratégique. La détérioration d'un réseau de distribution d'eau est subodorée lorsqu'un ou plusieurs des phénomènes suivants se manifestent :

- a. une détérioration de la qualité de l'eau en raison de la corrosion interne des éléments constitutants métalliques ou de mauvaises pratiques d'entretien;

- b. une réduction de la capacité hydraulique en raison de la corrosion interne des éléments constitutants métalliques sans revêtement;
- c. un débit de fuite élevé en raison de la corrosion ou de la détérioration des joints;
- d. des ruptures fréquentes dues à la corrosion, à la dégradation du matériau, à de mauvaises pratiques de mise en place, à des défauts de fabrication ou aux conditions d'exploitation.

Suite au vieillissement des infrastructures, aux demandes des usagers exigeant l'amélioration du niveau de service et aux ressources financières limitées, le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003b) incite les municipalités à élaborer un plan de renouvellement de leur réseau de distribution d'eau qui doit aborder non seulement le renouvellement continu d'infrastructures ayant atteint la fin de leur vie utile, mais également les modernisations qui permettront de rendre le réseau conforme aux normes plus exigeantes.

Deux façons complémentaires d'élaborer un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau sont précisées dans le document : la démarche descendante qui sert à la planification stratégique à long terme de politiques et de programmes et la démarche ascendante pour la planification à court terme de projets d'immobilisations. Dans les deux approches, le cadre d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau est établi en posant sept questions :

- a. Que possède-t-on?
- b. Quelle en est la valeur?
- c. Quel en est l'état?
- d. Que doit-on faire?
- e. Quand doit-on le faire?
- f. Combien cela coûtera-t-il?
- g. Comment va-t-on payer les travaux?

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003c) propose aux municipalités une façon de choisir la technique appropriée de réhabilitation ou de remplacement d'une conduite d'aqueduc en fonction de facteurs sociaux, économiques et environnementaux, et des règles de l'art en vigueur dans l'industrie. Après que la municipalité ait déterminé qu'il y a lieu de réparer un tronçon bien défini de conduite d'aqueduc et avant de choisir la technique de réhabilitation ou de remplacement appropriée, les questions préalables doivent être posées relativement :

- a. aux travaux tels que la sécurité, l'exploitabilité, le coût et l'efficience;
- b. à l'importance du contrat, puisque, lorsque le montant est peu élevé, certaines solutions technologiques doivent être éliminées;
- c. au risque lié au fait d'aller de l'avant avec le projet ou de ne pas y donner suite, en tenant compte des aspects environnementaux et des effets défavorables;
- d. de la disponibilité locale des diverses techniques;
- e. de la profondeur de la conduite d'eau et des risques de gel;
- f. de la densité des branchements, qui peut faire augmenter substantiellement le coût.

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003c) suggère aux municipalités un schéma de principe à suivre pour déterminer quelles sont les techniques de réhabilitation ou de remplacement de conduites d'eau à utiliser en fonction de leur situation et leur besoin. Le schéma de la figure 10 montre la définition des problèmes, aborde les causes possibles de chacun d'entre eux et offre le choix entre le remplacement complet ou la réhabilitation structurale ou non structurale.

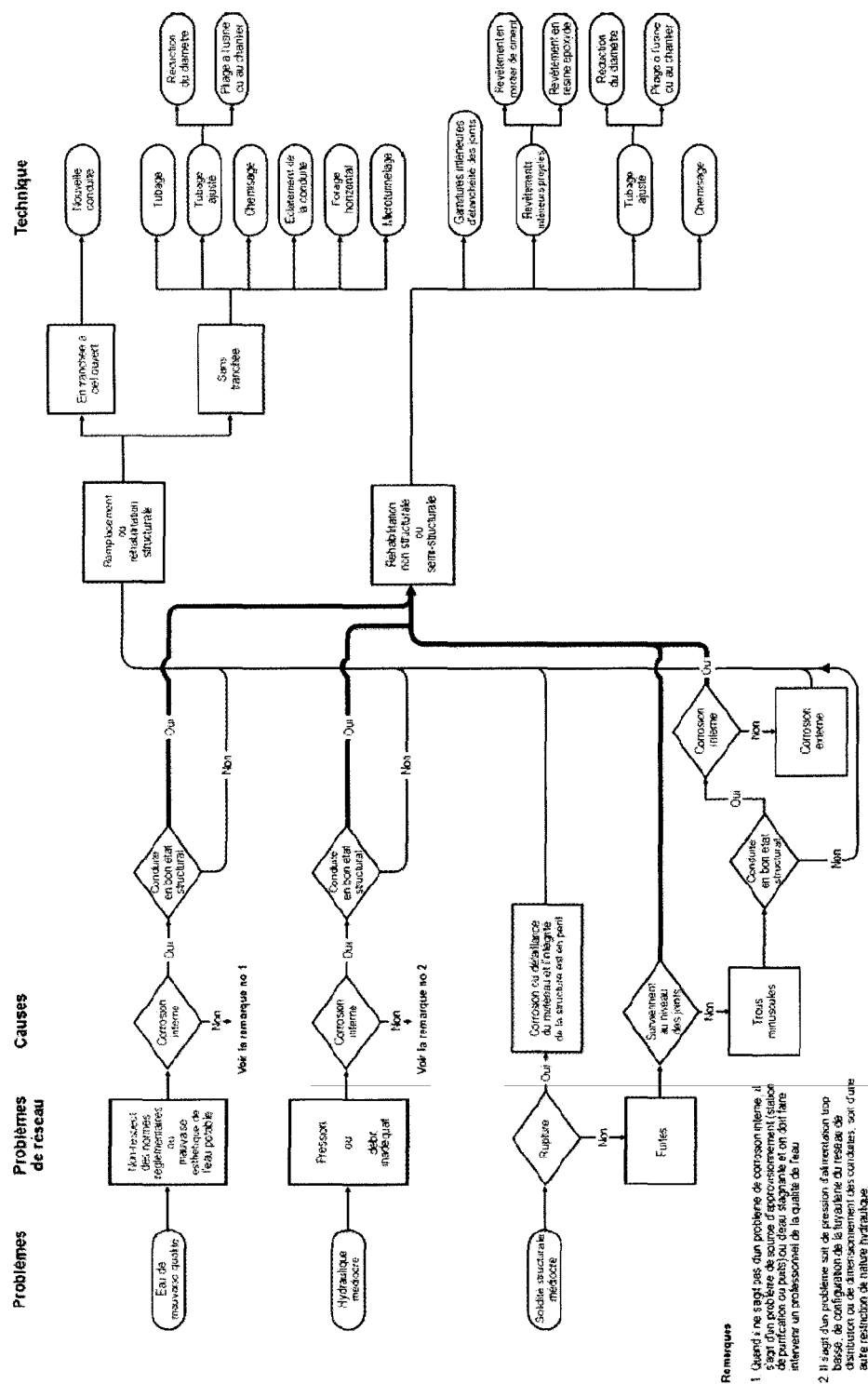


Figure 10 Schéma de principe pour choisir la technique de réhabilitation
(Tirée du Guide national pour des infrastructures municipales durables, 2003c)

2.3 Système de gestion des réseaux d'égouts

Comme pour les réseaux d'aqueduc, quelques références décrivant des systèmes de gestion des réseaux d'égouts sont présentées. Dans un premier temps, les caractéristiques des réseaux d'assainissement sont énoncées, ainsi que les données qui les composent. Par la suite, des modèles de prévision du comportement de l'égout sont exposés. Enfin, des exemples de prise de décision illustrant le choix des meilleures stratégies d'interventions complètent cette partie.

2.3.1 Caractéristiques du système de gestion des réseaux d'égouts

Il existe différents réseaux d'égouts classés en fonction des eaux usées qu'ils transportent soit les réseaux d'égout sanitaire, d'égout pluvial, d'égout unitaire ou d'égout pseudo séparatif. Les conduites d'égout sanitaire transportent les eaux usées domestiques provenant des résidences, des commerces et des industries, et certaines eaux parasites. Les conduites d'égout pluvial évacuent les eaux de ruissellement produites par la pluie et la fonte des neiges. Quant aux conduites d'égout unitaire, elles canalisent toutes les eaux usées du territoire dans la même conduite. Depuis quelques années, la construction de réseau unitaire et pseudo séparatif est interdite au Québec. Il reste peu de villes, dont Montréal, où de telles conduites sont encore opérationnelles.

Les conduites d'égout sanitaire requièrent des entretiens périodiques. Le récurage de l'égout est une opération importante qu'il ne faut surtout pas négliger. Bernard (2000) identifie les principaux problèmes liés à l'entretien des réseaux d'égout sanitaire :

- a. l'infiltration de l'eau dans la conduite;
- b. l'arrivée d'eau pluviale dans le réseau d'égout sanitaire;
- c. l'obstruction par du sable, des débris, de la graisse, des racines, etc.;
- d. les bris de la conduite;
- e. les dommages causés par des déchets.

Les systèmes de collecte des eaux usées reçoivent des apports indésirables d'eaux parasites entrant dans les conduites par des fissures dans les tuyaux, des joints défectueux, des regards d'égout et des raccordements de services. Ces eaux parasites incluent les eaux d'infiltration souterraines et les eaux de captage raccordées de façon illicite à l'égout sanitaire. Elles diluent les eaux usées en augmentant leur volume, ce qui entraîne des coûts accrus aux stations de pompage et une baisse de rendement au système d'épuration.

Le réseau d'égout pluvial requiert aussi des entretiens périodiques, notamment aux puisards. Par contre, l'essentiel du travail de gestion s'effectue au niveau de l'hydrologie et du ruissellement pluvial qui s'intéressent à la partie du cycle de l'eau affectée par l'urbanisation. Cela consiste à évaluer l'infiltration de l'eau dans le sol et le fonctionnement des nappes phréatiques, le ruissellement des eaux de surface et son écoulement dans les biefs naturels ou artificiels, etc., dans le but d'évacuer les eaux de pluie pour éviter les inondations.

Pour Bernard (2000), la gestion du réseau d'égout pluvial est organisée, comme pour la gestion des chaussées, selon trois groupes d'activités :

- a. la collecte des données sur les réseaux (conduites et accessoires) et sur les précipitations;
- b. la modélisation hydraulique, hydrologique, économique et environnementale;
- c. les stratégies d'intervention.

Un système intégré de gestion des égouts suppose un processus d'évaluation périodique et systématique de l'état hydraulique et structural, l'établissement d'un système de notation standardisé, le développement et la mise à jour de modèles de prévision de la performance, l'analyse des coûts sur le cycle de vie et le développement d'un processus de priorisation pour le choix des interventions.

2.3.2 Données relatives à l'égout

Comme pour les réseaux d'aqueduc, l'opération optimale des systèmes d'assainissement requiert de nombreuses données que, là aussi, les administrations publiques ne possèdent généralement pas. Bernard et al. (2000) énumèrent les données concernant les égouts selon cinq classes :

- a. les données d'inventaire :
 - identifiant de la conduite;
 - type de conduite;
 - type de réseau;
 - matériau de fabrication;
 - forme géométrique;
 - dimension;
 - longueur;
 - radier amont;
 - radier aval;
 - pente;
 - date d'installation;
- b. les données sur l'état :
 - état structural;
- c. les données sur les sollicitations :
 - type de rejets;
- d. les données sur l'entretien :
 - réparations sur conduites;
 - réparations sur raccordements;
- e. les données sur les plaintes :
 - refoulements;
 - odeurs.

2.3.3 Modèle de prévision du comportement de l'égout

Les causes de détérioration des réseaux d'égouts sont regroupées en trois catégories : structurale, hydraulique et environnementale. Elles sont interdépendantes et doivent être analysées conjointement.

Les problèmes fonctionnels des réseaux d'assainissement incluent principalement des surcharges et des inondations en surface. Rivard et Dupuis (2000) signalent que l'aspect environnemental est directement associé à une problématique hydraulique, ce qui nécessite des interventions souvent similaires.

Des modèles informatiques donnent la possibilité de décrire mathématiquement le comportement d'un système d'égout pluvial. Le modèle doit être calibré avec les données réelles. Parmi les modèles qui sont du domaine public, se retrouvent Illudas et SWMM qui désignent «*Illinois Urban Drainage Area Simulator*» et «*Storm Water Management Model*».

Bengassem (2001) précise que «une défaillance hydraulique survient lorsqu'une composante ou un tronçon de conduite n'évacue pas adéquatement les eaux usées et/ou de ruissellement avec une période d'occurrence inférieure ou égale à celle établie lors de la conception du réseau».

Le fonctionnement hydraulique d'un réseau d'égout est décrit par un modèle de simulation caractérisé par deux paramètres : le débit à évacuer et la capacité hydraulique des conduites. Lors de dépassement de capacité, l'écoulement passe localement d'un régime à surface libre à un régime en charge. À certains endroits et dans certaines situations, ces mises en charge peuvent être tolérables jusqu'à un certain niveau et inacceptables lorsqu'elles créent des débordements. Cependant, le fait qu'une conduite coule en charge n'implique pas nécessairement qu'elle soit défaillante parce que le

problème peut se situer en aval. Donc, le rapport entre le débit de conception et le débit maximal n'est pas suffisant pour évaluer la performance hydraulique; il faut alors utiliser un modèle capable de détecter les responsables des dysfonctionnements et en évaluer l'ampleur.

Bengassem (2001) considère les critères suivants pour évaluer la performance hydraulique des réseaux d'assainissement :

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

Une approche systématique pour la détermination de la détérioration et de la désuétude des réseaux d'égout est nécessaire pour mesurer entièrement l'état de ces systèmes souterrains. Elle implique des évaluations structurales et hydrauliques des conduites d'égout régulièrement et systématiquement, et l'établissement d'un système standard d'estimation de leur état. Il faut aussi développer et mettre à jour des modèles de prévision pour l'état des égouts. Wirahadikusumah et al. (2001) avancent qu'une gestion intégrée des réseaux d'égouts, qui inclut l'analyse des coûts sur le cycle de vie et le développement de programmes de priorisation pour le choix des projets de réhabilitation, est essentielle pour obtenir une gestion rentable des actifs.

La modélisation de la prévision de l'état structural des conduites est souvent basée sur les chaînes de Markov. Wirahadikusumah et al. (2001) ont appliqué ce modèle à des conduites d'égout unitaire de la ville de Indianapolis aux États-Unis tandis que Micevski et al. (2002) l'ont appliqué à des conduites pluviales de la ville de Newcastle en Australie.

L'état structural des conduites d'égout est classifié en cinq catégories :

- état 1 : état presque parfait;
- état 2 : quelques détériorations en surface;
- état 3 : détériorations avancées;
- état 4 : détériorations majeures;
- état 5 : niveau de détérioration rendant la conduite non fonctionnelle.

Le dernier cas, l'état 5, ne doit pas être considéré car la conduite n'assume plus son rôle et ne peut plus évacuer les eaux; cette condition n'est normalement pas observée car une telle conduite est excessivement endommagée. Plusieurs matrices de transition sont développées selon les catégories de conduites : le type de matériau, le type de sol environnant et l'exposition à un environnement agressif. La matrice de transition P a la forme suivante :

$$P = \begin{bmatrix} 1 - (P_{12} + P_{13} + P_{14}) & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ 0 & 1 - (P_{23} + P_{24}) & P_{23} & P_{24} \\ 0 & 0 & 1 - P_{34} & P_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le modèle de prévision de l'état structural basé sur les chaînes de Markov est illustré à la figure 11.

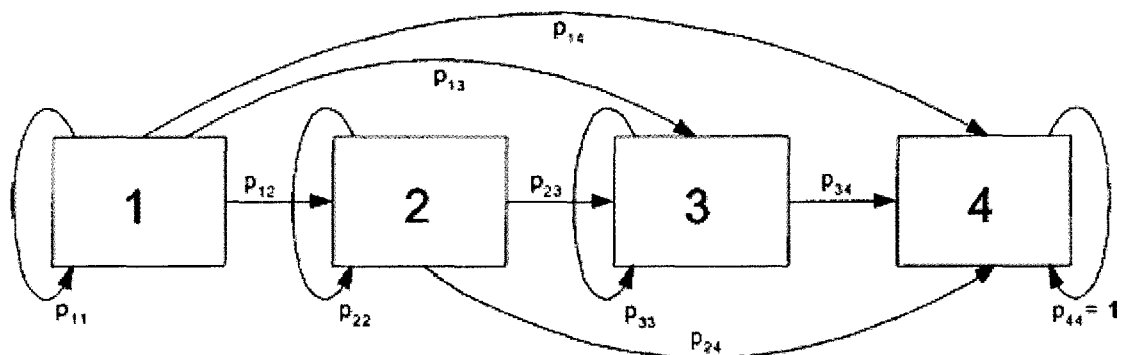


Figure 11 Schéma affichant les possibilités de transition d'un état à un autre
(Tirée de Micevski et al., 2002)

2.3.4 Choix des interventions

Le *Water Research centre* WRc est la principale organisation reconnue mondialement pour développer et mettre en œuvre des programmes opérationnels pour les réseaux d'égouts et d'aqueduc. WRc (1986) est le manuel de réhabilitation des égouts reconnu mondialement pour planifier et programmer des investissements dans les réseaux d'égouts. L'édition la plus récente date de 2001 et est également disponible en version électronique. WRc (1986) décrit l'approche rationnelle à retenir pour des projets de rénovation des réseaux d'égouts, la planification et les techniques de réhabilitation.

Abraham et al. (1998) rappellent que dû au fait de leur faible visibilité, l'évaluation et la réhabilitation des conduites d'égout sanitaire sont souvent négligées jusqu'à ce qu'une catastrophe se produise. Cette négligence de l'entretien des conduites enfouies coûte cher, accélère la détérioration de ces infrastructures et peut causer des interruptions de service. Une approche systématique pour déterminer la détérioration des infrastructures souterraines, notamment les égouts, et un système intégré de gestion des égouts est nécessaire pour comprendre pleinement le processus d'opération de ce système d'infrastructures.

Les auteurs proposent les principaux aspects d'un système intégré de gestion des égouts. Ils mentionnent notamment le développement d'une identification réseau, la classification des égouts et un système de notation de son état, les mécanismes de détérioration, la modélisation de la prévision et l'utilisation de techniques d'optimisation pour maximiser le ratio coût/bénéfice sur un horizon de planification. Ces étapes sont illustrées à la figure 12.

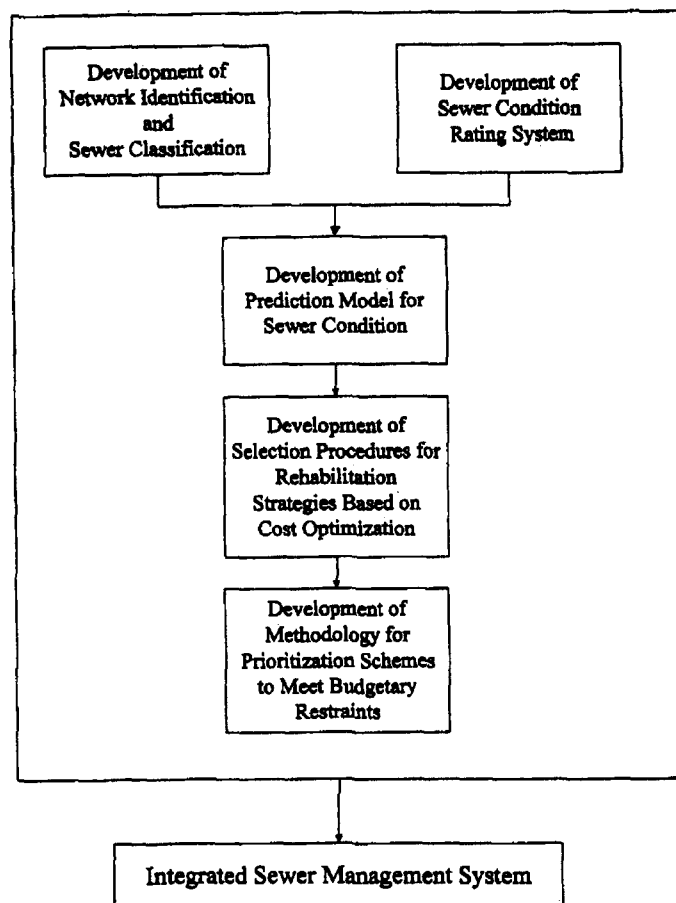


Figure 12 Principales composantes d'un système intégré de gestion des égouts
(Tirée de Abraham et al., 1998)

Le système intégré de gestion des égouts proposé par Abraham et son équipe fournit des lignes directrices du processus de prise de décision. Il utilise des techniques d'optimisation pour obtenir le coût minimum des différentes options de traitement d'entretien et de réhabilitation sur la durée de vie des égouts. L'état actuel de l'égout et la prédiction de son état futur sont déterminés par l'analyse sur le cycle de vie. En prenant en compte l'état futur comme conséquence des actions prises dans le présent, la meilleure option d'intervention est identifiée. La figure 13 montre le processus de sélection des choix de réhabilitation en vigueur à Indianapolis pour les conduites d'égout unitaire de grand diamètre.

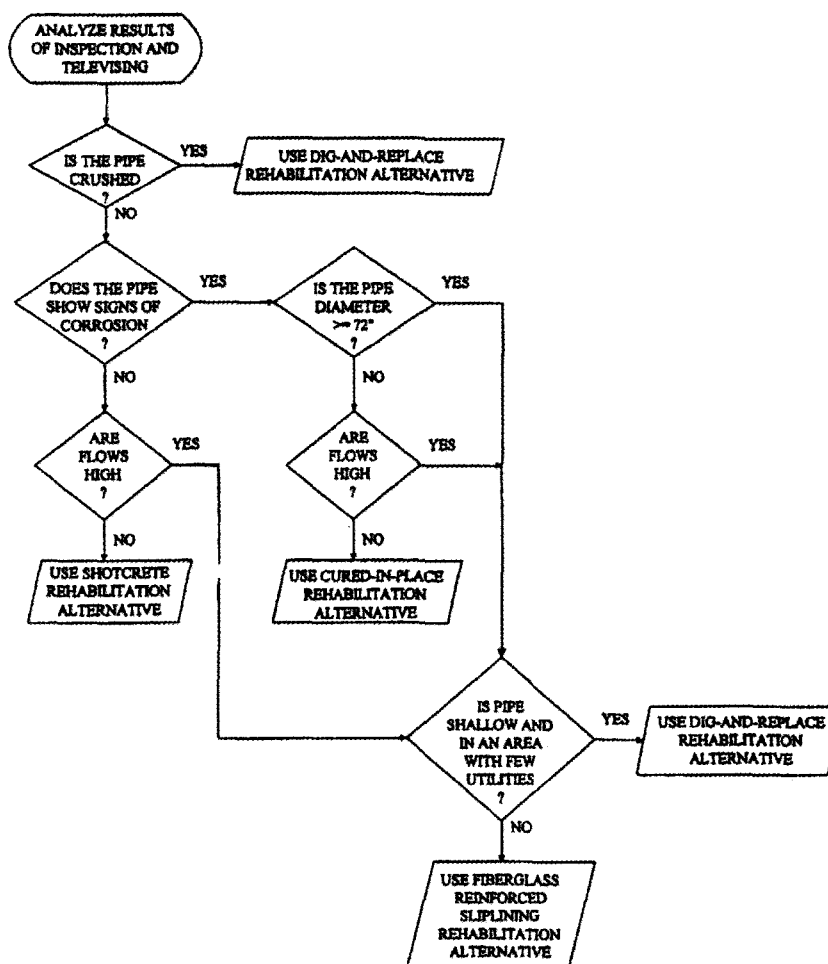


Figure 13 Processus de sélection des options de réhabilitation
(Tirée de Abraham et al., 1998)

Behera et al. (1999) présentent un modèle d'optimisation d'un système de gestion des eaux pluviales. Afin d'atténuer les effets des orages, des bassins de rétention sont aménagés. Ceux-ci occupent un espace terrain d'une certaine valeur en plus d'impliquer des coûts de construction, d'opération, d'entretien et de réparation. L'objectif des gestionnaires municipaux consiste à minimiser ces coûts tout en satisfaisant aux contraintes de ruissellement tant quantitatives que qualitatives. L'optimisation sert à déterminer les paramètres de conception, c'est-à-dire le volume d'emmagasinement et les caractéristiques du bassin de rétention. La procédure d'optimisation a d'abord été

appliquée à un sous-bassin de drainage. Par la suite, le modèle est étendu à l'optimisation de la conception pour plusieurs bassins parallèles. La résolution par la méthode de programmation dynamique a permis de déterminer les coûts minimums pour différents niveaux de contrôle des sous-bassins pris individuellement en respectant les niveaux de pollution et en contrôlant le ruissellement.

Bengassem (2001) constate que, jusqu'à présent, la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains (RAU) a été réalisée en dehors d'un cadre méthodologique de gestion économique et durable. En raison du report continu des interventions, les RAU se dégradent au point d'atteindre parfois un niveau de défaillance critique. Dans ce contexte, l'auteur a conçu un outil d'aide au diagnostic des RAU, basé sur une méthode systématique d'analyse du fonctionnement du réseau où des indices de performance sont évalués pour pouvoir comparer l'état de ses différentes composantes. L'évaluation de ces indices est déterminée par des paramètres de performance hydraulique et structurale et leur intégration. Les paramètres de performance hydraulique reflètent les mises en charge éventuelles que la conduite provoque sur elle-même ainsi que sur toutes les conduites situées en amont. Les paramètres structuraux sont caractérisés par deux aspects : le premier, intrinsèque, considère différents défauts relevés lors de l'étape d'auscultation et le second, extrinsèque, permet d'anticiper le taux de dégradation et l'impact occasionné, en tenant compte de l'environnement dans lequel évolue la conduite. Plusieurs approches heuristiques et intuitives intégrant les différents paramètres fonctionnels et structuraux existent pour obtenir un indice de performance unique. L'approche retenue par Bengassem utilise un système expert flou conçu pour agréger les différents paramètres de performance et obtenir un indice de performance global pour chaque tronçon du RAU, en tenant compte simultanément des aspects hydrauliques et structuraux.

IRC (2000) souligne un projet de collaboration entre l'Institut de recherche en construction (IRC), dix municipalités et deux firmes de consultants qui a permis de

développer une méthode pour évaluer l'état des égouts de grande dimension et de leurs puits d'accès, et d'en planifier leur réhabilitation. La figure 14 brosse le portrait de l'évaluation de l'état des puits d'accès et des égouts de grande dimension.

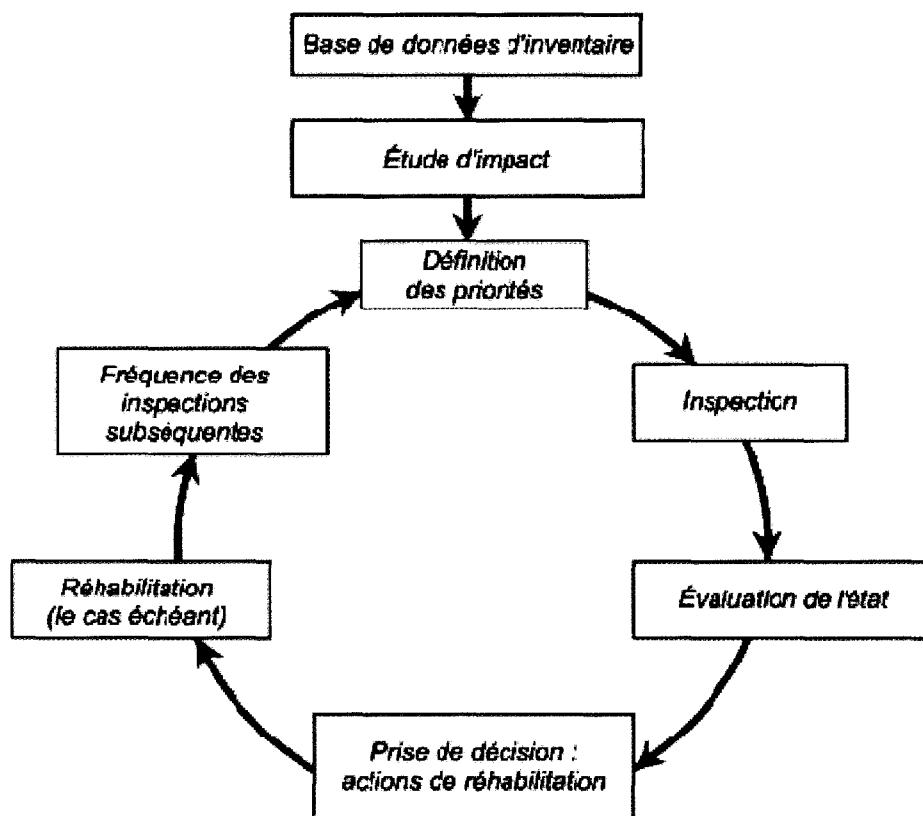


Figure 14 Schéma d'évaluation des puits d'accès et des égouts de grande dimension (Tirée de IRC, 2000)

La méthode d'évaluation de l'IRC s'applique autant aux conduites souples qu'aux conduites rigides. Une fois la base de données d'inventaire compilée, une étude d'impact est effectuée sur chaque conduite et chaque puits d'accès. Les municipalités peuvent alors identifier quelles conduites ou quels puits d'accès sont les plus susceptibles de causer des problèmes, et établir ainsi une priorité d'inspection. Cette inspection fournit l'occasion de déceler, d'identifier et de coder les anomalies qui sont ensuite classées en

fonction du type et du degré de gravité. Cette méthode regroupe les défaillances en deux catégories : opérationnelle et structurelle, et prévoit jusqu'à trois niveaux de gravité. La méthode de réhabilitation et le moment approprié pour la mettre en œuvre sont choisis en fonction de l'évaluation du taux d'impact, de la cote structurelle et de la cote opérationnelle. Une fois les décisions sur la méthode à employer et sur la fréquence des inspections à effectuer prises, la base de données est alors mise à jour.

Le Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003d) a élaboré une règle de l'art qui met l'accent sur la sélection de techniques qui s'offrent aux municipalités pour le remplacement ou la réhabilitation d'égouts pluviaux, unitaires ou sanitaires. Dans cette règle de l'art, la municipalité a préalablement identifié les tronçons d'égout devant faire l'objet de travaux de réparation. La décision s'appuie alors sur un plan de priorisation qui tient compte des meilleurs intérêts de la collectivité. La compréhension de l'exploitation globale des systèmes d'infrastructures est essentielle et la municipalité doit posséder le plus d'informations possibles pour prendre la meilleure décision. Parmi les activités liées à la gestion judicieuse des activités et des réseaux, le guide national pour des infrastructures durables (2003d) mentionne :

- a. le fait de s'assurer que les activités d'exploitation et d'entretien sont adéquates;
- b. la collecte, le stockage et l'analyse de toutes les données recueillies sur les conditions des infrastructures d'égouts (structurales, de service, hydrauliques), pour permettre aux gestionnaires de prendre des décisions éclairées en rapport avec l'exploitation, l'entretien, la réhabilitation ou le remplacement des réseaux;
- c. la compréhension du type et de la condition du sol et de l'assise adjacente à l'égout, de même que de tout autre élément d'infrastructures enfoui ou en surface, qui pourrait avoir une incidence sur le réseau;
- d. la prise en compte de toutes les préoccupations de la collectivité, notamment les contraintes financières, le coût du cycle de vie du matériel, les questions sociales, les questions relatives à l'environnement local et la coordination des autres travaux exécutés sur des infrastructures en surface ou enfouies.

Ces activités fourniront aux gestionnaires les capacités qui leur permettront de décider s'il y a lieu de réparer un tronçon du réseau d'égout. Une fois la décision prise et avant de choisir la technique de réhabilitation ou de remplacement appropriée, le guide national pour des infrastructures durables (2003d) énumère les points suivants :

- a. les questions relatives aux travaux, notamment la sécurité, l'exploitabilité, le dérangement causé à l'unité de voisinage, le coût et l'efficacité;
- b. l'importance du marché, puisque les marchés dont le montant est peu élevé risquent d'entraîner l'élimination de certaines solutions technologiques à cause du coût de mobilisation du matériel et du personnel spécialisé;
- c. les conséquences des risques et les choix en matière d'atténuation liés au projet, en insistant sur les questions relatives à l'environnement et à la possibilité d'exécuter les travaux, et sur tout ce qui risque d'avoir un effet défavorable sur l'objectif du projet;
- d. la disponibilité locale des diverses techniques, puisque certaines d'entre elles ne sont pas encore accessibles dans certaines régions du Canada;
- e. la profondeur de l'égout risque de limiter le nombre des techniques qu'il sera possible d'utiliser pour sa réhabilitation ou son remplacement;
- f. la densité des branchements peut faire augmenter substantiellement le coût global des travaux liés à certaines des techniques les plus récentes quand il faut excaver pour reconnecter les branchements d'égout;
- g. les conditions propres à la chaussée (volumes de circulation, état de la surface et réparation nécessaire) peuvent être favorables ou défavorables à l'exécution de travaux en tranchée à ciel ouvert.

Après avoir examiné toutes ces questions, la règle de l'art présente le schéma de principe dont la municipalité pourra s'inspirer pour déterminer quelles sont les techniques de réhabilitation ou de remplacement de conduites d'égouts qu'elle pourra utiliser en fonction de la situation qui lui est propre.

Le document traite des techniques mentionnées ci-après :

- a. travaux en tranchée à ciel ouvert (c'est-à-dire pose d'un nouvel égout en tranchée);
- b. tubage;
- c. tubage par réduction du diamètre;
- d. tubage par pliage et formage;
- e. chemisage;
- f. éclatement de la conduite;
- g. forage horizontal;
- h. garnitures intérieures d'étanchéité de joints;
- i. revêtements intérieurs, en panneaux ou en tronçons;
- j. injection d'un coulis chimique;
- k. tunnelage complet ou microtunnelage;
- l. forage à la tarière;
- m. destruction de la conduite.

Le Guide national pour des infrastructures durables (2003d) fournit le schéma de principe de la figure 15 où sont données les grandes lignes du procédé qu'une municipalité doit suivre pour déterminer les techniques qu'il est possible d'utiliser dans une situation donnée. Le schéma définit d'abord le ou les problèmes qui sont à la source du besoin de réhabiliter ou de remplacer un tronçon du réseau d'égouts. Il aborde ensuite les problèmes possibles de réseau et les causes découlant du problème, deux choix disponibles et les diverses techniques de réhabilitation ou de remplacement. Le ou les problèmes de réseau et leurs causes ont déjà été traités ou sont suffisamment explicites. Les choix qui s'offrent à la municipalité portent surtout sur deux techniques envisageables : le remplacement ou la réhabilitation structurale, ou la réhabilitation non structurale ou semi structurale. Aussi bien les méthodes de pose sans tranchée que celles de pose en tranchée à ciel ouvert constituent une option en certains points du schéma.

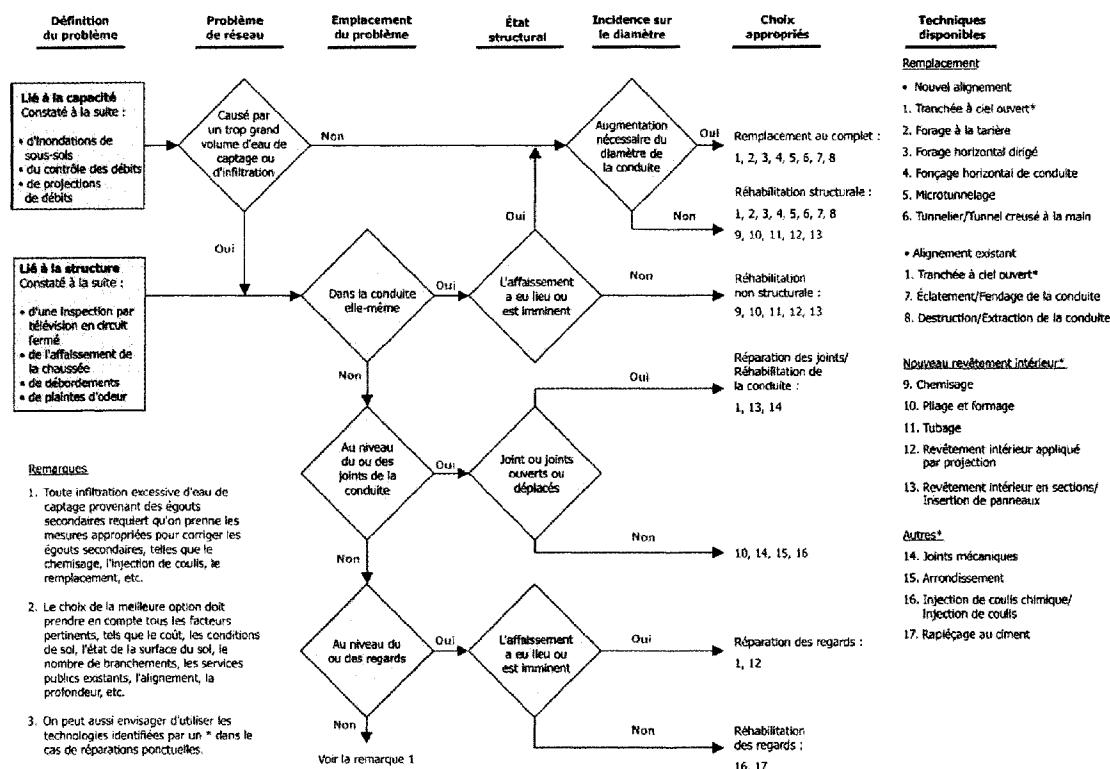


Figure 15 Détermination des techniques disponibles
(Tirée du Guide national pour des infrastructures durables, 2003d)

2.4 Système de gestion des autres réseaux d'infrastructures

Les autres infrastructures situées dans l'emprise de la voie publique sont les ouvrages d'art et les services d'utilités publiques alimentant leurs abonnés en énergie et leur fournissant des possibilités de communication.

Les services d'utilités publiques sont livrés par deux réseaux distincts : un réseau de transport et un réseau de distribution. Les réseaux d'énergie comprennent l'alimentation en électricité et en gaz tandis que les réseaux de communication incluent les services téléphoniques et de câblodistribution. La gestion de ces réseaux est confiée à des entreprises non gouvernementales; au Québec, les principaux acteurs sont Hydro Québec et Gaz Métro pour les réseaux d'énergie, et Bell Canada, Vidéotron et Cogeco pour les

réseaux de communication. Les gestionnaires et ingénieurs des services municipaux de travaux publics doivent coordonner les activités se déroulant sur l'emprise de la voie publique avec ces différents intervenants. Les problèmes rencontrés par l'ingénieur municipal se situent plus souvent au niveau de la gestion qu'au niveau de l'opération de ces systèmes.

Le système de gestion peut aussi contenir les informations provenant des ouvrages d'art. Ces données, répertoriées par Bernard et al. (2000) sont :

- a. pont viaduc :
 - type;
 - structure sous-jacente;
 - nombre de travées;
 - portée;
 - matériau;
 - hauteur libre;
 - limite de charge;
 - date de construction;
- b. ponceau :
 - type;
 - forme;
 - matériau;
 - dimension;
 - longueur;
 - couverture;
 - pente;
- c. perré :
 - protection du fossé;
 - date de construction;

d. mur de soutènement :

- type;
- matériau;
- hauteur du mur;
- longueur;
- date de construction.

Ces données pourront éventuellement être intégrées au système de décision, tout comme celles provenant des services d'utilités publiques.

2.5 Intégration des systèmes de gestion des infrastructures civiles

Les concepts de gestion des chaussées et de gestion des réseaux d'égouts et d'aqueduc sont intégrés dans un système d'information géographique. Pris individuellement, ces trois concepts sont largement documentés. Cette revue de la littérature contient plusieurs références publiées sous la forme d'articles de périodiques, de volumes ou de pages web.

Bruxelle (1999) a réalisé un projet d'application, dans le cadre de la maîtrise en génie de la construction à l'École de technologie supérieure (ÉTS), intitulé «Définition d'un système intégré de gestion des infrastructures civiles (SIGIC)». Ce projet a permis de présenter une allocution au 64^e congrès de l'ACFAS sur les «Systèmes intégrés pour la gestion des infrastructures urbaines» par Bruxelles, Boudreau et Assaf (1996) et de rédiger un article publié dans la revue Routes et Transports de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR), «Une approche intégrée et graphique pour la réhabilitation des chaussées» par Bruxelles, Boudreau et Assaf (1997).

Quelle que soit l'infrastructure concernée, le mode de gestion est similaire. Les utilisateurs du système de gestion, des ingénieurs ou des gestionnaires, interviennent selon leur implication, soit au niveau du projet, soit au niveau du réseau. En gestion des

infrastructures civiles, il existe deux paliers opérationnels : le premier appelé «niveau réseau» est attribuable à la gestion de l'ensemble tandis que le second nommé «niveau projet» traite de la gestion des projets. La gestion au niveau réseau établit les priorités en entretien et en réhabilitation selon les budgets, et élabore les calendriers des travaux. Au niveau projet, il faut mettre en œuvre les décisions prises au niveau réseau, c'est-à-dire réaliser la conception, la construction, l'entretien et la réhabilitation.

Les principales composantes d'un système de gestion des infrastructures sont déduites du système de gestion des chaussées décrit par Haas et al. (1994) et montrées à la figure 16. Chaque palier de décision est important. Un système de gestion des infrastructures doit absolument reconnaître ces paliers, permettre que les personnes impliquées les identifient et s'assurer qu'ils correspondent à la structure administrative de l'organisme en cause. En fin de compte, c'est le public qui est le bénéficiaire du système de gestion des réseaux d'infrastructures.

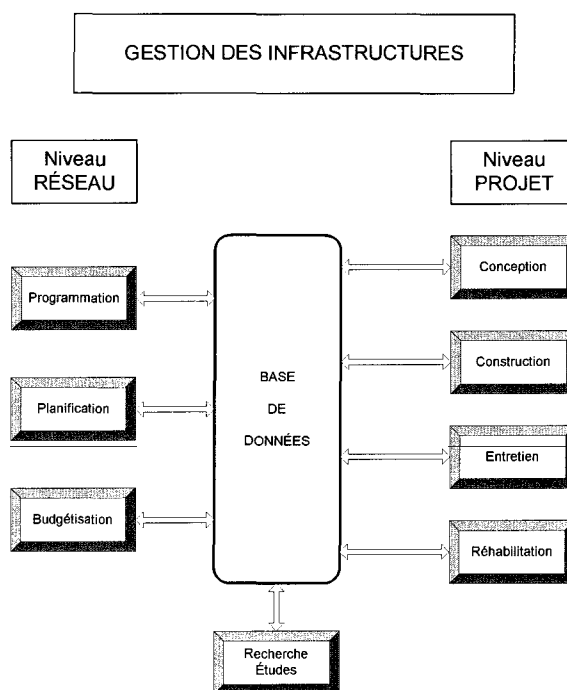


Figure 16 Principales composantes d'un système de gestion
(Adaptée de Haas et al., 1994)

Harper et Majidzadeh (1993) présentent un système intégré de gestion des chaussées et des ponts. Ce système utilise soit une fonction objectif de minimisation des coûts, soit une de maximisation des bénéfices. Une pondération sur chaque élément des sous-systèmes est appliquée de façon multiplicative.

Shewen et Kovacs (1995) développent le concept de gestion intégrée des actifs d'infrastructures appelé «*Integrated Infrastructure Asset Management (IIAM)*» implanté à Kitchener en Ontario. Les objectifs poursuivis sont les suivants :

- a. maintenir un inventaire à jour des données historiques sur les différentes infrastructures;
- b. intégrer le processus de gestion de l'entretien dans la gestion opérationnelle;
- c. mettre en œuvre le processus de gestion du temps de travail et de l'utilisation des ressources disponibles;
- d. fournir la possibilité de mesurer et analyser l'état et la performance de chaque infrastructure;
- e. fournir un mécanisme pour l'élaboration de programmes de priorisation des interventions d'entretien et de réhabilitation et l'analyse des budgets;
- f. améliorer l'efficacité de l'organisation en fournissant un meilleur service avec le même niveau de ressources.

Tous les systèmes de gestion possèdent des éléments communs tels un processus d'acquisition et de mise à jour des données, une base de données, des outils d'analyse, des éléments d'informations spécifiques, un système d'information géographique, une interface graphique, des modèles d'analyse coût/bénéfice, des modèles d'optimisation, etc. Hudson et al. (1997) représentent, à la figure 17, les interrelations entre les utilisateurs, les logiciels et la base de données.

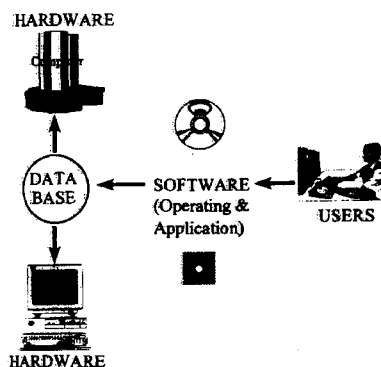


Figure 17 Interrelations entre utilisateurs, logiciels et base de données
(Tirée de Hudson et al., 1997)

Bégin (1997) soumet le développement et la mise en œuvre d'un système de gestion intégrée des infrastructures appelé «*Integrated Infrastructure Management System (IIMS)*» pour la ville de Nepean en Ontario. Le système IIMS développé par ITX Stanley remplit deux fonctions qui consistent à :

- fournir et maintenir à jour les données d'inventaire sur les réseaux d'infrastructures (égouts et chaussées);
- fournir un outil de gestion pour identifier les sections à réhabiliter et programmer les activités d'entretien.

La figure 18 illustre les données d'inventaire affichées dans l'application IIMS.

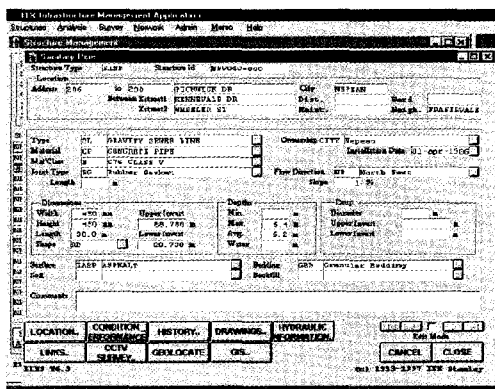


Figure 18 Page-écran du logiciel IIMS
(Tirée de Bégin, 1997)

Tecsult (1999) rappelle que «la mise en œuvre d'un système intégré d'aide à la décision (SIAD) exige la constitution d'un inventaire des infrastructures précisant les caractéristiques des réseaux, l'intégration à cet inventaire des données sur la condition, la sollicitation, l'entretien et la construction».

Ganeshan et al. (2001) décrivent le projet de gestion de l'entretien des infrastructures appelé «*Citiwork*» et développé par le département des travaux publics des installations militaires de Fort Gordon à Augusta en Georgie. La gestion des infrastructures requiert la coordination de nombreux intervenants et l'intégration de l'information à travers la gamme variée de leurs équipements. Le projet *Citywork* englobe la coordination, la collaboration, et l'intégration du processus de gestion de l'entretien dans le contexte d'une saine organisation. Le projet a réuni une équipe interdisciplinaire composée d'ingénieurs et de sociologues de l'université Southern California à Los Angeles, de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, et du laboratoire de recherche de l'armée américaine *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories* à Champaign en Illinois.

Un prototype de *Citywork* a été implanté en novembre 1998 aux installations militaires de Fort Gordon en Georgie. Au cours de ce projet, plusieurs problèmes sont survenus concernant notamment l'intégration d'informations existantes provenant de sources disparates, la nécessité de développer des interfaces pour soutenir la gestion de collaboration et de conflit, et l'adaptation du déroulement des opérations en réaction aux changements d'organisation. Bien qu'il y ait suffisamment de preuves pour conclure que les environnements de collaboration de travail sont nécessaires, des investissements significatifs en termes de temps, d'efforts et des ressources sont requis. La réingénierie du processus et la formation des utilisateurs exigeront une planification soignée et des ressources additionnelles importantes.

La gestion des infrastructures et la gestion des services d'utilités publiques se chevauchent dans de nombreuses applications allant des bâtiments et des hôpitaux jusqu'aux campus universitaires, aux installations militaires et aux villes. Les installations militaires sont semblables à de petites villes avec des populations de 15 000 personnes et souvent même plus. La gestion de l'entretien implique le travail de collaboration de plusieurs intervenants dans l'organisation c'est-à-dire des administrateurs, des ingénieurs, des estimateurs et des spécialistes en environnement; cette gestion doit également être coordonnée avec les interventions précédemment programmées ainsi que les activités continues d'entretien situées au même endroit notamment en empêchant de creuser un fossé pour une intervention de service sur une route récemment refaite.

Mathieu et al. (2000) ont réalisé un projet d'expérimentation, impliquant la participation de dix villes du Québec, dans le but de contribuer à l'essor de la gestion intégrée des infrastructures urbaines, et à faciliter l'implantation d'un système intégré d'aide à la décision (SIAD). Les différentes phases du projet supposent :

- a. l'analyse de la situation et bilan des modes de gestion dans les villes;
- b. l'élaboration d'une structure normalisée des données;
- c. la définition globale du système intégré d'aide à la décision (modules et fonctions);
- d. le développement d'un prototype pour l'expérimentation de la structure normalisée;
- e. la diffusion du projet et des résultats;
- f. le sommaire exécutif et rapport synthèse du projet.

La figure 19 fait ressortir les caractéristiques du SIAD en regard de la fonctionnalité des modules, les interactions entre ceux-ci, et les principales informations servant d'intrants et d'extrants.

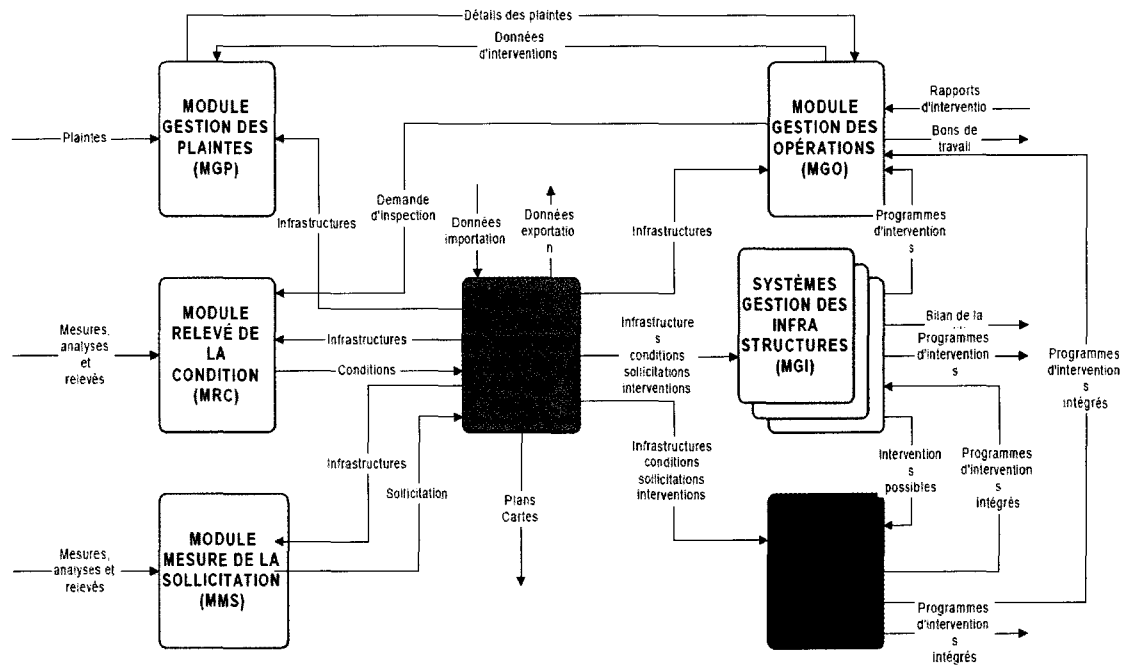


Figure 19 Définition globale du SIAD
(Tirée de Mathieu et al., 2000)

Le développement d'un prototype du SIAD a permis d'expérimenter la structure normalisée et quelques-unes des fonctionnalités du module intégrateur. Le prototype a permis de bien cibler les enjeux de l'acquisition, de la conversion et de l'intégration des données provenant de plusieurs sources et formats. Il a aussi fourni l'occasion de développer les concepts inhérents au module intégrateur afin de mieux cerner les interventions sur les segments de chacun des réseaux.

Landry (2000) constate que la masse d'informations nécessaires pour évaluer chaque réseau d'un tronçon et pour comparer chaque tronçon d'une ville entre eux, est impressionnante. Actuellement, il n'y a que la chaussée qui est priorisée. Avant de poser le choix final, l'état des conduites souterraines n'est vérifié que dans les sections jugées prioritaires en surface. De cette façon, certaines conduites déficientes ne seront jamais repérées. Landry a développé un logiciel d'inventaire et d'aide à la décision, connu sous

le nom d'INFRALOGIK, pour gérer toute cette information. INFRALOGIK répond aux attentes des petites municipalités. Landry (2001) résume le fonctionnement du SIAD par le schéma montré à la figure 20.

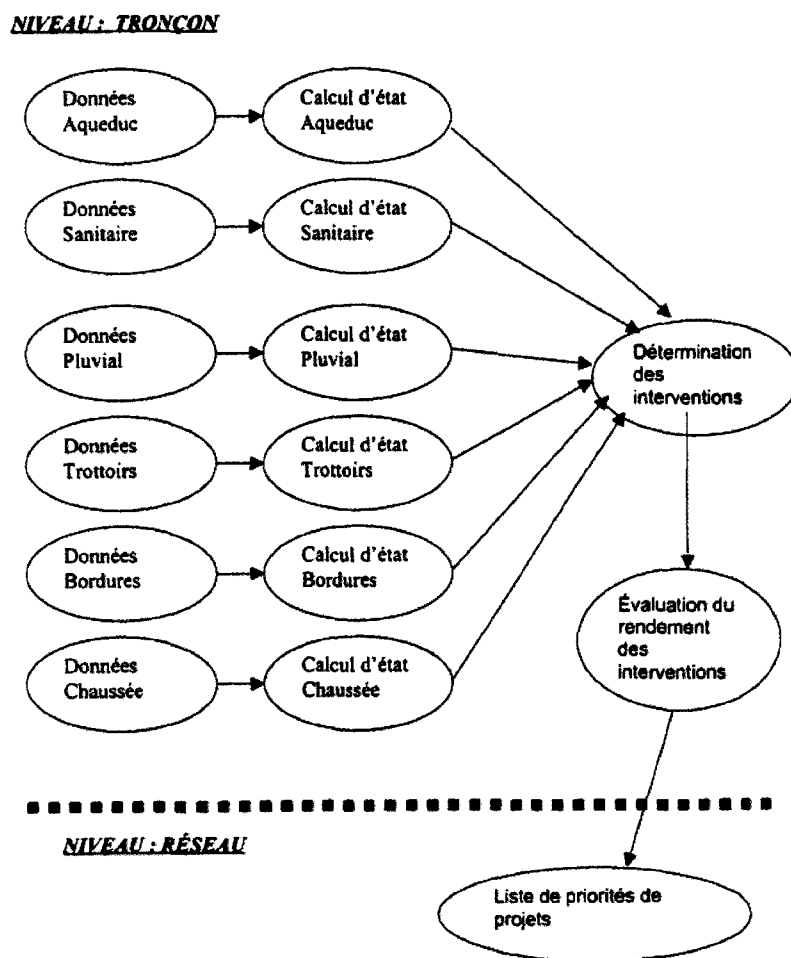


Figure 20 Schéma de fonctionnement d'INFRALOGIK
(Tirée de Landry, 2001)

L'approche d'INFRALOGIK est la suivante :

- a. tout débute par le calcul de l'état de chaque composante constituant un tronçon;
- b. ensuite nous calculons l'état global du tronçon et nous recherchons des anomalies;

- c. ces données nous permettent de choisir une ou des interventions pour chaque tronçon;
- d. INFRALOGIK calcule alors un rendement pour chaque tronçon;
- e. à l'aide des ces rendements, une liste de priorités de projets est établie.

INFRALOGIK procure l'avantage de colliger, répertorier et structurer les données concernant les infrastructures municipales. Ces données servent à calculer l'état de chaque infrastructure afin de déterminer les interventions et en évaluer le rendement, et établir une liste de priorités. Le rendement est calculé en fonction du nombre d'usagers heureux, de l'augmentation de la cote qualité du tronçon et de l'investissement nécessaire. Les interventions à privilégier se retrouvent sur les tronçons qui possèdent le meilleur rendement tel que calculé par le logiciel. Cette méthode ne contient aucune formule de prédiction du comportement des infrastructures ni méthode d'optimisation. C'est essentiellement un système informatisé de gestion globale des infrastructures urbaines, comme le titre du projet le mentionne.

MIMS (2005) met à la disposition des municipalités albertaines, qui sont de plus en plus conscientes de l'importance d'une bonne évaluation de leurs infrastructures et de leurs conditions pour la gestion efficace de leurs actifs, le système intégré de gestion municipale *Municipal Infrastructure Management System* (MIMS). L'utilitaire MIMS contient des outils qui facilitent la cueillette des données d'infrastructures pour les municipalités. Initialement développé par des représentants du milieu municipal, MIMS évolue continuellement et est amélioré par la rétroaction des utilisateurs. Les modules de MIMS sont une solution robuste et flexible pour aider les petites et moyennes municipalités d'Alberta. MIMS fournit les outils qui soutiennent le processus de gestion des infrastructures, y compris la gestion des actifs, la gestion financière, etc. Les composantes de base du MIMS incluent des chaussées et leurs structures relatives, le traitement de l'eau potable et les réseaux de distribution, la collecte des eaux usées

sanitaires et leur système de traitement, la gestion du réseau d'égout pluvial, la gestion des déchets solides et les bâtiments municipaux.

En Alberta, des milliards de dollars sont annuellement dépensés pour la gestion des infrastructures. Quelques échecs majeurs ont eu pour effet de concentrer les efforts et ainsi porter une attention particulière à la nécessité de comprendre et contrôler les infrastructures. Les divers organismes ont besoin de lignes directrices pour contrôler tous les secteurs à risque des infrastructures et pour fournir les services à la population, au plus bas coût possible, pendant tout le cycle de vie. Actuellement, les administrations possèdent peu d'outils pour les guider dans le processus décisionnel du quand et du comment maintenir, réparer ou remplacer leurs actifs. C'est là que MIMS intervient car il est un ensemble intégré d'outils spécifiques de système d'information géographique et de base de données d'infrastructure comprenant une visionneuse de carte pour les données spatiales et le dessin assisté par ordinateur. La visionneuse spatiale affichée à la figure 21 fournit une représentation graphique des actifs de l'infrastructure municipale.

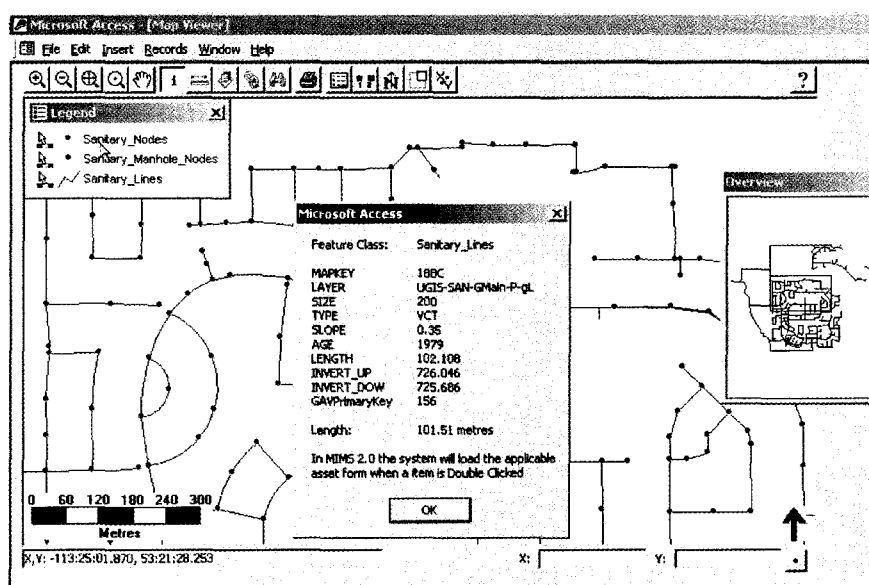


Figure 21 Page-écran de la visionneuse spatiale de MIMS
(Tirée de MIMS, 2005)

Le MIMS est également une trousse d'outils de gestion d'infrastructures, facile à utiliser, pouvant rassembler les données dans un endroit centralisé. Le MIMS permet de répondre à trois questions :

- Qu'est-ce que je possède ? (voir figure 22)
- Quel est son état ? (voir figure 23)
- Quel type d'entretien pratiquer ? (voir figure 24)

The screenshot shows the 'Water Network' software window. It has tabs for 'Lines', 'Features', 'Facilities', and 'Equipment'. The 'Pressure Mains' tab is selected. The form contains the following fields:

- Asset ID: 1297
- Reference: Testing 3
- Connection 1: (empty)
- Connection 2: (empty)
- Function: Distribution
- Recorded Length: 50.00 m
- Pipe Material: PVC
- Pipe Class: (empty)
- Diameter: 500 mm
- Depth of Bury: (empty)
- Backfill: (empty)
- Bedding: (empty)
- Pipe Joint Length: (empty)
- Lining: (empty)
- Length: (empty)
- Install Year: 1901
- Lifecycle Status: Active

At the bottom, there are buttons: 'Add Asset', 'Save Asset', 'Delete Asset', navigation arrows, a 'Condition' button, 'Events', 'Locate', and 'Close'.

Figure 22 Page-écran de l'inventaire des infrastructures
(Tirée de MIMS, 2005)

The screenshot shows the 'Asset Condition' software window. It displays the condition of asset 1297. The form contains the following fields:

- Asset ID: 1297
- Condition Category: <ALL>
- Date: 1/16/2002
- Category: structure
- Condition Rating: 3 (out of 5)
- Performed By: Joe
- Description: Sound Physical Condition. Asset likely to perform adequately without major work for 25 years

At the bottom, there are buttons: 'Record: 14', navigation arrows, and '1 of 1 (Filtered)'.

Figure 23 Page-écran de l'état des infrastructures
(Tirée de MIMS, 2005)

5. Inspections, Testing, Repair Events					
Asset ID		Event Category			
Date	Type	Remarks, Notes			
6/11/2002	CCTV	Completed and file attached.		Document	Browse...
Performed By	Test			Image	Image Reference
				Document	Browse...
Performed By				Image	Image Reference
					Browse...

Record: 1 of 1 (Filtered)

Figure 24 Page-écran des interventions sur les infrastructures
(Tirée de MIMS, 2005)

En résumé, le projet de MIMS permet d'effectuer les opérations suivantes :

- identifier les directives des conditions d'utilisation et les critères de performance pour la gestion municipale des infrastructures;
- revoir les outils de gestion existants, y compris les systèmes de gestion provinciaux et municipaux, et déterminer quelles modifications pourraient être exigées pour les rendre appropriés pour une plus large utilisation comprenant une composante pour faciliter la prise de décision;
- confirmer l'applicabilité du système provincial ou municipal existant, faire les modifications requises, acquérir le matériel nécessaire et logiciel pour entreprendre le projet;
- développer les programmes de formation pour les utilisateurs et les décideurs.

Le système MIMS offre l'avantage indéniable de standardiser à l'échelle de la province de l'Alberta une procédure de saisie et de sauvegarde des données sur les actifs municipaux. Il maintient à jour la base de données et fournit aux utilisateurs une page-écran simple affichant rapidement l'état de chaque actif et une autre listant les historiques d'interventions et d'inspections. Par ailleurs, ce système possède les mêmes lacunes que INFRALOGIK en n'offrant ni modélisation, ni optimisation.

Pelletier et Lalonde (2000) présentent l'expérience de la Ville de Sainte-Foy et ses collaborateurs qui ont expérimenté, dans un contexte réel, le premier système intégré d'aide à la décision (SIAD) en infrastructures urbaines au Québec; de nos jours, ce système est connu sous le nom de Harfan. Le module d'intégration permet de rassembler les résultats obtenus pour chacun des réseaux afin de mettre en évidence l'intervention optimale à effectuer en tenant compte des différentes règles d'intégration. Ce module n'a pas pour objectif d'identifier des solutions pour corriger des problèmes d'ordre fonctionnel, mais de combiner les choix de solution, pour chacun des réseaux, afin de former des scénarios globaux d'intervention. Une fois la classe d'intervention déterminée pour chacun des réseaux, l'algorithme détermine la classe d'intervention intégrée optimisée selon des règles basées sur des paramètres de conditions d'intervention prédéterminés et raffinés par une analyse des contraintes spatiales.

Harfan (2005) développe un logiciel intégré de gestion des infrastructures qui évalue l'état des réseaux et permet de planifier, de façon intégrée, où, quand, comment et combien investir en travaux de réhabilitation et remplacement pour la prochaine année ou les 5, 10, 20 ou 50 prochaines années. Harfan utilise des données descriptives des infrastructures et de leur état pour effectuer des tâches telles que la gestion des requêtes, la gestion des opérations, la gestion de l'inventaire des infrastructures, l'évaluation de l'état et du cycle de vie ainsi que la production des plans directeurs. Ce logiciel intégré comprend les modules suivants :

- a. Harfan iems (*Integrated Engineering Management System*) établit une planification stratégique des programmes de réfection de réseaux d'infrastructures, et ce, en tenant compte des interactions techniques et budgétaires;
- b. Harfan ems (*Engineering Management System*) produit un bilan individuel de l'état des réseaux techniques, afin d'optimiser la planification des travaux de réfection;

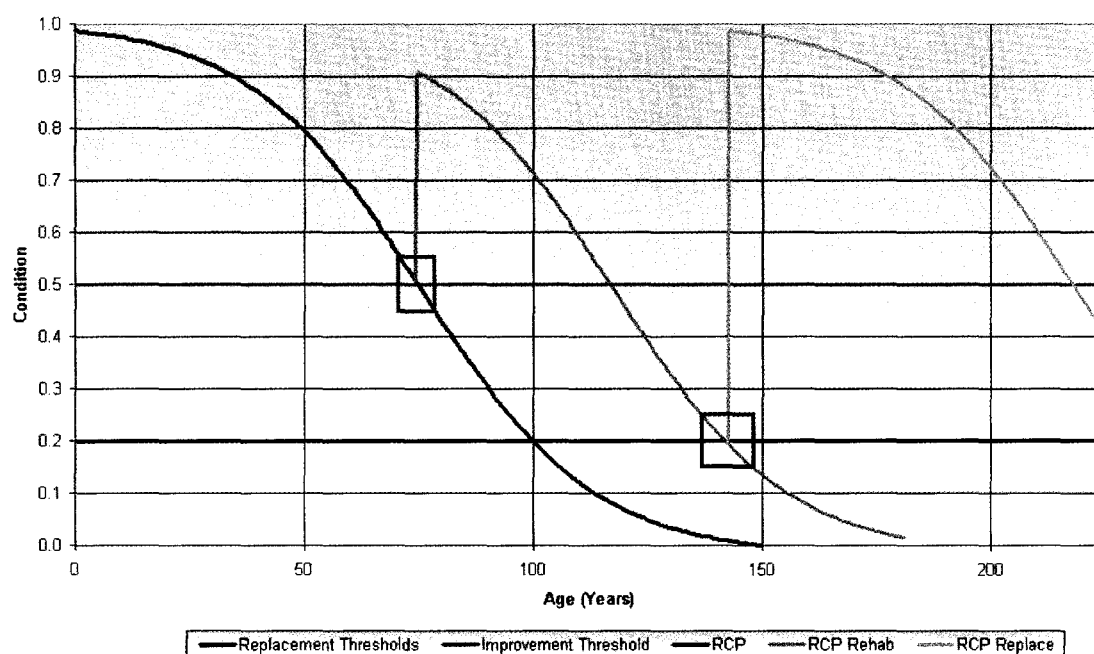
- c. Harfan tms (*Task Management System*) permet d'améliorer la gestion des activités d'entretien;
- d. Harfan ams (*Asset Management System*) est un catalogue électronique qui sert à la gestion et au stockage des différentes données;
- e. Harfan rms (*Request Management System*) permet d'améliorer la gestion des échanges en procurant à tous les départements de l'organisation une interface unique de saisie et de suivi des requêtes.

Heltzel et al. (2004) ont présenté les avantages de la gestion des actifs pour la ville de Newark, Ohio en utilisant des systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) pour des systèmes de collecte des eaux usées et de distribution d'eau potable. Des courbes de détérioration basées sur les données actuellement disponibles (âge des conduites, matériau, historique des bris, etc.) ont été analysées en utilisant les systèmes interactifs d'aide à la décision de Harfan. Un plan de réhabilitation et de reconstruction a été développé à partir de cette analyse. Une approche en trois étapes a été employée pour évaluer les investissements de capitaux pour les réseaux d'aqueduc et d'égouts dans un secteur pilote de la ville de Newark :

- a. prise de décision améliorée;
- b. collecte des données rentable;
- c. prise de décision intégrée.

Le modèle de Harfan utilise des courbes de détérioration pour chaque famille distincte d'actifs caractérisée par leur durée de vie. Le développement de ces courbes est basé sur les matériaux, le diamètre, la profondeur, l'état du sol, l'historique des bris, la pression et d'autres caractéristiques selon la disponibilité de ces données. Les courbes de détérioration sont employées pour établir un modèle prévisionnel qui évaluera le taux de détérioration d'un segment de réseau dans le temps. Ces courbes aident les gestionnaires municipaux à déterminer les moments les plus propices pour différentes améliorations, telles l'entretien préventif, la réhabilitation ou la reconstruction. Dans l'exemple du

graphique 12, la ligne verte représente la condition à laquelle la réhabilitation est appropriée et la ligne rouge quand la reconstruction devrait se produire.



Graphique 12 Courbes de détérioration du modèle Harfan
(Tiré de Heltzel et al., 2004)

Le logiciel Harfan est de plus en plus répandu au Québec et, à l'instar de MIMS et INFRALOGIK, il fournit une structure robuste pour la sauvegarde et la mise à jour des données. Il produit un bilan de l'état des réseaux et peut modéliser le comportement des infrastructures et tracer ses courbes. Le modèle d'intégration de Harfan analyse les informations provenant des différentes infrastructures et tient compte de leur interaction pour établir des programmes d'intervention; on ne peut pas parler d'optimisation proprement dite.

Fortin et al. (2004) soumettent une vaste étude de la ville de Longueuil portant sur les aspects géomatiques des chaussées et des réseaux souterrains, ainsi que sur l'intégration des résultats. Une géobase servant de référence commune à un groupe d'utilisateurs, est

définie en fonction des besoins particuliers de l'organisation; elle constitue l'assise nécessaire à la mise en place d'un système d'information géographique.

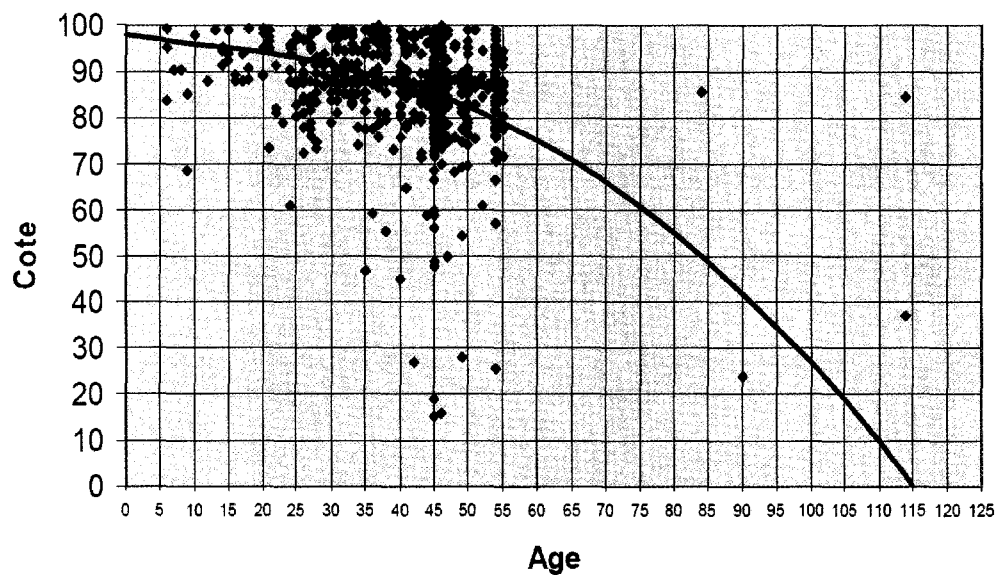
Au niveau de la chaussée, les informations recueillies comprennent les données descriptives et l'état de la chaussée qui est basé sur l'évaluation de la condition visuelle de la surface (indice PCI), le confort au roulement (valeur de l'IRI) et la capacité structurale (indice de portance). Ces mesures ont permis de calculer un indice global de condition (OCI). Une analyse multicritère a servi à développer un indice de priorité d'intervention (NPR). Cette analyse a pondéré les paramètres suivants : indice de condition de la surface OCI (35%), trafic DJMA (25%), vocation (15%), classification fonctionnelle (5%) et orientations stratégiques (20%).

Pour les réseaux souterrains, les informations recueillies portent sur la numérisation des réseaux d'aqueduc et d'égouts, la saisie des attributs de base, l'inspection visuelle de regards, des collecteurs d'égouts et des chambres d'aqueduc, l'inspection des conduites d'égouts par caméra à téléobjectif, la manipulation hydraulique de vannes d'aqueduc et des vannes secondaires, l'inspection des bornes d'incendie, la recherche de fuites et l'analyse des vidéos des inspections par caméra à téléobjectif.

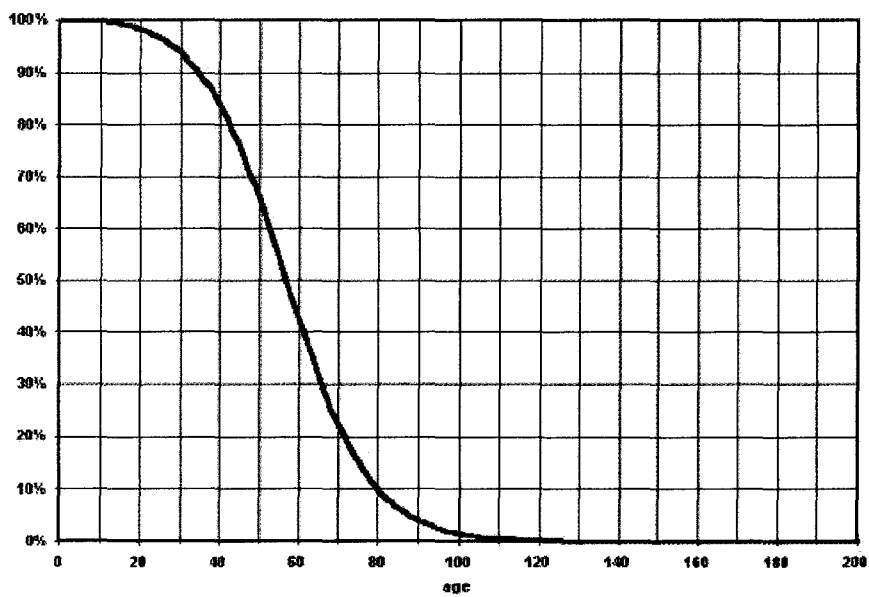
L'analyse des données a permis de créer des familles selon des regroupements de conduites d'égouts ou d'aqueduc ayant des caractéristiques ou comportements similaires. Des courbes de détérioration pour les égouts sont créées et montrées au graphique 13 et au graphique 14 pour l'aqueduc.

Connaissant l'état actuel des réseaux souterrains, il a été possible de générer une liste de projets à réaliser à court terme et d'établir un plan stratégique d'intervention à moyen et à long terme.

Courbe de dégradation - Famille 122 - Combiné Béton Moyen



Graphique 13 Courbe de détérioration pour l'égout
(Tiré de Fortin et al., 2004)



Graphique 14 Courbe de détérioration pour l'aqueduc
(Tiré de Fortin et al., 2004)

2.6 Modèles d'optimisation appliqués aux infrastructures

Deux approches différentes mais complémentaires peuvent être appliquées afin d'assister le gestionnaire dans la prise de décision. La première consiste à choisir les interventions sur les infrastructures en se basant sur les techniques d'optimisation classiques ou heuristiques; la seconde approche utilise les nouvelles technologies de l'information et des communications pour créer des liens et extraire des connaissances des bases de données. Selon la première approche, la solution optimale est obtenue en appliquant une méthode de recherche opérationnelle dont les plus classiques sont :

- a. la programmation linéaire par la méthode du simplexe;
- b. la programmation en nombre entier;
- c. la théorie des graphes.

Ces techniques sont lourdes et nécessitent une puissance de calcul qui n'est malheureusement pas encore couramment disponible. Pour contrer cette difficulté, les gestionnaires préfèrent appliquer des méthodes heuristiques qui fournissent une «bonne» solution sans être nécessairement la solution optimale. Les algorithmes génétiques, que plusieurs auteurs dont Vallée et Yildizoglu (2001) et Locher (2005) qualifient d'heuristiques, proviennent de l'intelligence artificielle. Goldberg (1989) les différencie d'une optimisation classique, les algorithmes génétiques recherchent de quatre manières différentes :

- a. ils fonctionnent avec un codage de l'ensemble des paramètres et non les paramètres eux-mêmes;
- b. ils recherchent à partir d'une population des points et non pas un seul point;
- c. ils utilisent l'information de la fonction objectif et non pas une base de connaissance auxiliaire;
- d. ils utilisent des règles de transition probabilistes et non des règles déterministes.

Fwa et al. (1998) rapportent que certaines des fonctions objectifs énumérées ci-dessous sont employées par diverses agences routières :

- a. minimisation des coûts d'entretien;
- b. maximisation de l'efficacité de l'entretien;
- c. maximisation de l'utilisation des budgets assignés;
- d. maximisation de l'utilisation de la main-d'œuvre disponible;
- e. maximisation de l'utilisation des équipements disponibles;
- f. maximisation de l'état du réseau global;
- g. minimisation de la main-d'œuvre requise;
- h. minimisation de l'équipement requis;
- i. minimisation de la fluctuation des dépenses.

Les calculs de l'efficience sont optimisés pour différentes sections. L'optimisation utilisée dans le système de gestion des chaussées du *Mn/DOT* est basée sur des calculs de rentabilité. Bien que ce ne soit pas une véritable méthode d'optimisation, les résultats ne sont pas significativement différents. L'analyse peut être exécutée dans l'un ou l'autre des modes suivants :

- a. la maximisation de l'efficience, où les contraintes sont des limites du budget annuel pour chaque année de la période d'analyse;
- b. la minimisation des coûts où les contraintes sont soit la performance minimum soit le pourcentage maximum de kilométrages effectués au-dessous du seuil acceptable.

Gendreau et Duclos (1990) ont développé un cadre de base pour l'optimisation de la prise de décision dans la gestion des chaussées au niveau réseau, en utilisant le processus de décision de Markov; celui-ci a été appliqué la première fois au réseau routier de l'État de l'Arizona en 1982. Une caractéristique intéressante de cette modélisation est qu'elle peut être reformulée en un programme linéaire.

Mbwana et Turnquist (1996) présentent un exemple d'optimisation de la prise de décision quant aux chaussées. En modélisant la performance de la chaussée avec une chaîne de Markov, la matrice de transition est établie à partir des données historiques du comportement de cette infrastructure. Les auteurs développent un modèle de décision de Markov (MDP) divisé en deux parties, à long terme et à court terme, liées pour fournir une stratégie globale de gestion des chaussées. Le modèle à long terme détermine la stratégie optimale d'entretien et de réhabilitation des chaussées pour maintenir le réseau en fonction des budgets prévus. Quant au modèle à court terme, il détermine la stratégie optimale pour passer d'un état initial donné du réseau à un état optimal et durable à long terme.

L'état de la chaussée est subdivisé en S intervalles représentant chacun son score. Le nombre d'interventions possibles, traitements ou décisions, est limité à A . Une période est définie comme un intervalle de temps, généralement une année. Il est supposé que les actions sont posées au début de la période et que les coûts sont également encourus au début de la période où l'action est exécutée. Les probabilités de transition qui déterminent la performance de la chaussée sont connues a priori et définies comme la probabilité qu'une section de chaussée dans un état s à une période y changera en un état k à la période subséquente si l'action a est appliquée. Une politique d'entretien R constitue une stratégie qui spécifie une action pour chaque état de la chaussée; ainsi, R_{is}^a définit une politique qui conditionne une action a à une section de chaussée i si elle est dans un état s . Une fonction de coût est définie comme la valeur présente des coûts prévus payés par l'administration et ceux payés par les usagers pour la section de chaussée i dans l'état s , si la politique R est utilisée pendant les n prochaines périodes, n étant l'horizon de planification. Les coûts incluent autant ceux payés par l'administration (*Agency Cost*) AC que ceux aux usagers (*User Cost*) UC .

La fonction objectif permet de minimiser soit les coûts payés uniquement par l'administration, soit seulement ceux aux usagers en tenant compte d'un facteur

d'équivalence d'intérêt composé α et d'un facteur d'accroissement de la circulation β . Résolues séparément, ces deux fonctions conduiront à deux politiques différentes. Il est possible de les combiner pour produire une fonction globale en mettant l'emphasis sur une composante des coûts et en forçant l'autre à zéro. De plus, le facteur β d'accroissement de la circulation peut tenir compte de la mixité du trafic, c'est-à-dire de proportions de véhicules légers, de camions et de poids lourds. Trois méthodes permettent de résoudre ce problème pour déterminer les politiques optimales d'entretien et réhabilitation à long terme soit l'itération des politiques, l'approximation successive et la conversion en un problème équivalent de programmation linéaire LP.

Le problème primal consiste à maximiser la valeur des chaussées. L'interprétation est meilleure et plus significative en résolvant le problème dual qui consiste à minimiser les coûts. D'autres contraintes peuvent être ajoutées dans la formulation du problème dual. Bien que la fonction à optimiser soit basée sur le processus de décision de Markov MDP, cette formulation est rigoureuse et la solution optimale est déterministe pour chaque section de chaussée. En ajoutant d'autres contraintes, on change la nature du MDP et la solution peut être stochastique. La plus importante contrainte à ajouter concerne les budgets.

Des restrictions supplémentaires liées à la performance de certains tronçons de chaussées peuvent être imposées, notamment sur des sections où le volume de circulation est très faible. L'objectif principal est de développer un modèle à long terme d'un système de gestion des chaussées qui fournira une politique spécifique à chaque section en considérant autant les coûts payés par l'administration que ceux imputés aux usagers. Le modèle est résumé comme suit :

Minimiser

$$\sum_i \sum_s \sum_a (AC_{is}^a + UC_{is}) x_{is}^a \quad (2.5)$$

sujet à

$$\sum_a x_{is}^a - \alpha\beta \sum_k \sum_a p_{iks}^a x_{ik}^a \geq \rho_{is} \quad \forall i, s \quad (2.6)$$

$$(1-\alpha) \sum_i \sum_s \sum_a x_{is}^a AC_{is}^a \leq B \quad (2.7)$$

avec :

- x_{is}^a variable de décision associée à la politique d'entretien
- AC_{is}^a coûts à l'administration routière dus à l'action a sur la section i quand elle est dans l'état s
- UC_{is} coûts aux usagers pour l'utilisation de la section i quand elle est dans l'état s
- p_{iks}^a probabilité qu'une section i changera de l'état k à l'état s en 1 an si l'action a est prise
- B budget annuel équilibré sur une longue période
- α facteur d'accroissement de l'intérêt composé sur une période
- β taux d'accroissement annuel du trafic

Dans le modèle posé par Mbwana et Turnquist (1996), il y a $I * S * A$ variables soumises à $I * S + 1$ contraintes avec I nombre de liens, S nombre d'états et A nombre d'actions possibles. Le problème s'avère vite lourd à résoudre, mais la variable de décision x_{is}^a n'est pas affectée par le nombre de catégories de chaussées telles le type de résistance, l'âge et le trafic. Ainsi, il est possible de définir plusieurs catégories de chaussées sans affecter la taille du problème.

Outre le problème de Mbwana et Turnquist (1996), de nombreuses formulations du modèle d'optimisation sont disponibles dans la littérature. Il s'agit d'un problème de maximisation de la valeur totale de l'efficacité. Ces formulations ont été publiées, entre autres, par l'équipe du professeur Haas soit Li et al. (1996a), (1998), (2001) et Nunoo et al. (2002). Les auteurs énoncent la fonction objectif suivante :

Maximiser

$$\sum_{s=1}^N \left\{ \sum_{m=1}^M X_{stm} \times \left[\frac{(PCS_{stm} - A_{st}) \times L_{st} \times AADT_{st} \times D_{st}}{L_{st} \times W_{st} \times C_{stm} \times (1+R)^{-t}} \right] \right\} \quad \forall t \quad (2.8)$$

sujet à :

$$\sum_{m=1}^M X_{stm} = 1 \quad \forall s, t \quad (2.9)$$

$$X_{stm} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M X_{stm} \times (L_{st} \times W_{st} \times C_{stm}) \leq B_t \quad \text{pour } t = 1, 2, \dots, T \quad (2.11)$$

$$PCS_{s(t+1)} = PCS_{st} + (X_{stm} \Delta PCS_m) \leq PCS_{\max} \quad \forall s, t, m \quad (2.12)$$

avec :

- PCS_{st} état de la section s de la chaussée à l'année t
- A_{st} seuil minimum acceptable des PCS requis pour la section s à l'année t
- L_{st} longueur en kilomètres de la section s à l'année t
- $AADT_{st}$ débit du trafic journalier moyen annuel sur la section s à l'année t
- D_{st} nombre de jours de service pour la circulation par la section s à l'année t
- W_{st} largeur en mètres de la section s à l'année t
- C_{stm} coût unitaire d'une intervention m appliquée à l'année t
- R taux d'escompte
- B_t budget pour toutes les interventions en l'année de programmation t
- ΔPCS_m effet d'une intervention de l'état existant à l'état résultant de l'action m
- $PCS_{\max}$ valeur maximum de l'état de la chaussée

Ferreira et al. (2001) ont développé le logiciel SIGPAV contenant une base de données géoréférencées du réseau routier, un outil d'évaluation de la qualité et un outil d'aide à la décision. Ce dernier est basé sur un modèle d'optimisation formulé en nombre entier mixte visant à réduire au minimum les coûts escomptés des actions d'entretien et de réhabilitation pendant une période de planification donnée. Le modèle assigne

directement des interventions attribuées aux segments de chaussée. Le caractère probabiliste de la prévision du comportement est décrit par des chaînes de Markov. Le modèle est résolu avec un algorithme génétique heuristique (sic).

Dandy et Engelhardt (2001) rappellent que les administrations des services d'eaux doivent contrôler le vieillissement de leurs actifs qui se détériorent. Les fonds annuels disponibles aux administrations publiques pour la réhabilitation de leurs actifs ne reflètent qu'une petite fraction du coût de remplacement de l'infrastructure. L'article de Dandy et Engelhardt démontre que l'algorithme génétique peut trouver une solution proche de l'optimal pour le remplacement des conduites d'approvisionnement en eau. L'analyse économique est menée avec trois modèles séparés : le premier pour décider si une conduite doit être réparée immédiatement ou pas du tout pendant la période d'analyse, le second l'étend en déterminant le meilleur moment, au cours des vingt prochaines années, pour intervenir en tenant compte des fonds disponibles et le troisième modèle inclut le diamètre des nouvelles conduites dans la prise de décision. Le problème est résolu en utilisant les algorithmes génétiques.

Chootinan et Chen (2002) soumettent une méthodologie pour programmer les activités d'entretien sur plusieurs années. Une simulation stochastique est utilisée pour représenter le caractère incertain de la modélisation du comportement des chaussées. Les auteurs ont développé deux fonctions objectifs, l'une pour minimiser les coûts pendant un horizon défini et l'autre pour maximiser la performance avec des contraintes de budget. Bien que la méthode simulation de Monte Carlo soit très populaire, les résultats obtenus impliqueront inévitablement des erreurs d'échantillonnage. Pour contrer ce problème, l'échantillonnage par l'hypercube latin est employé comme méthode de prélèvement. Cette technique alternative d'échantillonnage semble aléatoire et reproduit plus exactement la distribution des données. Pour résoudre le problème d'optimisation, l'algorithme génétique est employé pour aborder la nature combinatoire de la programmation de l'entretien au niveau réseau. En reprenant les avantages de cette

approche énoncée par Goldberg (1989), les auteurs ont porté une attention particulière aux algorithmes génétiques pour résoudre des problèmes complexes, en particulier ceux comprenant un aspect combinatoire.

Wang (2003) signale qu'un système de gestion des chaussées devrait pouvoir aider un décideur à choisir le meilleur programme d'entretien, c'est-à-dire quel traitement d'entretien employer, où et quand l'appliquer, de sorte qu'une utilisation maximum des ressources disponibles puisse être réalisée. Cet article présente une procédure de sélection des projets au niveau réseau en utilisant une méthode d'optimisation par programmation en nombre entier afin de choisir les projets à réaliser sur un horizon de planification de cinq ans. Dans le modèle appliqué au Texas, des contraintes de budgets annuels et de conditions minimales de l'état de la chaussée sont formulées ainsi que la prévision du comportement où la transition de l'état de chaque section de chaussée est exprimée. Deux fonctions objectifs sont optimisées, une pour la maximisation de toute l'efficacité de l'intervention et l'autre pour la minimisation des coûts de perturbation de l'intervention pendant l'horizon de planification.

Les technologies de l'information et des communications (TIC) ont permis de développer des bases de données, et plusieurs aspects sont appliqués en gestion des infrastructures : les systèmes d'information géographique (SIG) sont un exemple qu'on ne peut ignorer. Parmi les TIC dont les applications aux infrastructures sont récentes, les entrepôts de données (*Data Warehouse*) et la prospection des données (*Data Mining*) aussi appelée orpaillage pourraient fournir une aide importante au processus de prise de décision.

Un entrepôt de données est une base de données complète, consistante et intègre qui regroupe des données d'une variété de sources différentes pour les mettre à la disposition des utilisateurs de manière à ce que ceux-ci puissent comprendre les données et les utiliser principalement dans des applications de support à la décision. La

prospection des données consiste à rechercher des liens entre les données afin d'extraire des connaissances.

Cette approche basée sur les TIC peut procurer des résultats intéressants en gestion intégrée des infrastructures. L'application des méthodes d'optimisation et des technologies de l'information et des communications risque de s'avérer un processus complexe. Il ne faut pas oublier qu'actuellement peu de municipalités disposent de systèmes de gestion de leurs infrastructures et que les gestionnaires recherchent des outils simples. Afin de pallier les besoins exprimés par les intervenants du milieu, un certain pragmatisme est de mise pour que les retombées de cette thèse soient implantées dans les municipalités. En conséquence, les différents modules du système SAGE seront développés avec un souci constant de convivialité.

Ces différentes formulations ont été étudiées et critiquées. Elles ont servi de base à la réflexion approfondie menant à la formulation retenue dans le chapitre 3 traitant de la modélisation de la prise de décision. D'autres méthodes ont aussi été explorées et appliquées en gestion des infrastructures, par exemple, Gabrys et Bargiela (2000) sur les réseaux de neurones, Ravirala et Grivas (1995) sur la programmation par but-objectif (*Goal-Programming*), Cunha et Sousa (1999) sur l'optimisation avec une approche «*Simulated Annealing*», Hahn et al. (2002) sur les systèmes experts et Cafiso et al. (2002) sur l'analyse multicritère.

2.7 Situation actuelle des systèmes de gestion de l'entretien des ouvrages d'infrastructures

Le portrait actuel des principaux réseaux d'infrastructures urbaines de l'arrondissement Verdun est présenté. Ces réseaux d'infrastructures englobent le réseau de chaussées, le réseau d'eau potable et le réseau d'égout unitaire qui évacue autant les eaux usées que les eaux de ruissellement.

En 1999, Verdun donne un mandat au Laboratoire de recherche en réseautique et informatique mobile (LARIM) de l'École Polytechnique de Montréal de développer un système intégré de gestion coordonnée d'infrastructures urbaines appelé SIGEC. Ce mandat a été réalisé par une équipe composée de plusieurs chercheurs dont messieurs Samuel Pierre, directeur du LARIM, Yves Dion, de BGH-Planning et de Guy Leclerc, professeur au département de génie civil de l'École Polytechnique de Montréal.

Le projet est de concevoir et d'implanter un système intégré de gestion coordonnée d'infrastructures urbaines (SIGEC) permettant d'assurer un fonctionnement optimal d'un certain nombre de réseaux et systèmes de Verdun. L'objectif principal recherché est de produire et traiter de l'information pouvant conduire à une prise de décision éclairée. De manière plus spécifique, le LARIM (2000) rapporte que ce projet vise à :

- a. concevoir un certain nombre de systèmes intégrés d'exploitation (SIDEX) dédiés à la gestion, à la surveillance et au suivi des infrastructures de la Ville, dans un souci d'efficacité et d'efficience;
- b. étudier la faisabilité d'installer sur certaines de ces infrastructures des automates et des équipements de télécommunications pour la saisie, le traitement et la transmission de données destinées à la prise de décision;
- c. intégrer l'ensemble des SIDEX en un tout cohérent et convivial pour les différents types d'utilisateurs du SIGEC, en fonction des tâches, des rôles et des responsabilités que ces utilisateurs assument à la Ville;
- d. implanter un système d'aide à la décision permettant de bien planifier et d'ordonner l'ensemble des travaux à réaliser dans un même secteur de la Ville, tout en réduisant le nombre, les impacts et les coûts des interventions sur les infrastructures.

Les principaux réseaux et systèmes visés par ce projet doivent être desservis par un certain nombre de fonctionnalités incluant l'acquisition et l'archivage automatique de données, la surveillance, la supervision, la commande à distance et la gestion en temps

réel. Les principaux systèmes urbains qui pourront être gérés d'une façon coordonnée par le SIGEC sont les suivants :

- a. réseau d'égout;
- b. réseau d'aqueduc;
- c. réseau des trottoirs et des bordures;
- d. réseau d'éclairage public;
- e. chaussée;
- f. bâtiments;
- g. suivi environnemental.

Parmi les bénéfices tangibles escomptés pour les usagers du SIGEC, le LARIM (2000) mentionne :

- a. l'augmentation de la présence et de la productivité du personnel sur le terrain;
- b. la diminution des efforts consacrés au support administratif;
- c. l'affectation d'une plus grande quantité de ressources aux opérations sur le terrain;
- d. l'augmentation de la proportion des efforts consacrés au préventif par rapport au curatif;
- e. l'augmentation du ratio d'effort d'opération par rapport à l'effort de soutien.

En ce qui a trait aux bénéfices intangibles, le LARIM (2000) rapporte les faits suivants :

- a. les usagers pourront évaluer plus systématiquement les interventions effectuées;
- b. les usagers pourront améliorer la communication avec la clientèle, les partenaires et les ressources humaines;
- c. les usagers pourront maximiser les investissements en ressources informationnelles, en ayant recours à des indicateurs de gestion opérationnelle pertinents.

Les usagers misent sur les potentialités offertes par les technologies de l'information (télécommunications et réseaux mobiles, Internet, intelligence artificielle, automatique, etc.) pour impliquer le personnel sur le terrain dans l'établissement des priorités et dans la planification des activités d'exploitation. Ils pourront également tirer parti des facilités de suivi en temps réel ou différé des opérations d'exploitation et d'entretien qu'offrent ces technologies. Ainsi, le gestionnaire de première ligne qui a accès à ce type de système sera plus en mesure de connaître à l'avance la qualité et la quantité de travail à exécuter. Il dispose également d'une vision plus globale des actions touchant les opérations, la programmation, l'exécution et le suivi des travaux. De cette façon, le gestionnaire sera en mesure de mieux gérer son temps et bien cibler ses interventions.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DE LA PRISE DE DÉCISION

Ce chapitre décrit l'énoncé du problème d'optimisation, la terminologie du problème, la fonction objectif et sa mise en forme mathématique. Par la suite, le modèle retenu de prévision du comportement de chaque infrastructure est présenté en regard des pratiques existantes énoncées au chapitre de la revue de la littérature. Enfin, la fonction objectif est formulée et la complexité de sa résolution avancée.

3.1 Énoncé du problème

La formulation du problème d'optimisation se doit d'être cohérente avec l'objectif de la démarche énoncée au chapitre premier. Il s'agit de dégager les priorités en matière d'intervention sur les infrastructures municipales à court, à moyen et à long terme, en évaluant l'incidence des actions pendant la durée de vie des infrastructures. Le système d'aide à la décision doit permettre au gestionnaire d'identifier facilement les tronçons où une action est requise, le type d'intervention à privilégier ainsi que le moment le plus propice pour intervenir. Cette analyse est basée sur l'état actuel et prévisionnel des différentes infrastructures, sur les moyens mis à la disposition du gestionnaire en termes de ressources, sur les contraintes physiques subies par les infrastructures en termes de sollicitations et enfin sur les contraintes externes, politiques, socio-économiques, etc.

La résolution de ce type de problème est fort complexe; mais, pour les citoyens, la question est simple : ils paient suffisamment de taxes et exigent un réseau d'infrastructures de qualité. Le gestionnaire se questionne sur les attentes des citoyens afin de bien saisir comment la population perçoit cette notion de qualité pour alors convertir ces attentes en termes de niveaux de service. Dans les faits, la perception varie selon les infrastructures concernées. Les citoyens, utilisateurs de services, sont très

sensibles aux défauts de la chaussée puisqu'ils subissent quotidiennement les effets négatifs d'une route en mauvais état. Une baisse du niveau de confort au roulement est ressentie immédiatement par la population. L'intérêt des citoyens est moindre pour les infrastructures enfouies. En regard de l'aqueduc, la population réclame une eau potable de qualité et une pression suffisante en tout temps. Les recommandations de faire bouillir l'eau sont des irritants à éliminer et les restrictions d'arrosage sont à limiter. Pour ce qui est des égouts, les citoyens s'en préoccupent peu, si ce n'est lors de refoulements d'eau ou de mauvaises odeurs.

Plusieurs citoyens ont des attentes proportionnelles aux paiements de leurs taxes. Plus ils payent cher, plus ils estiment avoir le droit d'exiger un niveau de services élevé. Le gestionnaire subit alors des pressions de la part des élus afin de satisfaire les besoins de la population : cette situation correspond trop souvent à une nécessité à courte échéance. Le gestionnaire doit établir un programme d'intervention stratégique qui évitera les recours à des interventions à courte portée. Ce programme doit mettre en évidence les tronçons où des travaux seront entrepris, à court, à moyen, à long terme. Ainsi, lorsqu'un citoyen interrogera l' élu municipal qui le représente, celui-ci pourra lui exposer immédiatement la planification des travaux.

Le choix des tronçons et l'établissement des priorités d'intervention seront fonction de plusieurs conditions qui seront développées ultérieurement. Sur un tronçon donné, la solution à privilégier est celle qui propose l'intervention la plus performante en termes de qualité et de durée de vie, et au meilleur coût; il s'agit d'une mesure d'efficacité. La prise de décision sur l'ensemble du réseau consiste à choisir, parmi un éventail d'options, celle qui fournira les meilleurs résultats escomptés : c'est un sujet complexe qui se pose comme un problème d'optimisation avec contraintes.

La modélisation de la prise de décision constitue un élément important et indispensable pour résoudre un problème d'optimisation. Cette étape consiste à créer un modèle, c'est-

à-dire reproduire la réalité d'un problème en ne retenant que les éléments essentiels. Il s'agit d'une représentation où les objets et les relations entre eux sont mis en évidence. Le modèle est un moyen pour mieux comprendre la réalité utilisée en symbolisant les propriétés fondamentales d'un certain phénomène. Les problèmes de gestion sont souvent complexes et nécessitent l'usage fréquent de modèles.

La classification des modèles s'effectue selon leur type. Les modèles physiques sont soit des modèles iconiques pour visualiser une solution pratique ou des modèles réduits ou des maquettes, soit des modèles analogiques qui permettent d'étudier un phénomène pour en représenter un autre, par exemple l'analogie électrique en hydraulique. Les modèles symboliques sont soit des modèles mathématiques qui peuvent être déterministes ou probabilistes, soit des modèles verbaux. Bruxelles (2002) mentionne que les modèles déterministes ont une incertitude négligeable, c'est-à-dire que les résultats du phénomène sont prévus avec certitude tandis que les modèles probabilistes ou stochastiques ont une incertitude considérée comme un facteur important du phénomène analysé.

Les modèles mathématiques partagent souvent cette caractéristique de rechercher l'optimisation d'un objectif. Le modèle est ainsi la première étape vers l'obtention de la solution optimale. Nobert et al. (1999) mentionnent que «connaître une solution optimale d'un modèle permet souvent au gestionnaire d'obtenir de précieuses indications sur la façon de se comporter pour tirer au mieux son épingle du jeu».

3.2 Terminologie du problème d'optimisation

Un problème d'optimisation vise à minimiser ou maximiser une fonction donnée, dite fonction objectif, critère d'objectivité ou encore fonction économique. Lorsque des limitations diverses interviennent, on dit que l'on traite un problème d'optimisation contraint.

Un programme linéaire est un problème d'optimisation dans lequel la fonction objectif de n variables de décision est linéaire et l'ensemble des contraintes est exprimé sous forme d'équations ou d'inéquations linéaires. Le problème général d'optimisation se pose sous la forme suivante :

$$\text{Maximiser} \quad Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.1)$$

$$\text{sujet à} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{pour } i = 1; 2; \dots; m \quad (3.2)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{pour } j = 1; 2; \dots; n \quad (3.3)$$

où Z est l'objectif, c'est-à-dire la fonction à optimiser et $x_1, x_2, \dots, x_n$ sont les variables de décision. Les contraintes représentées par l'équation 3.2, $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$ prennent la forme d'un ensemble d'équations ou d'inéquations linéaires ou non. Les contraintes de bornes montrées par l'équation 3.3, $x_j \geq 0$ sont souvent des contraintes de non-négativité. La solution optimale est obtenue en appliquant une méthode de recherche opérationnelle.

La méthode du simplexe est une des méthodes de résolution de programmation linéaire. C'est une méthode générale qui sert à résoudre des problèmes complexes de prise de décision en fournissant des solutions en un temps acceptable. Cet algorithme est décrit au chapitre 4 sur la stratégie de résolution.

Le problème d'optimisation écrit sous une forme primale, consiste à maximiser un objectif ou une valeur; celui-ci peut être transformé en problème dual de minimisation en multipliant les coefficients de la fonction objectif par -1. Après transformation, le problème primal décrit dans les équations 3.1 à 3.3 se formule en problème dual sous la forme suivante :

$$\text{Minimiser} \quad y_0 = \sum_{i=1}^m b_i y_i \quad (3.4)$$

$$\text{sujet à} \quad \sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \leq b_j \text{ pour } j = 1; 2; \dots; n \quad (3.5)$$

$$y_i \geq 0 \text{ pour } i = 1; 2; \dots; m \quad (3.6)$$

La programmation en nombre entier est une variante de la programmation linéaire où, en plus des contraintes données précédemment, la solution est restreinte aux valeurs entières de x . Lorsque les variables de décision ne peuvent prendre que les valeurs zéro ou un, par exemple faire ou non telle intervention, il s'agit de programmation en nombre entier binaire.

Lors de la modélisation d'un problème réel, l'impact de ces hypothèses sur la validité du modèle mathématique doit être étudié. Cette analyse peut mener à choisir un modèle différent qui peut être non linéaire, stochastique, etc. Celle-ci est essentielle pour la phase d'interprétation des résultats fournis par le modèle.

3.3 Fonction objectif

La fonction à optimiser dite «fonction objectif» peut se poser sous deux formes : soit maximiser l'état des réseaux d'infrastructures sujet à des contraintes de coûts, soit minimiser les coûts d'intervention assujettis à des contraintes sur l'état minimum acceptable des réseaux. Il s'agit du même problème formulé selon les modèles primal et dual.

Le problème de maximisation est un problème d'optimisation multi objectif puisque les besoins des différents réseaux impliquent des interventions distinctes. Avec cette formulation, la recherche de «l'état le meilleur possible» doit être limitée, en plus des fonds disponibles, à un état général plus que satisfaisant. Si les ressources étaient illimitées, le problème viserait alors à ce que tous les tronçons soient parfaits.

Cette stratégie est intéressante pour améliorer l'état général du réseau soit dans le cadre d'une gestion globale, soit dans celui d'une stratégie proactive de maintenance. Mailhot (2000a) rappelle que la gestion globale ne permet pas de définir la localisation ou la nature précise des interventions, mais plutôt d'apprécier l'état structural global du réseau, en termes de pourcentage de longueur de réseau en mauvais état et d'estimer comment ce pourcentage évoluera en fonction de différents scénarios de remplacement. Quant à la stratégie de maintenance proactive, Stubler (2001) la résume en notant : «même si mon infrastructure est en bon état, je dépense un peu aujourd'hui pour m'assurer qu'elle reste en bon état».

Dans le cas du problème de minimisation, la recherche du coût le plus faible possible doit s'effectuer pour un niveau de service minimum acceptable tel que défini par la stratégie de l'organisation, tout en respectant les contraintes de budget. Ainsi, il s'agit de rechercher les solutions où toutes les sections d'infrastructures sont à tout moment satisfaisantes. La forme du problème de minimisation correspond davantage aux situations rencontrées couramment. Ainsi, une personne ne cherche-t-elle pas à déboursier le moins possible pour un bien ou un service dont elle aurait besoin? Par exemple, lorsqu'une personne veut acquérir un nouveau véhicule, elle recherche la meilleure aubaine qui répond à ses attentes. Cette démarche s'inscrit dans un processus intuitif d'analyse de la valeur. Il s'agit d'une méthode systématique qui permet de concevoir ou d'optimiser un produit, un service, un procédé ou un processus. L'analyse de la valeur assure, de la meilleure façon et au plus bas coût possible, la satisfaction de l'utilisateur. Cette notion de valeur est déterminée par le rapport entre la satisfaction du besoin et son coût global.

Dans la littérature, les deux formes du problème se retrouvent; certains auteurs préfèrent les cas de maximisation tandis que d'autres choisissent les problèmes de minimisation. Les fonctions objectifs les plus courantes sont :

- a. la minimisation du coût;

- b. la maximisation de la performance de la chaussée;
- c. la minimisation de l'inutilité;
- d. la maximisation de l'efficience des interventions.

Les fonctions objectifs de ces quatre pratiques sont formulées et analysées. De plus, par souci de créativité, il est envisagé de rédiger un problème de maximisation des attentes des citoyens qui veulent profiter d'infrastructures de qualité acceptable tout en déboursant le moins possible. Dans ce dernier cas, l'état des réseaux est maximisé en respectant un seuil de qualité minimale et les coûts, autant ceux payés par l'administration municipale que ceux payés par les usagers, sont minimisés; il s'agit d'un problème d'optimisation multi objectif. Bien que toutes ces formulations présentent un intérêt certain, elles sont analysées et soupesées, et le choix se porte sur le problème de minimisation qui consiste à minimiser les coûts d'intervention assujettis à des contraintes sur l'état minimum acceptable des réseaux d'infrastructures. Cette formulation est plus intuitive et se rapproche des préoccupations des gestionnaires.

En outre, ce type de formulation offre des avantages indéniables au niveau de la résolution. En effet, la solution optimale est la solution la plus économique sur chacun des tronçons; seule l'introduction de contraintes d'adjacence où des économies sont escomptées en procédant à des interventions regroupées sur des tronçons accolés peut engendrer une solution optimale moindre. Ce type de contrainte est traité plus loin dans ce chapitre.

Un autre élément qui milite en faveur de ce choix est sa facilité de compréhension autant par les gestionnaires, les élus que par les citoyens. De plus, le problème retenu peut être résolu avec relativement peu de données. Il ne faut pas oublier que les administrations municipales ne possèdent pas toujours des données détaillées et exhaustives sur leurs infrastructures et que les gestionnaires recherchent un outil simple.

3.4 Mise en forme mathématique

La méthodologie retenue pour la mise en forme mathématique comprend les trois étapes suivantes :

- a. définir les variables de décision;
- b. formuler la fonction objectif;
- c. préciser les contraintes et les paramètres du problème.

3.4.1 Identification des variables de décision

Les variables de décision sont l'ensemble des variables qui régissent la situation à modéliser : elles peuvent être réelles, entières ou binaires. Dans le modèle proposé, les variables de décision sont binaires : elles prennent la valeur de zéro ou un selon qu'il y a ou non l'action a sur la section s au temps t . Les variables de décision sont notées x_{sta} et représentent la section s parmi les n sections où, au temps t de la période de planification m , l'action a parmi k interventions possibles est appliquée. Les variables de décision binaires sont, dans la pratique, les plus utilisées.

Dans cette définition, le terme section est compris au sens de tronçon afin d'éviter des ambiguïtés dans l'annotation des variables : il s'agit de sections intégrées comprenant une ou plusieurs sections de chaussée, d'égout ou d'aqueduc. En gestion des infrastructures, lorsqu'une intervention n'est pas effectuée sur l'ensemble de la section, celle-ci est divisée en entités cohérentes : c'est le principe du sectionnement dynamique. Après quelques sectionnements dynamiques, plusieurs sections de la même infrastructure cohabitent dans la base de données, multipliant ainsi le nombre de sections. Cette approche est rigoureuse pour la description des caractéristiques de chaque section.

En milieu urbain, les tronçons sont souvent délimités par deux intersections relativement rapprochées ; l'application du sectionnement dynamique est problématique. Certaines opérations d'entretien, comme le resurfaçage, limitées à une partie du tronçon, sont parfois difficilement justifiables auprès de la population. Afin de contourner cette difficulté, la section est considérée homogène, c'est-à-dire que l'état de chaque infrastructure est décrit de façon unique sur la longueur du tronçon. En élargissant ce concept à la compréhension des citoyens, pourquoi ne pas appliquer les mêmes interventions sur deux tronçons adjacents d'apparence similaire ? Cette question sera traitée ultérieurement comme une contrainte de nature sociale.

La période de planification doit être très longue afin de pouvoir pratiquer une analyse des coûts sur le cycle de vie de chaque infrastructure. La principale difficulté réside dans le fait que les trois infrastructures considérées ont des durées d'utilisation variables et très différentes. Ainsi, une chaussée flexible est normalement calculée pour une période de conception de 15 à 20 ans tandis qu'il n'est pas rare de trouver, dans les vieux quartiers de villes nord-américaines, des conduites d'égout datant de plus de 150 ans. Le Guide national pour des infrastructures durables (2003e) présente les résultats d'un sondage qui montre que les municipalités canadiennes utilisent la plage d'espérance de vie suivante :

- a. égouts : de 40 à 140 ans;
- b. conduites d'eau : de 40 à 120 ans;
- c. routes : de 10 à 30 ans;
- d. ouvrages importants : de 30 à 100 ans;
- e. matériel : de 10 à 20 ans.

Dans le secteur étudié de l'arrondissement Verdun, certaines rues datent de 1910, des sections d'aqueduc de 1921 et des sections d'égout de 1919. La précision des résultats est grandement altérée par la longueur des périodes de planification. Dans ces

conditions, un horizon de 15 à 20 ans semble être un bon compromis entre la précision obtenue et les attentes des gestionnaires.

Afin de produire une analyse économique conforme aux règles de l'art, les coûts sont actualisés et le taux d'escompte retenu varie entre 5 et 6%. Ce taux d'intérêt annuel composé correspond approximativement à celui des obligations à long terme du gouvernement du Canada.

Au niveau projet, les interventions sont spécifiques à chaque infrastructure et reposent sur des techniques et des technologies bien définies et documentées. Au niveau réseau, les interventions envisagées sont regroupées selon des classes d'intervention :

- a. ne rien faire;
- b. entretien mineur;
- c. réhabilitation;
- d. reconstruction.

Cette approche fournit au gestionnaire une information plus précise que le «*go or no go*» couramment rencontrée. Aussi, les quatre possibilités sont envisagées à chaque période sur chaque infrastructure. Dans la pratique, certaines administrations n'analysent qu'une seule option, soit l'entretien mineur lorsque l'infrastructure est bon état, la réhabilitation quand il est moyen et la reconstruction lorsqu'il est en mauvais état.

3.4.2 Forme de la fonction objectif

La fonction objectif est une fonction mathématique composée des variables de décision qui représentent le modèle physique modélisé : la fonction peut prendre plusieurs formes, linéaire, non linéaire, stochastique ou discrète.

La fonction objectif qui pose le problème de minimisation des coûts d'intervention est décrite par l'équation suivante :

$$\text{Minimiser } \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^m \sum_{a=1}^k x_{sta} C_{sta} \quad (3.7)$$

où la variable de décision décrite précédemment est notée x_{sta} et la variable C_{sta} représente le coût de l'action a sur la section s au temps t . Le coût de l'action a est fonction de l'état de chaque section d'infrastructure s au temps t et de chaque intervention possible. Par conséquent, la connaissance des modèles de prévision du comportement de chaque infrastructure est une étape préalable et incontournable à l'étape d'optimisation proprement dite. La fonction objectif est jumelée à des contraintes du problème qui comprennent l'ensemble des paramètres qui limitent le modèle réalisable ; elles sont représentées par des équations ou inéquations composées des variables de décision. Les paramètres du modèle sont des constantes associées aux contraintes et à la fonction objectif.

Les contraintes de faisabilité encadrent la réalité du problème en limitant les possibilités.

Dans le cas étudié, l'équation $\sum_{a=1}^k x_{sta} = 1 \quad \forall s, t$ représente le fait qu'une seule action est posée sur la section s au temps t . Ainsi, à chaque année, et sur chaque infrastructure, il est possible soit de ne rien faire, soit d'appliquer un entretien mineur, soit de réhabiliter ou alors de reconstruire.

Les contraintes d'acceptabilité montrent les seuils et les limites d'intervention. Ainsi, elles fournissent une indication de la vie résiduelle de l'infrastructure. Les contraintes d'acceptabilité sont représentées par une inéquation bornant le seuil limite d'intervention sur chaque infrastructure. Par exemple, pour la chaussée le seuil d'intervention est fixé par l'inéquation $QC_{st} \geq QC_{\min} \quad \forall s, t$ où QC_{st} est l'indice de qualité de la section s de la chaussée au temps t et $QC_{\min}$ est la valeur minimale de la qualité de chaussée. L'indice de qualité de la chaussée QC_{st} représente l'état de la chaussée; lorsque $t = 0$, cet indice

est déterminé par des mesures et des évaluations de la qualité de la chaussée et dans les cas où $t \geq 1$, il est calculé en établissant des modèles de prévision de son comportement.

Les contraintes de nature économique sont essentiellement reliées aux budgets disponibles pendant toutes les années de la période de planification. Ce type de contraintes n'est pas pertinent lorsque les tronçons sont analysés individuellement; cependant, elles sont indispensables dans les problèmes de maximisation de l'état des réseaux d'infrastructures soumis à des contraintes de coûts. Dans ce cas, le réseau au complet doit être optimisé en même temps. Aussi, le fait d'ajouter des contraintes budgétaires au problème de minimisation des coûts peut engendrer des solutions irréalisables, c'est-à-dire qu'il serait impossible de maintenir l'état des infrastructures au-dessus des seuils minimaux avec de tels budgets. Par contre, le fait de ne pas introduire de contraintes de budget peut engendrer des coûts énormes pendant la même période et impliquer des ressources qui ne sont pas disponibles. Dans ce cas, il s'agit d'un problème de nivellement des ressources qui doit être traité comme un problème de gestion de projets.

Les contraintes d'intégrité permettent de circonscrire les réponses du problème en forçant les variables de décision à être binaires, c'est-à-dire prendre les valeurs zéro ou un. Cette contrainte est indiquée par l'équation $x_{sta} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$.

D'autres contraintes peuvent être ajoutées au modèle : par exemple, des contraintes de nature sociale peuvent représenter le comportement des usagers des services publics des infrastructures, par le gaspillage de l'eau potable causé par manque de civisme de certains citoyens. Des contraintes d'adjacence permettent de considérer des tronçons limitrophes et envisager des économies d'échelle à intervenir sur des tronçons plus longs. Aussi, des contraintes politiques peuvent «encadrer» les pouvoirs décisionnels des élus en pondérant certains paramètres qui les préoccupent particulièrement.

3.5 Prévision du comportement de chaque infrastructure

Un tronçon est défini comme une partie d'un tout. Le territoire à l'étude est l'ensemble du domaine public situé à l'intérieur de l'emprise de la route; il est subdivisé en tronçons qui identifient la partie du territoire à analyser. Un tronçon est délimité par deux autres tronçons, un à chaque extrémité. Un tronçon comprend un certain nombre de sections, soit une ou plusieurs sections de chaussée, une ou plusieurs sections d'égout, une ou plusieurs sections d'aqueduc ainsi que des sections représentant les services d'utilités publiques. Chaque section d'infrastructure civile est partie intégrante d'un réseau, comme le réseau routier, et chaque réseau est lui-même partie intégrante du réseau d'infrastructures civiles.

Le formulaire de saisie de l'information est présenté à la figure 25. Par exemple, le tronçon numéro 1 est situé sur la rue Bannantyne, entre les rues De l' glise et Hickson. De plus, chaque tronçon est identifié par des références spatiales afin d'en faciliter le traitement avec un système d'information géographique. Le tronçon numéro 1 comprend une section de chaussée, deux sections d'égout et une section d'aqueduc.

The image shows a screenshot of a software application window titled "Tronçon". Inside the window, there is a form titled "Identification du tronçon". The form has several input fields: a small box containing the number "1", a larger box containing the text "Bannantyne", and two more boxes preceded by the words "entre" and "et", containing the text "De l'église" and "Hickson" respectively. At the bottom of the window, there is a status bar that reads "Enr : 1 sur 43" and includes several small navigation icons (back, forward, etc.).

Figure 25 Formulaire d'identification d'un tronçon

Les modèles de prévision les plus courants sont établis selon des courbes de performance, des chaînes de Markov ou des taux de survie. Les contraintes utilisées dans les modèles d'optimisation sont basées sur le budget, l'état minimum de la chaussée et les ressources. La fonction objectif retenue de minimisation des coûts implique des contraintes d'acceptabilité spécifiant l'état minimum de chaque infrastructure.

Appliquer des modèles raffinés de prévision du comportement nécessite des données nombreuses, précises et fiables que les administrations municipales n'ont pas toujours à leur disposition. Avant de colliger toutes ces données à un coût relativement élevé, il faut évaluer leur pertinence et leur influence sur la décision à prendre pour réduire les coûts de cueillette de données. Ce compromis est nécessaire au moins dans les premiers temps de mise en œuvre du système de gestion.

Pour que cette recherche puisse être appliquée à un grand nombre de municipalités, le modèle doit être simple et économique. Par conséquent, il doit s'appuyer sur un nombre restreint de données.

L'équation 3.8 exprime sous une forme générique le type de contrainte que la formulation d'un tel problème exige.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (3.8)$$

Les contraintes relatives à l'état des infrastructures doivent exprimer, période après période, que leur état est supérieur ou égal au seuil minimum acceptable. Le modèle retenu est linéaire puisqu'il est répond à l'objectif de cette thèse qui est de prouver la faisabilité de l'intégration des différentes infrastructures dans le même système de décision ainsi que les bénéfices économiques. Ce modèle est le plus simple à exprimer, à comprendre, et nécessite moins de données que les autres.

Les contraintes de forme polynomiale peuvent théoriquement décrire le phénomène de dégradation des chaussées avec plus de finesse; toutefois, le calage du modèle est plus délicat et exige soit des données historiques sur plusieurs périodes, soit un regroupement de tronçons par famille. Bien que cette pratique soit de plus en plus utilisée, plusieurs experts préfèrent revenir au modèle linéaire.

Les contraintes exprimant la forme stochastique, notamment celles s'appuyant sur les chaînes de Markov, sont de plus en plus utilisées dans la prévision du comportement des infrastructures. Cette approche requiert une matrice de transition qui fixe les conditions et les probabilités que l'état de chaque infrastructure à un moment donné passe à un autre état au moment suivant. Cette méthode est employée en gestion globale où la fonction objectif vise à optimiser le pourcentage de tronçons dans un état donné. Dans ce cas, il est difficile, voire impossible, de déterminer les tronçons où intervenir et les actions à entreprendre.

Les contraintes qui modélisent les fonctions de survie sont surtout utilisées en gestion des conduites d'aqueduc. Pour qu'elles puissent être appliquées correctement, la connaissance de l'historique des bris de chaque tronçon d'aqueduc est primordiale. Ainsi, une fonction de distribution est choisie pour déterminer le premier bris d'une conduite et une autre fonction détermine les bris subséquents.

3.5.1 Comportement d'une section de chaussée

L'évaluation du comportement des chaussées est un concept fondamental sur lequel reposent les principes de gestion des infrastructures routières. Ce concept de comportement représente la serviabilité qu'offre la chaussée aux usagers. L'analyse du comportement indique au gestionnaire l'état actuel et prévisionnel de la chaussée, elle identifie les sections et fixe le moment où une intervention est requise.

Différentes méthodologies sont suivies pour assigner les ressources d'entretien et réhabilitation, notamment les méthodes de classement par ordre de priorité et celles d'optimisation. Le tri des projets est une méthode d'analyse de données qui combine l'état de la chaussée ou un indice qui le représente. Les sections de chaussée sont rangées selon le type de chaussée, le volume de circulation, la classification de la route, et d'autres facteurs reliés à la section de la chaussée. Un modèle d'optimisation au niveau réseau identifie les stratégies d'entretien et de réhabilitation qui maximisent les avantages ou réduisent les coûts en tenant compte de contraintes telles que des limites de budget et des seuils de performance. Les valeurs de l'état des sections de chaussée sont employées comme paramètres du modèle, variables de décision tandis que les limites des ressources et le seuil minimum de l'état de la chaussée correspondent aux contraintes. La plupart des modèles d'optimisation considèrent l'état futur de la chaussée et allouent des ressources sur plusieurs années. Par conséquent, les modèles de prévision de l'état de la chaussée fournissent l'information technique nécessaire à l'optimisation.

Plusieurs modèles existent pour développer des indices de priorité. Habituellement, ils sont des composés des mesures de l'état de la chaussée, notamment les déformations de surface, la rugosité ou le confort au roulement, la circulation, les facteurs économiques, la classe fonctionnelle, la sécurité, la résistance au dérapage, les déficiences géométriques, la capacité structurale, l'âge et la localisation du tronçon.

Les administrations routières qui utilisent les techniques d'optimisation suivent quatre approches dont la programmation linéaire, la programmation en nombre entier, l'analyse coût/bénéfice incrémentielle et l'efficacité de rentabilité marginale. La programmation linéaire et la programmation en nombre entier sont deux techniques de programmation mathématique. L'analyse coût/bénéfice incrémentielle est un algorithme récursif qui cherche à allouer chaque élément de ressources pour fournir le plus grand bénéfice possible. L'efficacité de rentabilité marginale ressemble beaucoup à l'analyse coût/bénéfice incrémentielle mais les bénéfices sont remplacés par l'efficacité.

La performance est la capacité d'une chaussée à réaliser son but durant sa vie utile. Une méthode de prévision est une description mathématique des valeurs prévues d'un attribut de chaussée pendant une période d'analyse. Les modèles de prévision fournissent les paramètres à l'optimisation de la gestion des chaussées de sorte qu'ils puissent établir les futurs programmes d'entretien et de réhabilitation dans les conditions prévues. La majorité des modèles de prévision sont des modèles déterministes bien que plusieurs administrations routières aient mis en application des modèles stochastiques.

À la section 3.4.2 de ce chapitre, les contraintes d'acceptabilité sont représentées par une inéquation bornant le seuil limite d'intervention sur chaque infrastructure. Pour la chaussée, le seuil d'intervention est fixé par l'inéquation $QC_{st} \geq QC_{min} \quad \forall s, t$ où QC_{st} est l'indice de qualité de la section s de la chaussée au temps t et QC_{min} est la valeur minimale de la qualité de chaussée.

Le gestionnaire fixe les paramètres d'intervention en complétant la page-écran se retrouvant au chapitre 5 sur la validation du SAGE. Ainsi, pour chaque classe fonctionnelle de la chaussée locale ou collectrice, il quantifie l'incidence de chaque intervention sur l'état de la chaussée. Aussi, en spécifiant la cote maximale d'une chaussée théoriquement parfaite, le seuil minimum acceptable où il faut intervenir et la durée de vie, le prototype SAGE calcule l'effet de ne rien faire par période. Par exemple, le gestionnaire peut fixer, selon son expérience, les contraintes d'acceptabilité reflétant, sur un horizon de trois périodes, les quatre possibilités suivantes :

- a. ne rien faire : la qualité de la chaussée baisse de 4;
- b. entretien mineur : la qualité de la chaussée monte de 12;
- c. réhabilitation : la qualité de la chaussée monte de 40;
- d. reconstruction : la qualité de la chaussée monte de 80.

La contrainte pour la première période est la suivante :

$$QC_0 - 4x_1 + 12x_2 + 40x_3 + 80x_4 \geq QC_{min} \quad (3.9)$$

où QC_0 représente l'état initial à la période de conception et $QC_{\min}$ le seuil minimum acceptable. Les périodes subséquentes, les contraintes sont :

$$QC_0 - 4x_1 + 12x_2 + 40x_3 + 80x_4 - 4x_5 + 12x_6 + 40x_7 + 80x_8 \geq QC_{\min} \quad (3.10)$$

$$QC_0 - 4x_1 + 12x_2 + 40x_3 + 80x_4 - 4x_5 + 12x_6 + 40x_7 + 80x_8 - 4x_9 + 12x_{10} + 40x_{11} + 80x_{12} \geq QC_{\min} \quad (3.11)$$

Il y aura donc autant de contraintes d'acceptabilité relatives à la chaussée qu'il y a de périodes dans l'horizon de planification.

3.5.2 Comportement d'une section d'égout

L'évaluation du comportement de l'égout est calquée sur le concept appliqué en gestion des infrastructures routières. Ce concept de comportement représente normalement la serviabilité qu'offre cette infrastructure aux usagers. Cependant, l'utilisateur n'est pas sensibilisé aux exigences des conduites d'égout lorsque tout fonctionne correctement.

L'approche retenue pour l'égout est analogue à celle utilisée pour modéliser la chaussée. Les contraintes d'acceptabilité sont représentées par une inéquation bornant le seuil limite d'intervention sur chaque infrastructure. Pour l'égout, le seuil d'intervention est fixé par l'inéquation $QE_{st} \geq QE_{\min} \quad \forall s, t$ où QE_{st} est l'indice de qualité de la section s de l'égout au temps t et $QE_{\min}$ est la valeur minimale de la qualité de l'égout. Cet indice de qualité peut être agrégé au regard de critères structuraux ou fonctionnels et fonction des données disponibles.

Les contraintes relatives à l'état de l'égout sont donc exprimées, période après période, afin que celui-ci soit supérieur ou égal au seuil minimum acceptable. Comme dans le cas de la chaussée, le modèle retenu est linéaire et le gestionnaire fixe les paramètres d'intervention selon son expérience.

Un exemple de contraintes d'acceptabilité montre, sur un horizon de trois périodes et avec les quatre possibilités suivantes :

- a. ne rien faire : la qualité de l'égout baisse de 1;
- b. entretien mineur : la qualité de l'égout monte de 10;
- c. réhabilitation : la qualité de l'égout monte de 40;
- d. reconstruction : la qualité de l'égout monte de 80.

La contrainte pour la première période est la suivante :

$$QE_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 \geq QE_{\min} \quad (3.12)$$

où QE_0 représente l'état initial à la période de conception et $QE_{\min}$ le seuil minimum acceptable. Les périodes subséquentes, les contraintes sont :

$$QE_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 - x_5 + 10x_6 + 40x_7 + 80x_8 \geq QE_{\min} \quad (3.13)$$

$$QE_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 - x_5 + 10x_6 + 40x_7 + 80x_8 - x_9 + 10x_{10} + 40x_{11} + 80x_{12} \geq QE_{\min} \quad (3.14)$$

Il y aura encore ici autant de contraintes d'acceptabilité relatives à l'égout qu'il y a de périodes dans l'horizon de planification.

3.5.3 Comportement d'une section d'aqueduc

Comme pour l'égout, l'évaluation du comportement de l'aqueduc est calquée sur le concept appliqué en gestion des infrastructures routières. Lorsqu'il n'y a pas de fuite, que l'eau est de bonne qualité et que la pression est adéquate, l'utilisateur n'est pas sensibilisé aux exigences de cette infrastructure. Cette analyse identifie les sections, dans l'espace et le temps où une intervention est requise.

L'approche retenue pour l'aqueduc est analogue à celle utilisée pour modéliser la chaussée et l'égout. Pour l'aqueduc, le seuil d'intervention est fixé par l'inéquation

$QA_{st} \geq QA_{\min} \quad \forall s, t$ où QA_{st} est l'indice de qualité de la section s de l'aqueduc au temps t et $QA_{\min}$ est la valeur minimale de la qualité de l'aqueduc.

Les contraintes relatives à l'état de l'aqueduc sont aussi exprimées, période après période, afin que celui-ci soit supérieur ou égal au seuil minimum acceptable. Un exemple de contraintes d'acceptabilité montre, sur un horizon de trois périodes avec les quatre possibilités suivantes :

- a. ne rien faire : la qualité de l'aqueduc baisse de 1;
- b. entretien mineur : la qualité de l'aqueduc monte de 10;
- c. réhabilitation : la qualité de l'aqueduc monte de 40;
- d. reconstruction : la qualité de l'aqueduc monte de 80.

La contrainte pour la première période est la suivante :

$$QA_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 \geq QA_{\min} \quad (3.15)$$

où QA_0 représente l'état initial à la période de conception et $QA_{\min}$ le seuil minimum acceptable. Les périodes subséquentes, les contraintes sont :

$$QA_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 - x_5 + 10x_6 + 40x_7 + 80x_8 \geq QA_{\min} \quad (3.16)$$

$$QA_0 - x_1 + 10x_2 + 40x_3 + 80x_4 - x_5 + 10x_6 + 40x_7 + 80x_8 - x_9 + 10x_{10} + 40x_{11} + 80x_{12} \geq QA_{\min} \quad (3.17)$$

Tout comme pour la chaussée et pour l'égout, il y aura autant de contraintes d'acceptabilité relatives à l'aqueduc qu'il y a de périodes dans l'horizon de planification.

3.5.4 Influence des conduites souterraines sur la chaussée

Les conduites souterraines ont une influence non négligeable sur la chaussée. La prise en compte de cette interaction est considérée en introduisant des économies lorsque des interventions de reconstruction sont programmées la même année. Cette économie est fixée par le gestionnaire qui a l'opportunité de la quantifier à son gré.

3.6 Formulation de la fonction objectif

La stratégie retenue considère toutes les activités de gestion des infrastructures, de «ne rien faire» à la reconstruction, à chaque période pendant tout le cycle de vie des infrastructures. Les interventions recommandées tiennent compte des causes de détérioration et non pas seulement des symptômes. Une vue d'ensemble montre le but et la direction de la stratégie retenue. Ainsi, chaque tronçon est traité successivement avec la formulation de la fonction objectif suivante :

Minimiser

$$\sum_{t=1}^m \sum_{a=1}^k x_{ta} C_{ta} \quad (3.18)$$

sujet à

$$\sum_{a=1}^k x_{ta} = 1 \quad \forall t \quad (3.19)$$

$$QC_{t+1} = QC_t + x_{ta} \Delta C_a \geq QC_{\min} \quad (3.20)$$

$$QA_{t+1} = QA_t + x_{ta} \Delta A_a \geq QA_{\min} \quad (3.21)$$

$$QE_{t+1} = QE_t + x_{ta} \Delta E_a \geq QE_{\min} \quad (3.22)$$

$$x_{ta} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (3.23)$$

avec :

x_{ta} variable de décision qui détermine si on fait l'action a au temps t

C_{ta} coût d'une intervention a appliquée à la période t

QC_t état de la chaussée à la période t

ΔC_a effet de l'action a sur l'état de la chaussée

$QC_{\min}$ seuil minimum acceptable de l'état de la chaussée

QA_t état de l'aqueduc à la période t

ΔA_a effet de l'action a sur l'état de l'aqueduc

$QA_{\min}$	seuil minimum acceptable de l'état de l'aqueduc
QE_t	état de l'égout à la période t
ΔE_a	effet de l'action a sur l'état de l'égout
$QE_{\min}$	seuil minimum acceptable de l'état de l'égout

L'équation 3.19 montre la contrainte de faisabilité où une seule action est posée à chaque année. Les équations 3.20 à 3.22 illustrent les contraintes d'acceptabilité sur chaque infrastructure. Les contraintes impliquent qu'en tout temps, l'état de chaque infrastructure doit être supérieur au seuil minimum acceptable. Enfin, l'équation 3.23 correspond à la contrainte d'intégrité.

La formulation retenue du problème de minimisation n'engendre aucune interaction entre les tronçons. Ainsi, la valeur du coût minimal pendant la période de conception reste inchangée, que le problème soit traité séparément ou globalement. Par conséquent, le problème est résolu en appliquant la méthode d'optimisation successivement sur chaque tronçon. Le coût minimal global de l'ensemble des infrastructures concernées représente la somme des coûts minimaux de chaque tronçon.

L'approche du SAGE est originale. La tendance en gestion des infrastructures, comme celle que préconise Harfan, est d'optimiser chaque réseau séparément et par la suite intégrer le tout pour produire une recommandation d'intervention. Dans ce cas, chaque réseau est généralement optimisé globalement pour répondre à des contraintes budgétaires. L'intégration s'effectue a posteriori de l'optimisation. Par contre, dans la mise de l'avant dans cette thèse, l'intégration est intrinsèque au processus d'optimisation et cela pour deux raisons : le calcul même de l'optimisation et l'incorporation d'économies dans les paramètres du coût. La recherche du coût s'effectue sans discernement du type d'infrastructures ni de leur état et envisage toutes les solutions possibles. Les paramètres d'économies permettent aux gestionnaires de profiter d'une

réduction des coûts lorsque des interventions de reconstruction de la chaussée et d'au moins une des conduites souterraines simultanément. Cette économie exprimée sous la forme d'un escompte permet d'ajuster le coût de certaines des interventions et de modifier ainsi les paramètres de la fonction objectif. Il s'agit ici d'un véritable processus d'intégration.

3.7 Complexité de résolution

Fwa et al. (1998) soulignent les problèmes de complexité concernant la programmation des interventions dans un système de gestion des chaussées. La programmation des activités au niveau réseau sur une période de planification de plusieurs semaines, de plusieurs mois ou même en années dans le cas de la planification de budget, est un problème complexe. Cette complexité résulte du nombre habituellement élevé de sections de chaussée qui doivent être considérées et les différences dans des caractéristiques de la chaussée en termes de conception, âge, historique d'entretien, et de charges de trafic. D'autres paramètres s'ajoutent, incluant les types de déformation de la surface, les niveaux de la sévérité et les méthodes d'entretien ou de réparation. Ensemble ils forment un problème extrêmement lourd qui est connu en tant que «explosion combinatoire».

Un exemple simple est illustré avec un petit réseau de dix sections de route. En supposant qu'il y a quatre activités de réparation et trois niveaux de sévérité, l'analyse doit choisir les interventions d'entretien à être exécutées chaque semaine sur une période de 12 semaines, c'est-à-dire approximativement trois mois. Ce problème comprend $10 \times 4 \times 3$ soit 120 variables de décision et le nombre de solutions possibles d'interventions hebdomadaires est égal à $(12 + 1)^{120}$ ou $4,7 \times 10^{133}$. Cela exige un ordinateur performant pour énumérer toutes les solutions possibles.

En gestion des chaussées, le problème de programmation renferme d'autres difficultés comme la détérioration des chaussées dans le temps et des contraintes des ressources telles que le budget, le personnel, l'équipement et les matériaux. Dans ce genre de problème, il est quasi impossible d'identifier la solution optimale globale ; cela engendre de grandes difficultés dans l'application des techniques conventionnelles d'optimisation. C'est là où les méthodes heuristiques deviennent un outil attrayant pour fournir suffisamment de bonnes solutions, proches de l'optimal.

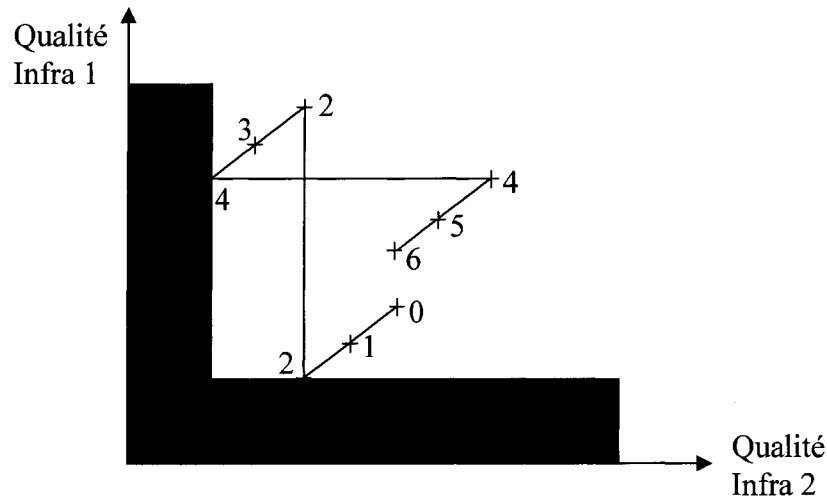
CHAPITRE 4

STRATÉGIE DE RÉOLUTION

Ce chapitre traite de la stratégie de résolution en justifiant le choix de l'approche linéaire. Il se poursuit avec un bref rappel de la programmation linéaire et la programmation en nombre entier. Enfin, la programmation en nombre entier binaire est présentée en mettant l'accent sur sa résolution basée sur le principe de l'énumération implicite et l'algorithme additif.

4.1 Méthodes de résolution

Le problème formulé consiste à minimiser les coûts pendant le cycle de vie des infrastructures tout en maintenant la qualité de chacune d'elles au-dessus d'une limite fonctionnelle. Le problème peut être visualisé dans un espace multidimensionnel où chaque axe représente l'état de chaque infrastructure. Le graphique 15 illustre un espace bidimensionnel de la zone de solutions réalisables où deux infrastructures sont prises en considération; les chiffres représentent la période de planification.



Graphique 15 Espace multidimensionnel de la zone de solutions réalisables

Le même concept s'applique lorsqu'il y a présence de plusieurs infrastructures sur un même tronçon mais sa représentation graphique est moins évidente. La formulation énoncée au chapitre 3 présente un modèle d'intégration des trois infrastructures municipales que sont la chaussée, l'aqueduc et l'égout.

Le peu de données disponibles dans les administrations municipales ne peuvent imposer un modèle plus complexe. Bien qu'il soit possible d'envisager des modèles non linéaires, la pertinence de ceux-ci et le coût de collecte de données supplémentaires sont deux raisons pour lesquelles le modèle linéaire s'impose. Le problème est formulé en analysant les besoins des gestionnaires tout en répondant aux attentes du milieu municipal. Le choix de la méthode de résolution n'a pas influencé la modélisation de la prise de décision, c'est-à-dire que la fonction objectif n'est pas linéaire parce qu'elle est plus facile à résoudre mais elle l'est parce qu'elle répond aux besoins. Le modèle est simple, alors pourquoi ne pas en exploiter ses avantages?

Une fois le problème d'optimisation posé, le choix de la méthode de résolution est étudié. Puisque le problème est linéaire, plusieurs méthodes sont applicables, des plus classiques aux plus modernes. Les premières proviennent de la programmation linéaire et comprennent le programme en nombre entier et la programmation en nombre entier binaire. Cette dernière exploite les caractéristiques des variables binaires et des algorithmes, dont celui de Balas qui date de 1965, sont encore très pertinents. Les méthodes plus modernes sont dérivées de l'intelligence artificielle et connaissent un essor grâce au développement des ordinateurs. La revue de la littérature fait référence à plusieurs articles basés sur les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones. Ces méthodes sont expérimentées par des chercheurs qui les appliquent aux infrastructures civiles. Bien que les résultats soient satisfaisants, l'ingénieur praticien demeure perplexe devant des situations qu'il ne maîtrise pas entièrement et redoute le phénomène de la «boîte noire» où un résultat sort on ne sait trop d'où. Pour ces raisons, dans un esprit pragmatique et puisque la situation le permet, la méthode de résolution sera, comme le

modèle retenu, le plus simple possible. Ainsi, le principe de l'énumération implicite est appliqué aux infrastructures civiles. L'informatique a tellement progressé depuis que la théorie de l'algorithme additif de Balas existe que toutes ses caractéristiques n'ont pas été exploitées à son plein potentiel.

4.2 Programmation linéaire

La programmation linéaire est une technique mathématique qui permet de choisir la meilleure solution parmi un éventail de possibilités réalisables. Elle est applicable lorsque toutes les relations impliquées dans le modèle sont linéaires. Plusieurs auteurs dont Hillier et Lieberman (1995) présentent la programmation linéaire comme une branche de la recherche opérationnelle permettant de résoudre de nombreux problèmes économiques et industriels. La formulation d'un problème sous la forme d'un programme linéaire est réalisée en quatre étapes :

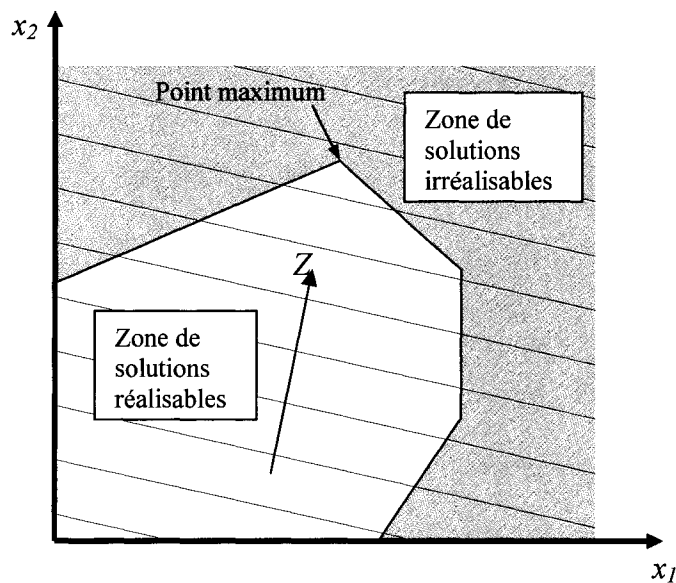
- a. la compréhension et la clarification du problème;
- b. l'identification et le choix des variables de décision qui sont les inconnues du problème;
- c. la fixation des objectifs à atteindre en précisant le type d'optimisation, soit la maximisation ou la minimisation de la fonction linéaire comprenant les variables de décision;
- d. la précision des contraintes du problème, celles-ci étant exprimées sous forme linéaire par rapport aux variables de décision.

Shenoy (1989) expose les hypothèses de la programmation linéaire qui rappellent les exigences de base qui doivent être présentes dans le problème:

- a. la fonction objectif doit être bien définie;
- b. les ressources sont limitées;
- c. les variables de décision sont reliées entre-elles en termes d'utilisation des ressources;

- d. le problème doit permettre des solutions alternatives;
- e. les contraintes et la fonction objectif sont linéaires;
- f. les gains ou coûts et les consommations de ressources sont proportionnels;
- g. les variables de décision sont strictement positives;
- h. les activités et les ressources ont un caractère fini;
- g. les variables sont divisibles;
- h. les données sont de type déterministe.

Le domaine de faisabilité définit la zone de solutions réalisables; celui-ci est représenté à l'aide de fonctions exprimant les contraintes. Le graphique 16, adapté de Hazelrigg (1996), visualise un problème de programmation linéaire à deux dimensions.



Graphique 16 Illustration d'un problème de programmation linéaire
(Traduit de Hazelrigg, 1996)

Les contraintes spécifient les limites du domaine réalisable : elles le ceinturent afin d'obtenir une zone convexe. La convexité signifie que si une ligne relie deux points de la zone réalisable, elle est située entièrement dans celle-ci. La flèche indique la direction

de la fonction Z à maximiser. Un problème à deux dimensions se visualise aisément : la solution optimale est indiquée par le point maximum situé à la limite du domaine réalisable. Un modèle linéaire comportant n variables de décision est écrit sous la forme suivante :

$$\text{Maximiser (ou minimiser)} \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (4.1)$$

sujet à

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \begin{pmatrix} \leq \\ \geq \\ = \end{pmatrix} b_i \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

$$x_j \geq 0 \quad (4.3)$$

Les deux contraintes de ce modèle linéaire sont de types différents : la première, l'inéquation 4.2, est dite technologique en référence aux premières applications historiques souvent tirées de contextes industriels; la seconde, l'inéquation 4.3, dite de non négativité, est habituellement requise pour chaque variable du modèle.

Les techniques de résolution sont regroupées selon deux familles qui, toutes deux, analysent progressivement une série de solutions, jusqu'à l'atteinte d'une solution qui satisfait les conditions pour un optimum donné. Dans le premier groupe, l'algorithme du simplexe permet de résoudre de tels modèles linéaires comportant des contraintes de ces deux types. Cet algorithme développé par Dantzig en 1947 et publié en 1949, est décrit dans plusieurs ouvrages de programmation mathématique dont celui de Hillier et Lieberman (1995). Dans le second groupe, les méthodes de barrière ou de point intérieur visitent des points à l'intérieur de la zone de faisabilité.

Dans de nombreuses situations, les variables de décision doivent prendre des valeurs particulières, notamment des valeurs entières pour que leur signification ait du sens; pour ce faire, des contraintes supplémentaires dites contraintes d'intégrité sont ajoutées

au modèle afin d'imposer des valeurs entières aux variables de décision. Un tel modèle linéaire est nommé «programmation en nombre entier» ou «programme linéaire en nombre entier».

Dans d'autres cas, il existe différentes variantes selon la formulation du modèle : lorsque certaines variables sont entières et d'autres réelles, le modèle est appelé «programme linéaire en nombre entier mixte» ou «*mixed integer programming*» alors que si toutes les variables sont entières, il faut parler de «programme linéaire totalement en nombre entier» ou «*pure integer programming*».

Dans le cas à l'étude, pour être significatives, les variables de décision doivent être binaires, c'est-à-dire qu'elles prennent la valeur de 0 ou 1 selon que la décision est «oui ou non» ou «faire ou ne pas faire». Le modèle est alors qualifié de «programmation en nombre entier binaire» ou «*binary integer programming*».

4.3 Programmation en nombre entier

La programmation en nombre entier est un cas particulier, que plusieurs auteurs appellent extensions, de la programmation linéaire dans lequel une contrainte supplémentaire est ajoutée. Un programme linéaire en nombre entier comportant n variables de décision reprend la forme du modèle linéaire décrit dans les équations 4.1 à 4.3 et ajoute une condition aux contraintes qui impose que les variables x_j soient des nombres entiers. Le modèle est alors écrit sous la forme suivante :

$$\text{Maximiser (ou minimiser)} \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (4.4)$$

sujet à

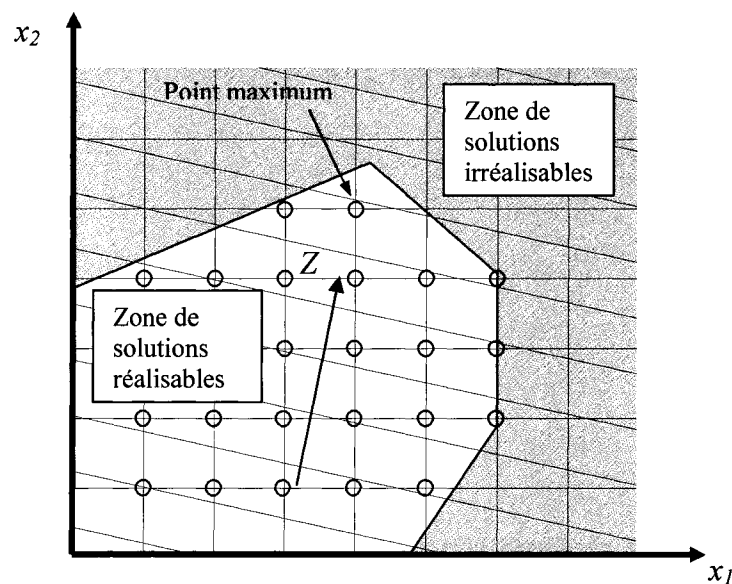
$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \begin{pmatrix} \leq \\ \geq \\ = \end{pmatrix} b_i \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{valeurs entières pour } j = 1, 2, \dots, s \quad (4.7)$$

Le terme c_j représente les paramètres du modèle défini à la section 3.6 du chapitre précédent sur la formulation de la fonction objectif. Dans le cas où $s = n$, toutes les variables sont entières et le problème est appelé «programme linéaire totalement en nombre entier», tandis que si $s < n$, seulement s parmi les n variables sont entières et le problème est un «programme linéaire en nombre entier mixte».

Le modèle de programmation en nombre entier est représenté au graphique 17 adapté de Hazelrigg (1996). Celui-ci propose un problème de programmation en nombre entier à deux dimensions. Comme pour la programmation linéaire, les contraintes spécifient les limites du domaine réalisable en le ceinturant. Les seules solutions admissibles sont celles identifiées par un cercle sur la figure ci-dessous.



Graphique 17 Illustration d'un problème de programmation en nombre entier
(Traduit de Hazelrigg, 1996)

La résolution d'un programme en nombre entier repose sur l'une des deux familles de méthodes actuellement connues soit les méthodes de recherche arborescente et les méthodes de coupes. D'après Minoux (1989), les méthodes d'arborescence sont les plus largement utilisées alors que les méthodes de coupes ont permis de résoudre des problèmes particuliers de type partitionnement ou recouvrement. La méthode la plus populaire pour solutionner ce genre de problème est la méthode de séparation et évaluation progressive ou «*branch-and-bound technique*»; cette méthode s'appuie sur l'énumération successive des solutions entières réalisables.

4.4 Programmation en nombre entier binaire

Cette section présente la programmation en nombre entier binaire. Nemhauser (1999) indique que ce type de problème peut être résolu avec des algorithmes généraux tels la méthode de séparation et évaluation successive. Cependant, les problèmes de programmation en nombre entier binaire comportent des propriétés qui peuvent être exploitées pour redéfinir un algorithme de résolution plus efficace. Dans cette section, la formulation du problème est exposée, ainsi que le principe d'énumération implicite. L'algorithme de résolution développé est l'algorithme additif conçu par E. Balas.

4.4.1 Formulation du problème

Le problème de programmation en nombre entier binaire est écrit sous sa forme originale en termes de maximisation. Il s'agit du problème primal représenté ci-dessous :

$$\text{Maximiser } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (4.8)$$

sujet à

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.10)$$

Les variables de décision et les paramètres du modèle sont définis au chapitre 3 sur la modélisation de la prise de décision, notamment à la section 3.6 sur la formulation de la fonction objectif. Le problème dual correspondant utilise les mêmes paramètres à des endroits différents; celui-ci est écrit de la façon suivante :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^m b_i y_i \quad (4.11)$$

sujet à

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq c_j \text{ pour } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.12)$$

$$y_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

Dans le cas du problème de maximisation, les contraintes sont écrites sous la forme «plus petit ou égal». Lorsque des contraintes sont écrites sous d'autres formes, elles doivent être transformées pour que l'algorithme puisse être appliqué. Si une contrainte donnée est du type «plus grand ou égal», la substitution suivante est nécessaire :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \Rightarrow \sum_{j=1}^n -a_{ij} x_j \leq -b_i \quad (4.14)$$

Si une contrainte est écrite sous la forme d'une égalité, elle doit être remplacée par les deux inégalités suivantes :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \Rightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \\ \sum_{j=1}^n -a_{ij} x_j \leq -b_i \end{cases} \quad (4.15)$$

On suppose également que tous les coefficients c_j de la fonction objectif sont strictement négatifs, c'est-à-dire non positifs. Si le coefficient c_j est plus grand que 0, toujours dans le cas d'un problème de maximisation, la variable x_j est remplacée par $1 - x'_j$ où x'_j est une variable binaire.

Dans le cas de minimisation, la variable x_j est remplacée soit par x'_j lorsque le coefficient c_j est plus grand ou égal à 0, soit par $1 - x'_j$ lorsque c_j est plus petit que 0. Cette transformation crée des constantes du côté gauche des contraintes; celles-ci doivent alors être déplacées vers la droite. Pendant l'optimisation, ces termes constants sont ignorés, mais considérés et retransformés quand la solution est trouvée.

4.4.2 Principe d'énumération implicite

Glover (1965) mentionne quatre groupes d'algorithmes pouvant résoudre des problèmes de programmation en nombre entier binaire. Il s'agit de :

- a. ceux qui utilisent la méthode des plans sécants;
- b. ceux qui appliquent des déplacements à l'équation de la fonction objectif;
- c. ceux basés sur l'algèbre booléenne;
- d. ceux qui utilisent des méthodes combinatoires pour énumérer un sous-ensemble restreint de solutions réalisables.

La méthode d'énumération implicite appartient à ce dernier groupe pour lequel plusieurs formes d'énumérations, rapportées par Glover (1965), ont été proposées dans la littérature. Parmi celles-ci, la méthode originale de l'algorithme additif développée par Balas permet de résoudre des programmes linéaires avec des variables binaires sans exploiter les techniques de programmation linéaire pour trouver les limites supérieures. Garkinkel et Nemhauser (1972) précisent que cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes où les variables sont binaires et nombreuses.

Balas (1965) a mis de l'avant le concept de l'algorithme additif en le comparant avec l'approche exhaustive où toutes les solutions possibles doivent être évaluées. Comme les variables peuvent prendre seulement les valeurs 0 ou 1, l'ensemble de toutes les solutions est fini et contient 2^n éléments où n est le nombre de variables x_j ; la figure 26 représentant un problème à 5 variables illustre l'énumération explicite.

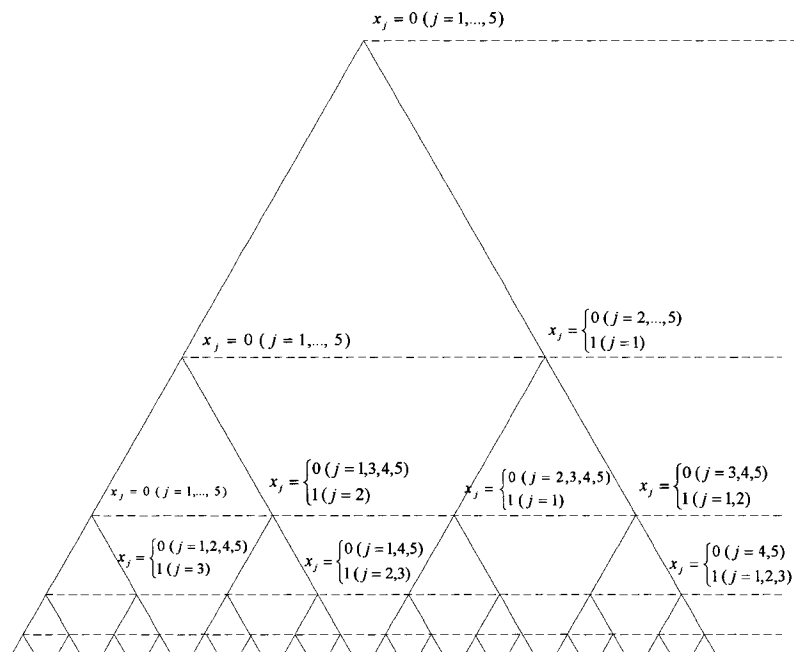


Figure 26 Énumération explicite d'un problème à 5 variables
(Tirée de Balas, 1965)

À partir du niveau zéro situé en haut de la figure où $S_j = 0 (j = 1, \dots, 5)$, c'est-à-dire toutes les variables ont la valeur 0, les valeurs 0 et 1 sont attribuées tour à tour aux variables des autres niveaux. Ainsi, en continuant cette procédure avec toutes les variables, il existe 2^n combinaisons de solutions, c'est-à-dire 32 possibilités dans le cas de la figure 26. Cette méthode simple et exhaustive pour résoudre des problèmes en nombre entier consiste à envisager toutes les solutions possibles : c'est le principe de l'énumération explicite.

Le désavantage évident de l'énumération explicite est que le nombre de solutions est colossal et que le temps de calcul pour l'obtenir est démesuré. Cependant, dans le cas de l'énumération implicite, l'algorithme additif établit des règles selon lesquelles quelques branches seulement de l'arbre sont traitées et les autres négligées. À partir d'une solution initiale où $S_j = 0$ ($j = 1, \dots, 5$), la valeur 1 est attribuée à quelques variables des 2^n combinaisons de telle façon que, soit une solution est obtenue, soit aucune solution réalisable n'existe.

Les règles de cet algorithme déterminent à chaque itération le sous-ensemble de variables auquel la valeur 1 peut être attribuée, et la variable est choisie parmi celles-ci. À certaines étapes, une solution est soit trouvée soit inexistante. Le processus est alors arrêté et recommencé à partir d'une étape précédente. Les règles de l'algorithme additif identifient les branches de l'arbre des solutions qui peuvent être abandonnées parce qu'elles ne peuvent mener à une meilleure solution.

Taha (1975) expose cette approche avec un exemple et considère l'évaluation de toutes les solutions possibles de l'inégalité suivante :

$$3x_1 - 8x_2 + 5x_3 \leq -6 \quad x_j = \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (4.16)$$

Un regard rapide sur cette contrainte montre que x_2 doit être fixé à 1 dans un premier temps. En effet, toutes les solutions où $x_2 = 0$ ne peuvent conduire à une solution réalisable. Ainsi, les quatre combinaisons de (x_1, x_2, x_3) identifiées $(0, 0, 0)$, $(1, 0, 0)$, $(0, 0, 1)$ et $(1, 0, 1)$ sont automatiquement écartées et considérées comme énumérées implicitement.

Étant donné que $x_2 = 1$ est requis pour obtenir une solution réalisable, l'inégalité est respectée par $-6 - (-8)$ soit 2 unités. Dans ce cas, x_1 ou x_3 ou les deux variables peuvent prendre la valeur 1 seulement si leur coefficient ne génère pas une valeur supérieure à 2 du côté gauche de l'inéquation. Puisque le coefficient de x_1 est 3, la valeur 0 doit être

attribuée à x_1 et les combinaisons (1, 1, 0) et (1, 1, 1) sont automatiquement rejetées et considérées comme énumérées implicitement. Aussi, le coefficient x_3 est 5, la valeur 0 lui est fournie et la combinaison (0, 1, 1) est refusée. La seule possibilité restante est la combinaison (0, 1, 0) qui est l'unique solution réalisable de l'inégalité.

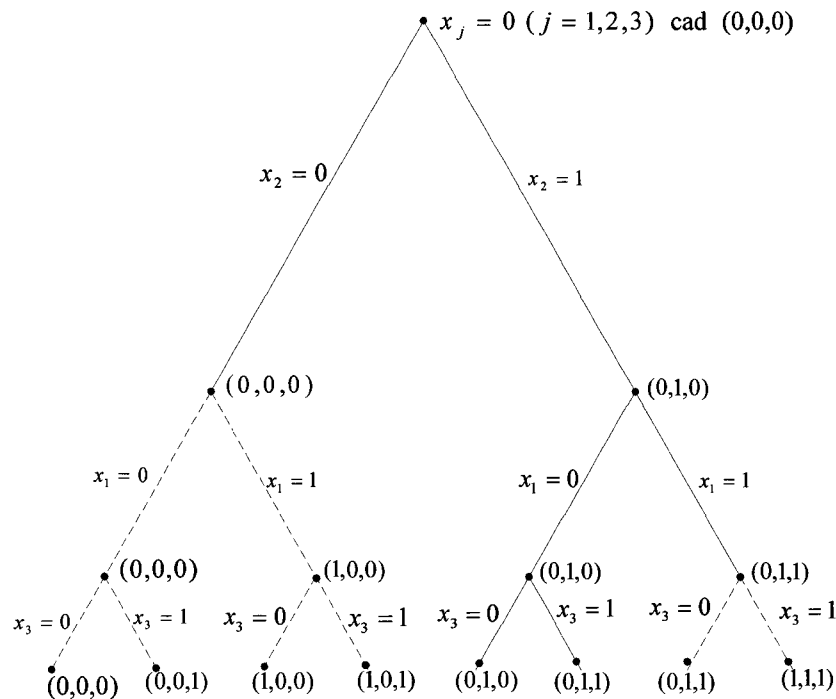


Figure 27 Énumération implicite d'un problème à 3 variables
(Tirée de Balas, 1965)

La figure 27, inspirée de la figure 26 où l'énumération est explicite, illustre l'idée de base énoncée par E. Balas, qui sous-tend le principe de l'énumération implicite. À partir de la première évaluation où x_2 est fixé à 1, il est évident que les branches de l'arbre découlant du point où $x_2 = 0$ seront considérées sondées, cette expression est traduite de l'anglais «*fathomed*». Étant donné que $x_2 = 1$, la valeur 1 ne peut être attribuée à la variable x_1 car ce chemin ne mène à aucune solution réalisable; cette branche est alors déclarée sondée. Puis, la branche $x_3 = 1$ est invalide et la seule solution réalisable est

obtenue en plaçant $x_3 = 0$. Puisque les 2^3 , c'est-à-dire huit possibilités sont explorées, le problème est terminé.

4.4.3 Algorithme de résolution

L'algorithme additif de Balas (1965) consiste à améliorer une solution initiale optimale mais infaisable en partant d'une ou plusieurs variables dont la valeur binaire est fixée et en construisant «la solution» en fixant la valeur de nouvelles variables. Pour adopter l'énumération implicite comme technique de résolution, il est nécessaire de définir une relaxation qui fournit des limites d'acceptabilité en vérifiant la faisabilité.

Une relaxation très simple d'un problème de programmation en nombre entier consiste à utiliser seulement des additions afin d'obtenir la solution. C'est pourquoi Egon Balas a nommé son concept original «algorithme additif». Par la suite, cette méthode a subi des améliorations proposées entre autres par Glover (1965) et Petersen (1967); désormais, cet algorithme est mieux connu sous la dénomination de «énumération implicite».

La logique qui sous-tend cet algorithme repose sur la méthode du simplexe utilisée en programmation linéaire. Par contre, les règles de choix des variables entrantes telles que définies à la section 4.2.1, sont passablement différentes. Aussi, il n'y a pas de variables sortantes, dans le sens où elles sont désignées dans la méthode du simplexe décrite précédemment.

La formulation du problème posé aux équations 4.8 à 4.10 et transformé avec les règles de substitutions écrites aux équations 4.14 et 4.15 doit être convertie en un problème de minimisation. Avec cette transformation, les coefficients c_j négatifs de la fonction objectif de maximisation se retrouvent positifs dans la fonction objectif de minimisation.

Les contraintes représentées par des inégalités sont initialement ramenées à la forme «plus grand ou égal» avant d'être converties à une forme normalisée avec l'ajout de variables d'écart S_i .

Le problème initial est le suivant :

$$\text{Minimiser } z = (c_1, c_2, \dots, c_n) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

sujet à

$$\left[\begin{array}{cccc|cccc} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.19)$$

$$S_i \geq 0 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.20)$$

avec $c_j \geq 0$ pour tout j . Sous une forme matricielle, avec comme convention que les matrices sont exprimées en caractères gras majuscules et que les vecteurs sont en caractères gras minuscules, le problème se pose ainsi :

$$\text{Minimiser } z = \mathbf{CX}, \quad \mathbf{C} \geq \mathbf{0} \quad (4.21)$$

sujet à

$$\mathbf{AX} + \mathbf{S} = \mathbf{b} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{S} \geq \mathbf{0} \quad (4.23)$$

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.24)$$

La fonction objectif est d'abord convertie sous la forme de minimisation en utilisant la règle de substitution suivante :

$$x_j = \begin{cases} x'_j & \text{pour } c'_j \geq 0 \\ 1 - x'_j & \text{pour } c'_j < 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Le problème est alors défini :

$$\text{Minimiser } z = \sum_{j \in N} c_j x_j \quad c_j \geq 0 \quad j \in N = \{1, 2, \dots, n\} \quad (4.26)$$

sujet à

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j + S_i = b_i \quad i \in M = \{1, 2, \dots, m\} \quad (4.27)$$

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad j \in N \quad (4.28)$$

$$S_i \geq 0 \quad i \in M \quad (4.29)$$

Cette nouvelle formulation indique que le problème débute avec une solution définie comme optimale mais non réalisable. Si la solution de départ était à la fois optimale et réalisable, elle ne pourrait être améliorée et deviendrait la solution optimale recherchée. En appliquant les règles de la méthode du simplexe pour déterminer la solution de départ, les variables de décision x_j sont initialisées à 0 et la solution de base, par définition non réalisable, est :

$$z_0 = 0, \quad S^0 = \mathbf{b} \quad (4.30)$$

Pour représenter les valeurs binaires des variables $x_1, x_2, \dots, x_n$ du problème, une solution partielle est définie par un sous-ensemble J comprenant ces n variables auxquelles sont associées les n valeurs binaires. Par exemple, pour un problème à 5 variables, le sous-

ensemble $J = \{x_2 = 1, x_4 = 1, x_1 = 0\}$ montre une solution partielle; les variables qui ne sont pas incluses dans cette solution, x_3 et x_5 , sont appelées «variables libres» et, dans un premier temps, la valeur 0 leur est attribuée.

Pour faciliter la compréhension, il est établi par convention, que la représentation de la solution est notée $+j$ et $-j$ pour indiquer respectivement $x_j = 1$ et $x_j = 0$. Ainsi, l'information $x_2 = 1, x_4 = 1$ et $x_1 = 0$ est résumée dans un vecteur $J = \{+2, +4, -1\}$. La solution partielle est complétée avec l'introduction des variables libres qui peuvent prendre l'une ou l'autre des deux valeurs binaires. En anglais, cette opération s'appelle, «*completion* » qui pourrait être traduite par complètement ou achèvement. Wu (1981) décrit cette étape comme l'assignation d'une valeur 0 ou 1 à une des variables libres. Ainsi, au cours de la progression dans la résolution du problème, les variables deviennent fixées.

La solution de départ notée $S^0 = \mathbf{b}$ posée à l'équation 4.30 à l'itération 0, c'est-à-dire que $S_i^0 = b_i$, est produite par les variables de décision préalablement initialisées à 0; la solution partielle correspondante est $J_0 = \emptyset$ c'est-à-dire un ensemble vide indiquant qu'aucune variable n'est entrée dans l'ensemble J à l'itération 0 et que toutes les variables libres sont fixées à 0. Si les M variables d'écart sont, à l'itération initiale, $S_i^0 \geq 0$, la solution $J_0 = \emptyset$ est optimale et toutes les variables de décision conservent leur valeur 0.

La procédure consiste à choisir une ou plusieurs variables qui prendront la valeur 1 afin de faire partie de la solution J_1 à la première itération. Pour qu'une variable de décision entre dans l'ensemble J_1 , il faut que la solution partielle résultante J_1 soit réalisable. Dans le cas contraire où aucune variable ne peut répondre à cette condition, le problème ne contient pas de solution réalisable. Avec la nouvelle solution partielle J_1 , l'ajout

d'une variable libre, une à une, produira autant de solutions partielles $J_1, J_2, \dots, J_t$ qui, une fois complétées, dégageront, si $S \geq 0$, une solution réalisable.

À l'itération t , l'ensemble J_t est la solution partielle courante; les valeurs des variables d'écart sont définies par l'équation suivante :

$$S_i^t = b_i - \sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} a_{ij} \quad i \in M \quad (4.31)$$

Dès la première occurrence d'une solution réalisable, la valeur correspondante de la fonction objectif est conservée en mémoire dans la variable $z_{\min}$ comme étant la meilleure jusqu'à maintenant. Quant à l'évaluation de la fonction objectif à l'itération t , sa valeur z^t est calculée avec l'équation suivante :

$$z^t = \sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} c_j \quad (4.32)$$

Lors d'une itération subséquente, une solution réalisable ne fournissant pas un meilleur $z_{\min}$ est rejetée. Par contre, si un meilleur $z_{\min}$ est obtenu, celui-ci est ajusté en conséquence. En fait, $z_{\min}$ est initialisé à l'infini ($z_{\min} = \infty$) et agit comme une limite supérieure ajustable de la valeur de la fonction objectif.

Dès que le complètement d'une solution partielle produit une meilleure valeur à $z_{\min}$ ou lorsque aucun complètement ne peut améliorer la valeur de $z_{\min}$, la solution partielle est déclarée sondée, c'est-à-dire «*fathomed*». Dans ce cas, tous les compléments de cette solution partielle ont été implicitement énumérés et évalués, et ceux-ci seront exclus des itérations subséquentes.

L'analyse se poursuit avec une procédure à rebours «*backtracking*» ou «retour arrière», qui consiste à générer une solution partielle à partir de l'élément précédant immédiatement la solution sondée. Si le test de sondage ne peut confirmer la solution

partielle J_i , une ou plusieurs variables libres prennent la valeur 1 en suivant la procédure à rebours.

La nouvelle solution partielle est alors évaluée en vérifiant son sondage, et ainsi de suite jusqu'à ce que les 2^n solutions possibles du problème soient énumérées, implicitement ou explicitement. Après que la procédure à rebours soit complétée, la dernière valeur calculée de la variable $z_{\min}$ indiquera la solution optimale du problème. Au cas où la variable $z_{\min}$ aurait conservé sa valeur à l'initialisation, c'est-à-dire l'infini, le problème ne présente aucune solution réalisable.

La description de la procédure détaillée comprenant le choix de la variable entrante, la résolution de la nouvelle solution, la détermination de la solution optimale et la procédure à rebours est présentée à l'annexe 1. Un logigramme de l'énumération implicite ainsi qu'un exemple numérique simple figurent également à cette annexe.

CHAPITRE 5

VALIDATION DU SAGE

Avant de détailler les caractéristiques du prototype SAGE et d'en analyser les résultats, la situation géographique et historique de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal est succinctement exposée. Les systèmes de gestion des infrastructures municipales en vigueur sur ce territoire sont ensuite présentés, ainsi que les façons de faire en ce qui a trait aux chaussées et aux réseaux d'égouts et d'aqueduc. Par la suite, le fonctionnement du prototype SAGE est illustré sous forme de pages-écrans du module de calcul et celles montrant les résultats d'analyse sur un tronçon donné et sur l'ensemble du réseau. Enfin, une analyse de sensibilité est réalisée pour expliquer les résultats obtenus.

5.1 Situation géographique et historique de l'arrondissement Verdun

Depuis toujours, les municipalités se doivent de maintenir en bon état l'ensemble de leurs infrastructures municipales et plus particulièrement les chaussées, les réseaux d'aqueduc, les réseaux d'égouts et les autres services d'utilités publiques tels les trottoirs, les bordures et les parcs. Dans le contexte actuel, il importe de cibler les meilleures interventions pour qu'elles soient rentables au point de vue économique, social et politique. L'arrondissement Verdun n'échappe pas à cette règle et effectue tout ce qui est possible de faire pour maintenir l'état de ses infrastructures à un niveau acceptable.

En préambule à la présentation des ouvrages d'infrastructures de Verdun, il est intéressant de situer ce territoire par rapport à la ville de Montréal et de dresser un bref historique de cet arrondissement en soulignant les faits marquants de la mise en place des différentes infrastructures.

5.1.1 Position géographique

L'arrondissement Verdun est un des 27 arrondissements qui, à la fin de 2005, composent la ville de Montréal. Verdun (2004) précise que le territoire occupe une superficie de 9,9 km². Cet arrondissement, en partie riverain du fleuve Saint-Laurent et en partie insulaire, est situé au sud-ouest de Montréal.

Depuis 1956, deux secteurs composent le territoire de Verdun : d'une part, l'Île des Sœurs (3,8 km²) accessible par le pont Champlain à partir de la rive sud et par l'autoroute Bonaventure venant de l'est, et d'autre part, la partie terrestre (6,1 km²) bornée au nord par l'autoroute 15, à l'ouest par le canal de l'Aqueduc, au sud par l'arrondissement de LaSalle et à l'est par le fleuve Saint-Laurent. L'accès se fait par l'autoroute 15 dans le secteur est, par le boulevard de La Vérendrye au nord et par le boulevard LaSalle à l'ouest. D'ailleurs, ce dernier traverse d'ouest en est tout l'arrondissement Verdun, engendrant ainsi une imposante circulation sur son territoire. La figure 28 montre la place qu'occupe Verdun sur l'île de Montréal.

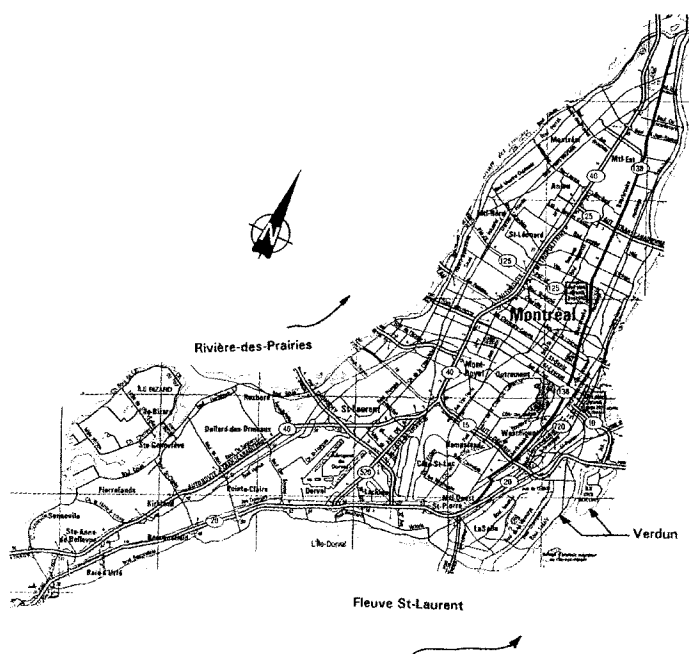


Figure 28 Localisation de Verdun sur le territoire de l'île de Montréal

5.1.2 Historique de l'arrondissement Verdun

Déziel (1976) relate que les rivages de Verdun ont été connus et parcourus bien avant le XVII^{ième} siècle, au moins par les Iroquois. Le premier européen à poser le pied à Verdun n'est pas Jacques Cartier, comme certains historiens l'ont déjà pensé, mais Samuel de Champlain qui s'est rendu jusqu'au pied des rapides de Lachine. À cette époque, Verdun est subdivisé en vingt-quatre concessions inscrites, entre la petite rivière Saint-Pierre et le fleuve Saint-Laurent, au livre terrier des seigneurs de Montréal. Zacharie Dupuis, alors gouverneur intérimaire de Montréal, a nommé son fief Verdun en 1671, en souvenir de son village natal de Notre-Dame de la Saverdun, du comté de Foix dans l'Ariège en France.

Le territoire de Verdun a reçu à travers le temps plusieurs désignations dans des écrits divers. Il s'est appelé Côte du Sault Saint-Louis, Côte de Verdun, Côte des Argoulets, fief de Verdun, Pointe Saint-Louis et Côte de la Rivière Saint-Pierre. Ce territoire est devenu un village en 1875. Au début, il porte le nom de Village de la Rivière Saint-Pierre et en 1878, il devient le village de Verdun. Les débuts de la ville furent assez modestes en raison des inondations de son territoire, une bonne partie de l'année. Ce n'est qu'en 1895, année de la construction d'une digue contrôlant les inondations, que le développement de la ville se fait peu à peu sentir.

5.1.3 Historique des ouvrages d'infrastructures

Le canal Lachine est le plus ancien des canaux du Canada. Les premiers projets, commencés en 1692, avaient pour but d'éviter les rapides pour aller de Montréal à Lachine en utilisant le lit de la rivière Saint-Pierre. Les premiers travaux de construction, débutés en 1700 ont été abandonnés pour être refaits entre 1818 et 1825.

Un des premiers ouvrages d'infrastructures construits sur le territoire de Verdun est le canal de l'aqueduc de Montréal. Celui-ci coule d'est en ouest le long de la limite nord de la municipalité. Le canal fut creusé entre 1852 et 1856 et élargi à plusieurs reprises. Aujourd'hui, le canal fait environ 30 mètres de largeur. En 1967, ces installations fournissent en moyenne 252 millions de gallons d'eau par jour, à 16 municipalités de l'île de Montréal. Avant la construction de ce canal, l'alimentation en eau potable se faisait à partir de puits privés, directement de la rivière Saint-Pierre ou du fleuve Saint-Laurent et par le biais de vendeurs d'eau qui passaient dans les rues avec leurs propres tonneaux.

La construction du premier réseau d'aqueduc a été complétée en 1908, ce qui a permis à la ville de Verdun d'alors d'être la première municipalité de l'île de Montréal à fournir de l'eau filtrée à ses citoyens. À cette époque, l'amenée de l'eau de Montréal à Verdun se faisait par une conduite de 100 mm de diamètre posée depuis la limite est, à la rivière Saint-Pierre, tout le long de la rue Wellington et sur le côté nord du chemin de Lachine. La construction de cette conduite a été faite dès 1894.

Les premiers trottoirs de bois, d'une longueur de 750 pieds sont également construits sur la rue Lachine cette même année. À la même époque, Verdun se dote d'une usine d'électricité lui permettant d'alimenter son territoire.

La qualité et le bon état des routes sont depuis longtemps des éléments importants pour les dirigeants de la ville. Dès 1878, un inspecteur des routes est nommé pour veiller à l'entretien des rues. La présence du canal empêchait les automobilistes de circuler librement de Verdun vers l'extérieur. Avant la construction du pont au-dessus du canal de l'aqueduc, la traversée se faisait par un service de traversier. Le premier pont a été construit aux alentours de 1920, dans le prolongement de la rue de l'Église. Un des services d'entretien routier qu'offrait la ville de Verdun était l'arrosage permettant d'abattre la poussière, cet arrosage se faisait à l'aide d'un tonneau de bois.

L'évolution rapide de la population autour des années 1910 a amené les instances de Verdun à établir un service de transport public. Le premier fut le service des diligences qui reliait le centre de Montréal et les villages de Lachine par la route qui longeait le fleuve. En 1900, le premier tramway électrique fait son apparition et il coûte 5 cents par voyage. Ce service prend fin en août 1959. Le service d'autobus prend la relève et en 1974, trois stations de métro sont construites sur le territoire de Verdun.

Après une croissance de la population entre 1924 et 1971, qui est passée de 32 583 habitants à 70 790 habitants, on assiste progressivement à une réduction de celle-ci, atteignant 49 307 habitants en 1991. Depuis ce temps, il a été possible d'observer une augmentation significative atteignant 64 576 habitants, en 1998. En 2001, le dernier recensement montre une diminution à 60 564 personnes, soit 3,3% de la population totale de la ville de Montréal.

5.2 Systèmes de gestion en vigueur à Verdun

Le système de gestion des infrastructures municipales est un des éléments qui constituent les systèmes de gestion en vigueur à Verdun. L'arrondissement assure plusieurs fonctions à la population dont les principales sont :

- a. transport;
- b. environnement;
- c. sécurité;
- d. services aux citoyens;
- e. loisirs;
- f. planification.

Le service des travaux publics remplit une double mission afin de satisfaire les besoins de la gestion opérationnelle et de la gestion stratégique. Ces deux unités offrent des services complémentaires, très liés et maintenant réunis dans le même service.

L'ancienne partie travaux publics voit à l'entretien général et des routes en particulier, ainsi que de l'approvisionnement. Plus spécifiquement, l'aqueduc, l'égout, la chaussée et les parcs et espaces verts sont de la responsabilité des travaux publics. Cette unité voit également au déneigement, en partenariat avec l'entreprise privée. Elle est aussi responsable des événements spéciaux, de la signalisation routière et des parcomètres.

La section appelée auparavant les services techniques est préoccupée par la gestion stratégique, de concert avec le service de l'aménagement urbain. Cette unité des services techniques joue le rôle de conseiller technique pour les autres services de l'arrondissement et coordonne les activités de quatre divisions soit le génie civil, la mécanique du bâtiment, l'électricité et la division du cadastre. La division de génie civil gère les réseaux des infrastructures :

- a. chaussées;
- b. trottoirs;
- c. égouts;
- d. conduites d'aqueduc;
- e. infrastructures civiles de la partie électrique.

5.2.1 Chaussées

Avant 1980, aucune conception des chaussées n'était effectuée sur la partie «terre ferme» de la ville de Verdun; l'approche était différente sur «l'Île des Sœurs» où les services de la firme Lavalin avaient été retenus. Le premier système de gestion des chaussées, celui du CRCAC, a été implanté en 1980 par Monsieur France Bernard, ing. La cueillette de données de ce système consiste en une inspection visuelle et une mesure de l'uni avec un roulemètre Mays. Après le diagnostic et l'analyse, la proposition retenue est affichée selon un code de couleur. Cette méthode fournit la liste des priorités d'intervention au niveau «réseau». Par la suite, la conception au niveau «projet» était réalisée pour les chaussées retenues.

En 1986, le logiciel PAVE, conçu par Messieurs Gadbois et Champagne, est calibré dans le même esprit que CRCAC de Monsieur Joseph Hode Keyser, c'est-à-dire en intégrant une inspection visuelle et une mesure de l'uni. L'équation initiale de PAVE, en 1986, est modifiée en 1991. Le logiciel est alors programmé dans le langage Turbo Pascal. La page-écran du menu principal est montrée à la figure 29. Des inspections ont été réalisées en 1987, 1989, 1991, 1993 et 1996.

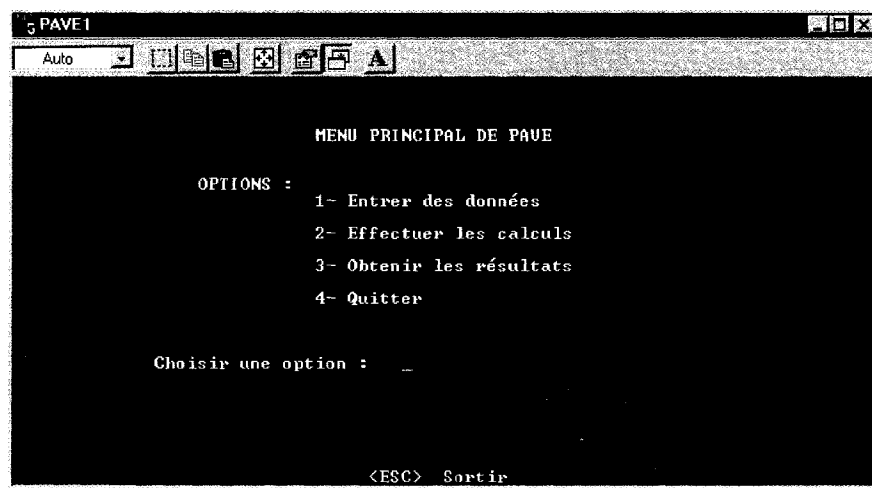


Figure 29 Page-écran de PAVE 1991

En 1991, le logiciel PAVER est disponible sur le marché. L'opportunité d'introduire ce logiciel est analysée, et rejetée à cause du phénomène de la «boîte noire» où le code source est inconnu. Pour les mêmes raisons, le logiciel Alizée du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) en France, subit le même sort.

Entre 1999 et 2002, le logiciel PAVE a été mis à jour avec une plate-forme reposant sur des bases de données. Le langage de programmation est remplacé par Microsoft Access afin de favoriser la compatibilité avec d'éventuels systèmes plus performants, comme SQL Serveur ou Oracle, de la ville de Montréal. Les données des années précédentes, notamment celles de 1991 et 1993, ont été extraites de la version précédente et incluses

dans PAVE 2002. Kali et al. (2001) décrivent la démarche retenue par Verdun pour mettre en œuvre le système de gestion des chaussées.

Le logiciel PAVE est le moteur du système de gestion de chaussée dont l'objectif principal est de produire et traiter de l'information pouvant conduire à une prise de décision éclairée. Les menus de PAVE 2002 sont affichés à l'écran. La page-écran du menu principal est montrée à la figure 30.

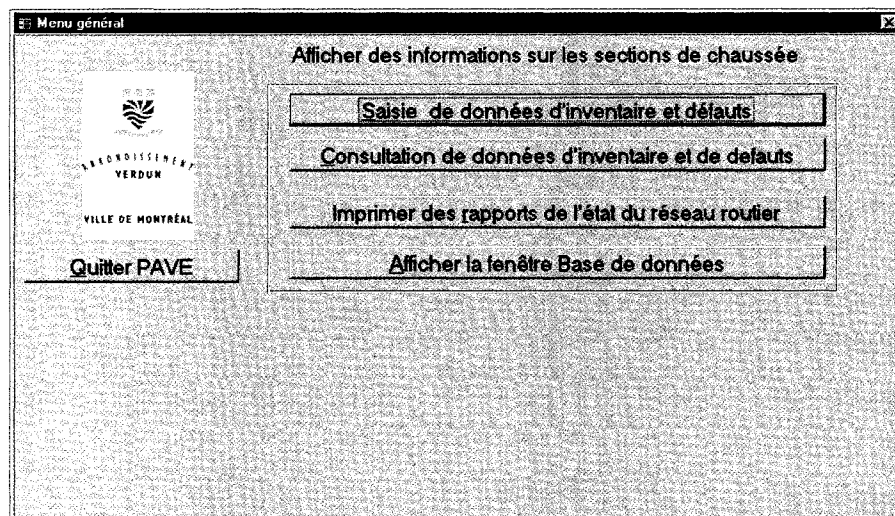


Figure 30 Page-écran du menu principal de PAVE 2002

Les défauts de surface sont saisis à l'écran tel que l'indique la figure 31. D'autres pages-écrans existent pour alimenter ou interroger les données concernant le roulement, la capacité structurale et les comptages de circulation. Il est aussi possible de questionner la base de données concernant la structure de la chaussée et l'historique des interventions.

Form Saisie défauts surface : Formulaire

Rue de Rushbrooke entre Boulevard Lasalle et Rue Caisse

Ajouter un relevé

Numéro section: 1226

25-06-2002

Paquette Julie

Pauvre

10- N.D.P.	11- FISSURE REGARD	12- DENIVELLEMENT REGARD	13- RAPEPAGE/CROUTE
1- TRANSVERSALE	2- LONGITUDINALE (hors piste)	3- LONGITUDINALE (en piste)	4- RIVE
6- CARRELAGE	7- LÉZARDE	8- AFFAISSEMENT/SOULÈVEMENT	9- DÉSENROBAGE/ARRACHEMENT

Sévérité faible 8 < ouverture ≤ 5 mm	Sévérité moyenne 5 < ouverture ≤ 20 mm	Sévérité majeure 20 > ouverture	
Surface (m²)	2	57	29

Menu

Entr: 14 85 sur 628

Figure 31 Page-écran de saisie des défauts de surface

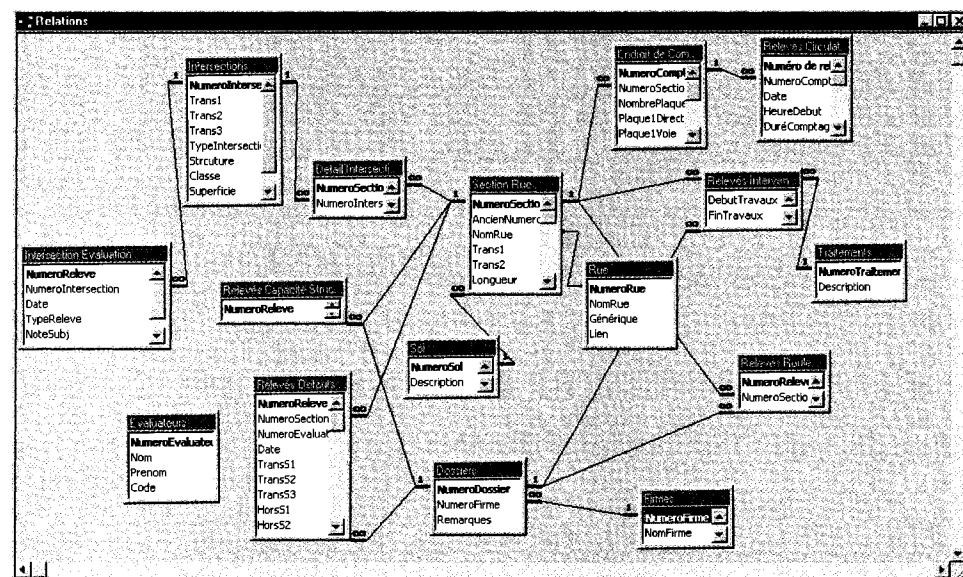


Figure 32 Page-écran montrant les relations entre les tables

La figure 32 donne un aperçu des relations entre les différentes tables contenant les données de PAVE. Le choix de cette structure a été longuement réfléchi par le personnel technique de génie civil et de géomatique de Verdun. Elle s'appuie sur les travaux de Tecslut (1999) publiés par le centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU). Dans la base de données, les tables contiennent les données desquelles l'information est ensuite tirée. La figure 33 montre la page-écran des données des sections de rue.

N° Section	Nom de Rue	Transversale 1	Transversale 2	Longueur	Largeur	Date Constr	Structure
1000	Boulevard Champlain	Limite Arrond. Lasalle	Rue Fayolle	55,5	12	01-01-1969	Semi rigide
1001	Boulevard Champlain	Rue Fayolle	Rue Parkdale	57	12	01-01-1969	Semi rigide
1002	Boulevard Champlain	Rue Parkdale	Rue Crawford	212	12	01-01-1969	Semi rigide
1003	Boulevard Champlain	Rue Crawford	Rue Leclair	52	12	01-01-1969	Semi rigide
1004	Boulevard Champlain	Rue Leclair	Entrée ouest Hôpital I	291	12	01-01-1981	Semi rigide
1005	Boulevard Champlain	Entrée ouest Hôpital Dou	Rue Stephens	419	12	01-01-1981	Semi rigide
1006	Boulevard Champlain	Rue Stephens	Rue Rolland	55	12	01-01-1948	Rigide
1007	Boulevard Champlain	Rue Rolland	Rue Valiquette	65	12	01-01-1948	Rigide
1008	Boulevard Champlain	Rue Valiquette	Avenue Brown	201	12	01-01-1972	Semi rigide
1009	Boulevard Champlain	Avenue Brown	Rue Manning	58	12	01-01-1977	Semi rigide
1010	Boulevard Champlain	Rue Manning	Rue Moffat	78	12	01-01-1977	Semi rigide
1011	Boulevard Champlain	Rue Moffat	Rue Beatty	61,5	12	01-01-1977	Semi rigide
1012	Boulevard Champlain	Rue Beatty	Rue Osborne	71,5	13	01-01-1977	Semi rigide
1013	Boulevard Champlain	Rue Osborne	Rue Egan	67	13	01-01-1977	Semi rigide
1014	Boulevard Champlain	Rue Egan	Rue Woodland	38	13	01-01-1978	Semi rigide
1015	Boulevard Champlain	Rue Woodland	Rue Argyle	47	13	01-01-1981	Semi rigide
1016	Boulevard Champlain	Rue Argyle	Rue Melrose	70	13	01-01-1981	Semi rigide
1017	Boulevard Champlain	Rue Melrose	Avenue Desmarchais	62	13	01-01-1981	Semi rigide
1018	Boulevard Champlain	Avenue Desmarchais	Avenue Sixième	74	13	01-01-1981	Flexible
1019	Boulevard Champlain	Avenue Sixième	Avenue Cinquième	96	13	01-01-1981	Semi rigide
1020	Boulevard Champlain	Avenue Cinquième	Avenue Quatrième	75	13	01-01-1977	Flexible
1021	Boulevard Champlain	Avenue Quatrième	Avenue Troisième	49	13	01-01-1977	Flexible
1022	Boulevard Champlain	Avenue Troisième	Avenue Deuxième	49	13	01-01-1977	Flexible
1023	Boulevard Champlain	Avenue Deuxième	Avenue Première	50	13	01-01-1977	Semi rigide
1024	Boulevard Champlain	Avenue Première	Rue Willibrord	73	13	01-01-1977	Semi rigide
1025	Boulevard Champlain	Rue Willibrord	Rue Rielle	81	13	01-01-1977	Semi rigide
1026	Boulevard Champlain	Rue Rielle	Rue Gordon	82	13	01-01-1977	Semi rigide

Figure 33 Page-écran des données des sections de rue

Des tronçons de rues ont été numérisés sur une carte de Verdun et un identifiant unique est affecté à chaque tronçon de rue. Un tronçon comprend un certain nombre de sections, soit une ou plusieurs sections de chaussée, une ou plusieurs sections d'égout, une ou plusieurs sections d'aqueduc. L'identifiant de chaque tronçon fait la liaison avec la base de données et permet ainsi d'accéder aux données d'inventaire et de l'état des sections de rue. Cette approche permet de maintenir la base de données indépendante du système

d'information géographique, ce qui donne l'opportunité d'implanter ce dernier dans un autre système de gestion de base de données, si le besoin se fait sentir.

Le système comprendra ultérieurement des modules pour traiter des modèles de dégradation et des modèles d'optimisation pour faire de la programmation stratégique. Le présent projet de système d'aide à la gestion et à l'entretien SAGE des infrastructures civiles lit les informations contenues dans les bases de données de PAVE afin de les intégrer aux données relatives aux infrastructures enfouies pour, par la suite, optimiser la prise de décision. Aussi, pour une meilleure visualisation des résultats, le système sera relié à un système d'information géographique.

5.2.2 Trottoirs

Les trottoirs représentent une des infrastructures municipales les plus sensibles aux yeux des citoyens. Leur état doit être d'excellente qualité. Le système de gestion des trottoirs a été refait en 1996 et est maintenant complété. Une inspection annuelle est effectuée à l'automne sur l'ensemble du réseau soit approximativement 250 kilomètres, et une validation est pratiquée au printemps. Le programme d'intervention, dans sa forme actuelle, est optimal. Éventuellement, ce système sera inséré au système intégré de gestion coordonnée d'infrastructures (SIGEC).

5.2.3 Réseau d'égout

Le réseau d'égout de l'arrondissement Verdun est constitué d'un égout unitaire captant autant les eaux usées que les eaux de ruissellement. Le territoire montré à la figure 34 est divisé en quatre bassins hydrographiques, trois sur la partie «terre ferme» et un à l'Île des Sœurs, selon la topographie des bassins versants. Le secteur étudié est délimité en rouge sur la figure 34 et fait partie du bassin versant dont la ligne verte partage les eaux.

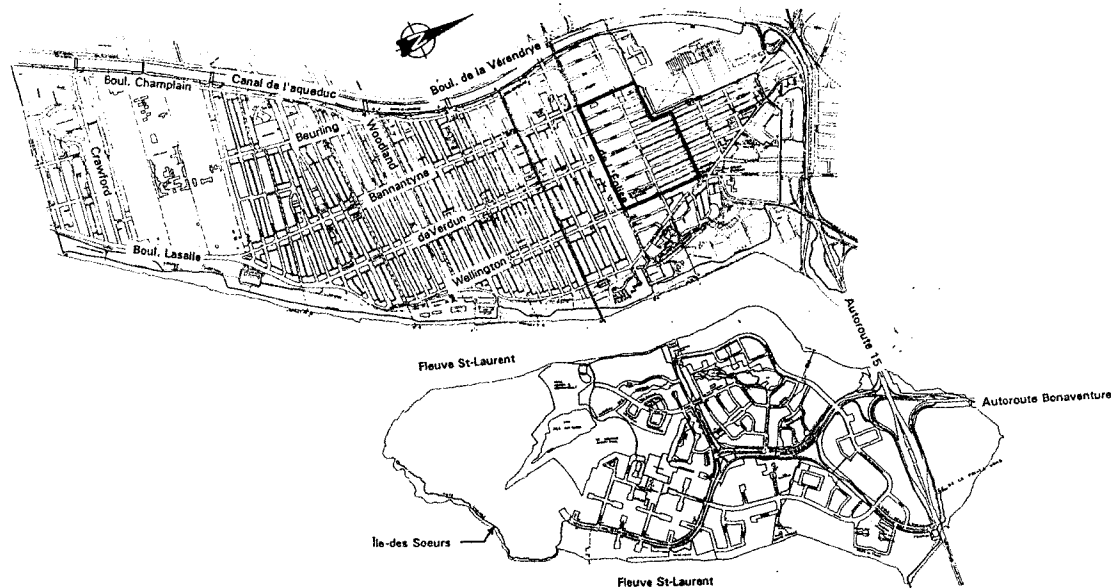


Figure 34 Territoire de l'arrondissement Verdun

Avant 1982, les conduites d'égout étaient choisies selon l'expérience des ingénieurs et non pas calculées avec une méthode de dimensionnement reconnue. À partir de 1982, la méthode rationnelle a été appliquée. Vers 1988, le logiciel SIRDU a été appliqué, ensuite URMAR entre 1991 et 1994. Depuis 1995, la modélisation hydrologique est réalisée avec le logiciel SWMM qui s'appelle maintenant XP-SWMM.

Depuis 2001, l'analyse hydraulique inclut les aspects environnementaux où la charge de pollution est évaluée. L'évaluation structurale repose sur le logiciel du *Water Research center WRC* utilisant les codes de dégradation de ce dernier. Des développements sont en cours afin de traduire les défauts observés par monitoring sous forme numérique. Les résultats des analyses, hydraulique et structurale, sont traités selon une formule maison et de façon non automatique.

Les conduites d'égout sont souvent très vieilles et causent fréquemment des nuisances et des dégâts importants. Dans le secteur à l'étude, le bassin hydrographique numéro 1 de Verdun est source de refoulements périodiques qui peuvent aller jusqu'à deux fois par année. La solution à ces problèmes passe par une connaissance approfondie de l'état des conduites.

Le premier prototype de gestion des égouts développé par le LARIM (2000) pourra supporter des tâches diverses permettant, entre autres, l'acquisition de données, la télémessure, l'accès à distance à différents éléments qui composent ce système urbain. Le système devra ainsi donner à l'utilisateur la possibilité d'accéder aux informations conservées dans la base de données corporative à référence spatiale (SIG) de Verdun et relative à une adresse ou un nom de rue.

Plus spécifiquement, il devrait aussi permettre de suivre, en mode interactif ou en temps réel, l'évolution des conditions structurale, hydraulique, environnementale et globale du réseau d'égout, et d'ajuster le fonctionnement en regard de la demande et de l'offre suivant les paramètres et indices de performance. Il devrait enfin assurer l'établissement d'une liste spécifiquement pour le réseau d'égout des besoins, des priorités, des scénarios, des coûts, des impacts en regard de la demande et de l'offre, pour finalement proposer le meilleur scénario d'intervention.

5.2.4 Réseau d'aqueduc

Les conduites d'aqueduc sont analysées sur le plan hydraulique avec le logiciel AquaCad, auparavant nommé Aquagéo, distribué par la compagnie Aquadata (2004), et sur le plan structural suivant la méthodologie de l'*American Water Works Association* AWWA (2004). L'historique des bris et fuites est conservé dans une base de données contenant l'âge et les matériaux des conduites ainsi que le diamètre, le débit, la pression et les autres caractéristiques géométriques.

Un autre prototype de gestion de l'aqueduc développé par le LARIM (2000) permettra de faire bénéficier aux usagers des mêmes possibilités d'accès aux informations que celles offertes au niveau des égouts. Il devrait aussi permettre de suivre, en mode interactif ou en temps réel, l'évolution des conditions structurale, hydraulique, sanitaire et globale du réseau d'adduction d'eau, et d'ajuster le fonctionnement en regard de la demande et de l'offre suivant les paramètres et indices de performance propres à ce type de réseau. Il permettra aussi l'établissement d'une liste des besoins, des priorités, des scénarios, des coûts, des impacts en regard de la demande et de l'offre associée à la pression fournie et à la consommation, pour finalement proposer le meilleur scénario d'intervention.

En général, en ce qui concerne le processus de prise de décision relative à la réhabilitation d'un réseau d'adduction d'eau potable, le LARIM (2000) pose la question : «est-il préférable de grossir le diamètre ou de changer la conduite?» Cette décision est prise à la suite d'une analyse sommaire qui tient compte des statistiques et de l'historique des bris, de l'âge des conduites, des différents paramètres physiques, structuraux, des mesures et du résultat des inspections. De plus, des données en provenance du service de l'urbanisme relatives à des modifications du plan de zonage et de nouvelles vocations de quartier, la planification (par exemple d'une nouvelle école), conditionnent les choix à faire.

La plus grande partie des efforts du gestionnaire pour générer des économies porte sur la localisation et la recherche des fuites et à l'inspection des bouches d'incendie étant donné qu'on y retrouve 80% des fuites.

5.2.5 Ponts

Les ponts enjambant le canal de l'aqueduc, sur le territoire de Verdun, sont gérés, suivis et entretenus par le ministère des Transports du Québec.

5.3 Prototype SAGE

Le prototype de système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) est un module d'optimisation qui est un sous-système du système intégré de gestion des infrastructures civiles. Les réseaux d'infrastructures municipales de Verdun comprennent le réseau de chaussées, le réseau d'eau potable et le réseau d'égout unitaire qui évacue autant les eaux usées que les eaux de ruissellement. Le module SAGE est développé dans le langage de programmation Visual Basic et appliqué à un secteur de Verdun délimité par les rues Bannantyne au nord-ouest, Wellington au sud-est, de l'Église au sud-ouest et Régina au nord-est. Un croquis montrant le secteur étudié est reproduit à la figure 35.

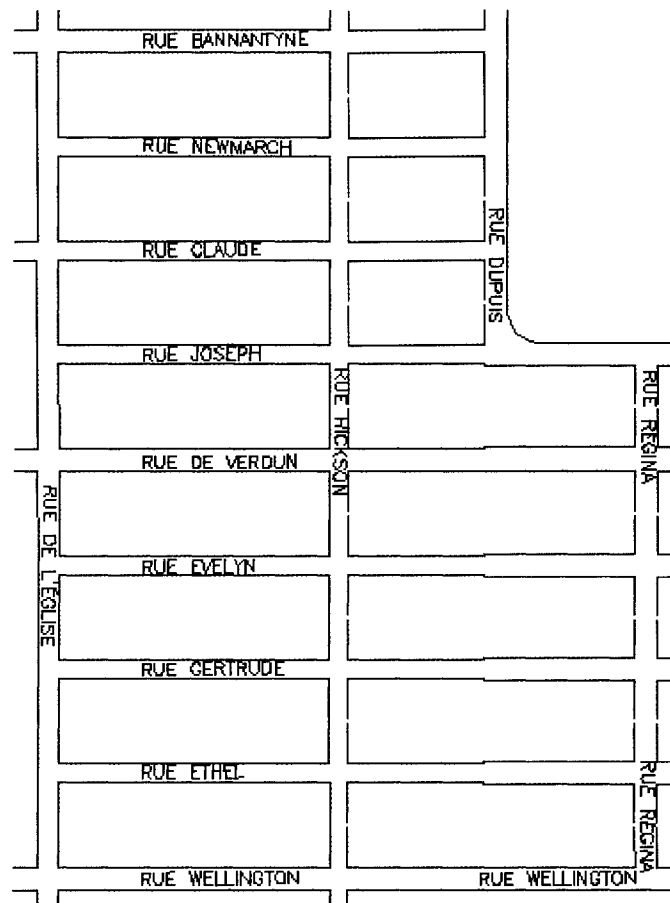


Figure 35 Délimitation du secteur étudié

Le choix de ce secteur a été suggéré par monsieur France Bernard et motivé par le fait que des problèmes récurrents de refoulement d'égouts sont fréquents, entraînant régulièrement des investissements à courte échéance. De plus, le mandat donné au LARIM couvre la totalité de ce secteur.

Le prototype SAGE est développé pour minimiser les coûts d'intervention sur les infrastructures municipales en intégrant dans un même système de décision les caractéristiques des chaussées, aqueducs et égouts. Le coût minimum est obtenu lorsque les tronçons sont considérés individuellement, à moins qu'il y ait des économies d'échelle en considérant ensemble des tronçons adjacents. Ce coût minimum est la somme des coûts actualisés sur tous les tronçons.

Les économies d'échelle couvrent les réductions de coût unitaire engendrées par des travaux de plus grande envergure. Bien que ces économies soient réelles car les villes procèdent souvent à des interventions sur deux ou plusieurs tronçons adjacents, elles sont difficiles à évaluer. Les administrations municipales doivent produire annuellement un document montrant le coût unitaire pour les travaux qu'elles ont engagés. Ce document fournit rarement une information concernant le volume des travaux, et pour cette raison, les coûts unitaires varient grandement d'une année à l'autre. Ainsi, une contrainte liée aux économies d'échelle ne procurerait pas des résultats plus probants. Par conséquent, la résolution du problème d'optimisation traité globalement n'apporterait aucun avantage à une résolution tronçon par tronçon.

Afin de calculer et d'analyser les résultats adéquatement, le logiciel propose au gestionnaire trois choix : calculer un tronçon individuellement, analyser ce tronçon ou analyser l'ensemble des tronçons. La page-titre du prototype est affichée à la figure 36.

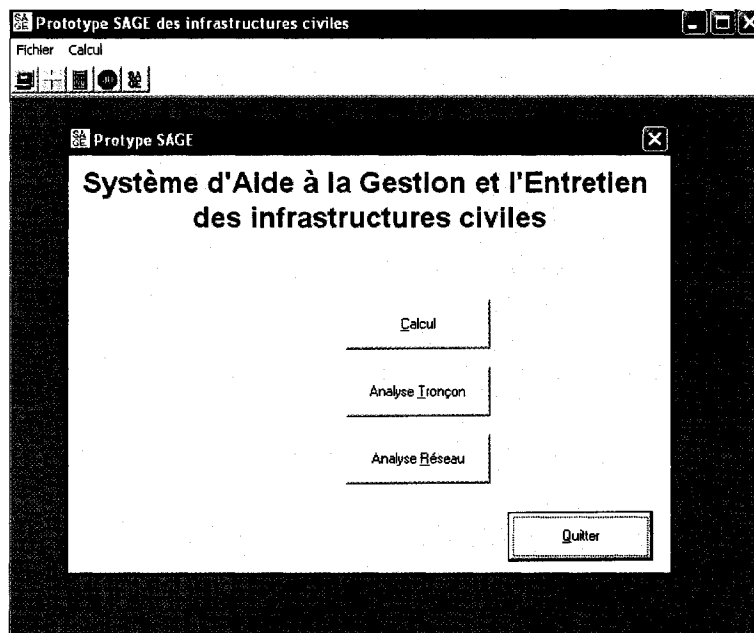


Figure 36 Page-titre du prototype SAGE

5.3.1 Calcul d'un tronçon

Le logiciel SAGE est conçu pour lire les données directement dans le système intégré de gestion des infrastructures. Les données de base sont celles concernant la chaussée contenues dans le logiciel PAVE 2002 et augmentées des données relatives à l'aqueduc et l'égout. Ces données sont écrites dans le format de Microsoft Access.

Dans le chapitre sur la modélisation de la prise de décision, il a été défini qu'un tronçon comprend un certain nombre de sections, soit une ou plusieurs sections de chaussée, une ou plusieurs sections d'égout, une ou plusieurs sections d'aqueduc ainsi que des sections représentant les services d'utilités publiques. Pour la réalisation du prototype SAGE, uniquement les tronçons contenant une seule section de chaussée, une seule section d'aqueduc et une seule section d'égout sont retenus. Lorsque le tronçon contient plus qu'une section de chaque infrastructure, il est standardisé.

Parmi les 43 tronçons analysés, quatre ont deux sections d'aqueduc et six autres ont deux sections d'égout. Dans ces cas, la section la plus dégradée, c'est-à-dire la plus âgée, est conservée dans la base de données mais sa longueur est corrigée en appliquant le principe de conduite équivalente exprimée en termes de coûts. Cette procédure n'entraîne aucun biais dans les coûts puisqu'ils sont unitaires. Cependant, au niveau de l'état, la qualité de la section d'infrastructure est sous-estimée par rapport à la réalité.

La page-écran d'identification du tronçon est illustrée à la figure 37. Cette page-écran permet de naviguer dans la base de données et de choisir le tronçon qui sera analysé.

Figure 37 Page-écran d'identification du tronçon

Le tronçon identifié lors du choix effectué à la page-écran précédente est codé BANN0T002 et représente la rue Bannantyne entre les rues transversales de l'Église et Hickson. Le bouton de commande «Affichage des sections d'infrastructures» recherche les données sur les trois sections de chaussée, d'aqueduc et d'égout et affiche celles-ci dans la page-écran montrée à la figure 38.

Données sur les infrastructures

Chaussée

Section	Année	Longueur	Largeur	Classe de chaussée	Âge	État
1058	1910	219,0	13,0	Collectrice	13	48

Aqueduc

Section	Année	Matériau	Diamètre	Longueur	Âge	État
596	1923	Fonte grise	205	233,2	79	21

Égout

Section	Année	Matériau	Diamètre	Longueur	Forme	Âge	État
1	1933	Béton armé	380	226,6	Circulaire	69	31

Paramètres Calcul Fermer

Figure 38 Page-écran des données sur les sections d'infrastructures

Les données sur les infrastructures indiquent les caractéristiques des sections de chaussée, d'aqueduc et d'égout. Ainsi, l'état de la chaussée est déterminé à partir des relevés de l'état de surface et la valeur de l'indice de qualité est établie dans le logiciel PAVE 2002. La figure 38 indique l'âge de la chaussée comme étant l'âge de la dernière intervention majeure et non l'âge de la construction originale. L'état des conduites d'aqueduc et d'égout n'étant pas encore disponible dans le système de gestion intégrée des infrastructures, cette valeur est, dans un premier temps, calculée comme étant $(100 - \text{Âge})$; par la suite, avec plus de données, la valeur de l'état des conduites sera précisée.

Cette méthode d'estimation de la qualité des conduites souterraines est temporaire, aussi longtemps qu'une auscultation des conduites n'aura pas lieu. Cette situation n'est pas

idéale, mais c'est la seule à envisager. Étant donné que le matériau de la conduite est connu, la formule de calcul $(100 - \text{Âge})$ peut être nuancée en supposant qu'une conduite en fonte grise soit en plus mauvais état qu'une en fonte ductile. Il faudrait alors connaître l'agressivité du sol. De toute façon, le nombre de données est insuffisant pour avoir une modélisation valable qui ne soit pas questionnable.

Les données concernant la chaussée sont plus complètes et une évaluation de l'état est disponible, de même que l'historique des interventions déjà effectuées. Ainsi, pour la chaussée, la valeur de sa qualité est prise directement dans la base de données. La valeur de l'année correspond à la date d'ouverture de la rue tandis que la valeur de son âge correspond à celui de sa dernière intervention majeure.

Le tronçon sélectionné précédemment de la rue Bannantyne comprend une section de chaussée, une section d'aqueduc et une section d'égout. Les données du tronçon de la rue Bannantyne sont les suivantes :

a. chaussée :

- Numéro de section : 1058
- Année : 1910
- Longueur : 219,0 m
- Largeur : 13,0 m
- Classe de chaussée : Collectrice
- Âge : 13 ans
- État : 48

b. aqueduc :

- Numéro de section : 596
- Année : 1923
- Matériau : Fonte grise
- Diamètre : 205 mm ϕ
- Longueur : 233.2 m

- Âge : 79 ans
- État : 21

c. égout :

- Numéro de section : 1
- Année : 1933
- Matériau : Béton armé
- Diamètre : 380 mm ϕ
- Longueur : 226.6
- Forme : Circulaire
- Âge : 69 ans
- État : 31

Pour procéder à la recherche d'une solution optimale, le prototype SAGE a besoin de connaître les paramètres d'intervention et les coûts de chaque stratégie. Les paramètres d'intervention sont personnalisés en fonction de la classe de la chaussée ou le matériau de la conduite d'aqueduc ou d'égout.

Les caractéristiques paramétrables comprennent, la durée de vie estimée en année de l'infrastructure et les seuils minimum et maximum établis selon une mesure de qualité. De plus, elles définissent les résultats escomptés de chaque intervention en termes de gain de qualité de l'état de chaque catégorie d'infrastructures. Les coûts d'intervention et les économies en cas de reconstruction simultanée sont également fixés par le gestionnaire.

Ces différents éléments sont gérés sur la page-écran des données sur les paramètres d'intervention tels qu'illustrés à la figure 39. Il est alors possible de les modifier et de les enregistrer dans un fichier de données avec le suffixe «.dat».

Paramètres

Interventions sur les infrastructures

	CHAUSSEE		AQUEDUC		ÉGOUT		
	Locale	Collectrice	Fonte ductile	Fonte grise	Béton armé	Terre cuite	Briques
Durée de vie	20	20	80	80	80	80	80
Seuil minimum	20	20	20	20	20	20	20
Seuil maximum	100	100	100	100	100	100	100
Entretien	10	10	10	5	10	5	5
Réhabilitation	40	40	40	20	40	20	30
Reconstruction	80	80	80	80	80	80	80

Coûts

	CHAUSSEE	AQUEDUC	ÉGOUT
Entretien mineur	15 \$ par m²	100 \$ par m Long	100 \$ par m Long
Réhabilitation	25 \$ par m²	90 % de reconstruction	75 % de reconstruction
Reconstruction	40 \$ par m²	1,2 \$ par mm Diamètre et par m Longueur	0,7 \$ par mm Diamètre et par m Longueur
Économie reconstruction simultanée	20 %	5 %	5 %

C:\SAGE\Param_Verdun.dat

Lire le fichier Enregistrer Fermer

Figure 39 Page-écran des données sur les paramètres d'intervention

Par exemple, pour le tronçon de rue Bannantyne sélectionné précédemment, la section de chaussée, classée collectrice, indique une durée de vie de 20 ans, un seuil minimum de 20 et un seuil maximum de 100. Ces données permettent de calculer l'état prévisible de la chaussée dans le cas où la solution retenue serait de «ne rien faire». Ainsi, la perte annuelle de qualité est calculée par l'équation 5.1 :

$$\text{Perte de qualité} = \frac{(\text{Seuil maximum} - \text{Seuil minimum})}{\text{Durée de vie}} \quad (5.1)$$

De cette façon, la perte de qualité lorsqu'il y a pas d'intervention prévue est de 4. Lorsqu'une intervention est nécessaire, ses effets sont contrôlés par le gestionnaire qui fixe pour cet exemple des gains de qualité à 10 pour une opération d'entretien mineur, à 40 pour une action de réhabilitation et à 80 pour une reconstruction, ces paramètres seront analysés ultérieurement.

La page-écran des données sur les paramètres d'intervention contient les paramètres de coûts pour chaque infrastructure et pour chaque intervention. Dans l'exemple en cours, les coûts pour la chaussée sont 15 dollars par mètre carré pour une opération d'entretien mineur, 25 dollars par mètre carré pour une action de réhabilitation et 40 dollars par mètre carré pour une reconstruction. Dans le cas de l'égout, les coûts sont de 100 dollars par mètre linéaire pour une opération d'entretien mineur, 0,70 dollar par mètre linéaire et par millimètre de diamètre pour une reconstruction, et 75% du coût de la reconstruction pour une intervention de réhabilitation. Pour l'aqueduc, les coûts sont de 100 dollars par mètre linéaire pour une opération d'entretien mineur, 1,20 dollar par mètre linéaire et par millimètre de diamètre pour une reconstruction, et 90% du coût de la reconstruction pour une intervention de réhabilitation. Ces exemples de coûts sont déterminés à partir des données concernant les travaux que l'arrondissement Verdun compile chaque année.

De plus, une économie, respectivement de 20%, 5% et 5% sur la chaussée, l'égout et l'aqueduc, est appliquée dans le cas impliquant une reconstruction simultanée des trois infrastructures. Une option développée lors de la validation du SAGE permet d'envisager des économies lorsque la reconstruction de la chaussée est pratiquée en même temps que la reconstruction d'une des conduites souterraines.

La méthode de calcul des coûts de reconstruction est calibrée à partir des coûts des travaux effectués à Verdun en 2001 et compilés en 2002. Les coûts unitaires de reconstruction de l'égout sont exprimés au tableau I. Les variations de coûts peuvent se justifier par l'envergure des travaux, notamment la longueur des conduites posées au cours de l'année.

Ces données ont permis de tracer le graphique 18 et d'établir une relation entre le coût unitaire et le diamètre de la conduite. Cette relation est exprimée dans l'équation 5.2, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,6614$:

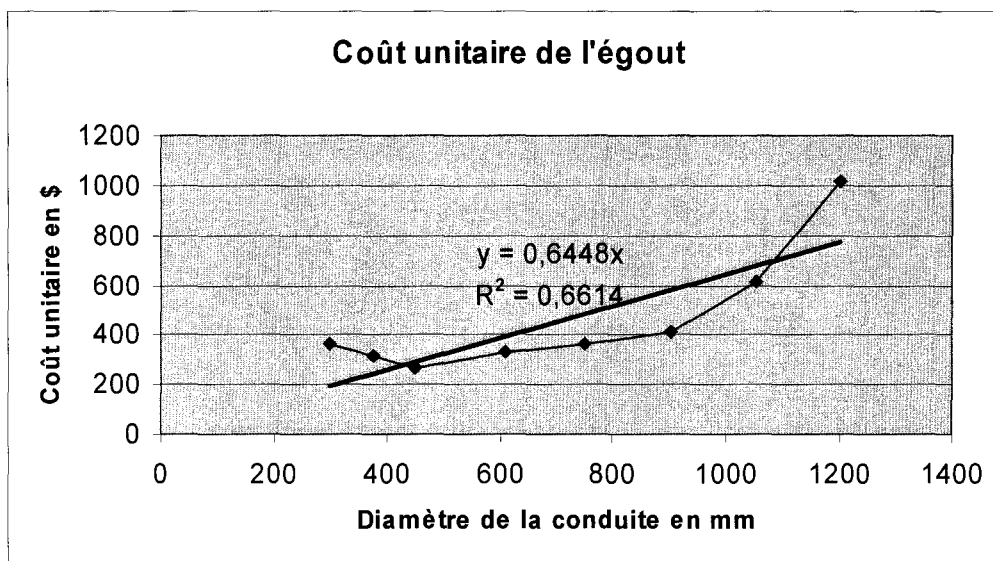
$$\text{Coût unitaire} = 0,6448 \times \text{Diamètre de la conduite} \quad (5.2)$$

Tableau I

Coûts unitaires de reconstruction de l'égout

Diamètre en mm	Coût en dollars
300	365,63
375	314,08
450	262,50
610	328,82
750	360,78
900	408,14
1050	616,00
1200	1010,75

En conséquence, le coût de reconstruction de l'égout est fixé à 0,70 dollar par mètre linéaire et par millimètre de diamètre.



Graphique 18 Calibration du coût unitaire de reconstruction de l'égout

De la même façon que la calibration de l'égout, les coûts unitaires de reconstruction de l'aqueduc sont fournis au tableau II.

Tableau II

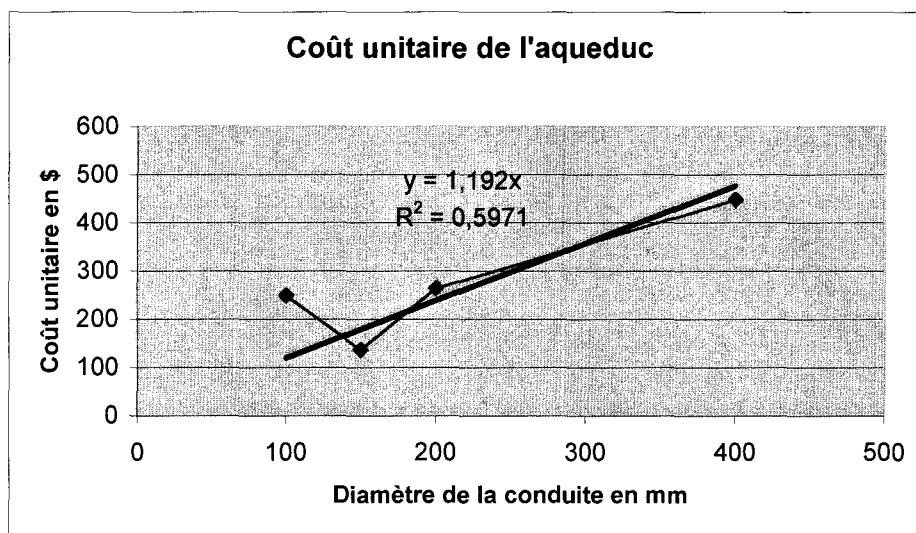
Coûts unitaires de reconstruction de l'aqueduc

Diamètre en mm	Coût en dollars
100	248,67
150	136,18
200	264,06
400	447,57

Ces données ont permis de tracer le graphique 19 et d'établir une relation entre le coût unitaire et le diamètre de la conduite. Cette relation est exprimée dans l'équation 5.3, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,5971$:

$$\text{Coût unitaire} = 1,192 \times \text{Diamètre de la conduite} \quad (5.3)$$

En conséquence, le coût de reconstruction de l'aqueduc est fixé à 1,20 dollar par mètre linéaire et par millimètre de diamètre.



Graphique 19 Calibration du coût unitaire de reconstruction de l'aqueduc

La méthode de linéarisation des fonctions de coût peut entraîner des biais pour les gros diamètres, autant pour l'égout que pour l'aqueduc. De plus, pour poursuivre la discussion amorcée précédemment dans ce chapitre sur les économies d'échelle, la qualité des résultats dépend de la qualité des données.

Lorsque le tronçon est sélectionné et que les paramètres sont établis, il est possible de procéder au calcul des interventions optimales. Pour ce faire, le gestionnaire doit fournir un horizon de planification et un taux d'escompte pour évaluer la valeur présente, à l'année de conception, des interventions. Une fois cette information entrée, le prototype SAGE transfère les données pertinentes des fichiers et bases de données, pour établir la fonction objectif à minimiser et charger les contraintes du système afin de compléter la validation du modèle. Le module d'optimisation est activé et le logiciel détermine les variables de décision représentant les actions à recommander. Le tableau III donne les résultats sur dix ans de la performance de calcul du module d'optimisation.

Tableau III

Performance de calcul du module d'optimisation

Horizon	Variables de décision	Contraintes	Nombre d'itérations	Temps de calcul
1	64	5	4	inférieur à 1 s
2	128	10	143	inférieur à 1 s
3	192	15	231	inférieur à 1 s
4	256	20	350	inférieur à 1 s
5	320	25	510	inférieur à 1 s
6	384	30	759	1 s
7	448	35	1 153	1 s
8	512	40	76 520	27 s
9	576	45	213 869	1 min 24 s
10	640	50	626 293	4 min 33 s

Les performances de calcul sont dépendantes des capacités de l'ordinateur. Avec un micro-ordinateur Intel Pentium IV muni de 1024 Mo de mémoire vive fonctionnant sous Windows XP, comme on retrouve dans plusieurs services municipaux, les mesures de performance indiquent un accroissement rapide du nombre d'itérations et du temps de calcul en fonction de l'horizon de planification. Ces performances sont mesurées sur le tronçon BANN0T002 de la rue Bannantyne qui comprend une section de chaussée, une section d'égout et une section d'aqueduc.

Le tableau III fait ressortir qu'il y a 4^3 soit 64 variables de décision par année de planification, c'est-à-dire quatre actions possibles sur trois infrastructures. Le nombre de contraintes est cinq par année de planification, soit une pour spécifier les seuils par infrastructure et deux par année de planification pour transformer la contrainte de faisabilité d'une forme d'égalité à une forme d'inégalité.

Une fois l'optimisation terminée, les résultats sont affichés sur une page-écran montrant l'analyse sur le tronçon. Cette page-écran est présentée à la figure 40.

Les résultats sur le tronçon de la rue Bannantyne entre les rues transversales de l'Église et Hickson identifient les variables de décision qui prennent la valeur 1, c'est-à-dire celles où une intervention est justifiée. Dans l'exemple en cours, les variables de décision x_1 , x_{69} , x_{129} , x_{193} , x_{257} , x_{321} , x_{385} , x_{469} , x_{513} et x_{577} prennent la valeur 1. Ces variables sont traduites en termes d'action à chaque année de l'horizon de planification.

Les décisions portent les numéros 1, 69, 129, 193, 257, 321, 385, 469, 513 et 577. Ces numéros sont traduits par une opération modulo 64 en nombre 1, 5, 1, 1, 1, 1, 1, 21, 1 et 1 pour définir le type d'intervention à chaque période de l'horizon de planification.

Calcul sur un tronçon

Rue Bannantyne
entre Rue de l'Église
et Rue Hickson

Planification
☒ annuelle
☐ triennale
☐ quinquennale

Horizon de planification 10 périodes
Taux d'escompte 5 %

640 variables de décision 50 contraintes 626293 itérations 00:04:33 temps de calcul

Résultats sur le tronçon					ÉTAT		
Période	Année	Décision	Action	Coût	chaussée	aqueduc	égout
0					48	21	31
1	1	1	1	0	44	20	30
2	2	69	5	21152	40	25	29
3	3	129	1	0	36	24	28
4	4	193	1	0	32	23	27
5	5	257	1	0	28	22	26
6	6	321	1	0	24	21	25
7	7	385	1	0	20	20	24
8	8	469	21	44688	30	25	23
9	9	513	1	0	26	24	22
10	10	577	1	0	22	23	21

Coût total : 65840

Valider
Calcul
Afficher
Enregistrer
Annuler
Fermier

Nouveau calcul Nouveau tronçon Analyse Tronçon Analyse Réseau

Figure 40 Page-écran montrant l'analyse sur un tronçon

Le tableau IV fournit la liste des actions envisagées sur chaque infrastructure à chaque année. Ainsi, pour le même exemple, le prototype SAGE a sélectionné à la deuxième année, l'action numéro 5, soit un entretien mineur et l'action numéro 21 correspondant à une intervention d'entretien mineur sur la chaussée et sur l'aqueduc simultanément à la huitième année.

Le tableau IV indique quatre actions possibles notées «rien» pour ne rien faire, «mineur» pour un entretien mineur, «réhabilitation» pour une intervention de réhabilitation sans tranchée et «reconstruction» pour une opération du même nom. Les gestionnaires peuvent entendre différentes significations pour ces termes, selon leur expérience. Peu importe, pour être cohérents, il faut que les coûts unitaires correspondent à la compréhension qu'ils ont de l'intervention.

Tableau IV

Liste des actions envisagées sur chaque infrastructure

Action	Chaussée	Aqueduc	Égout
1	rien	rien	Rien
2	rien	rien	Mineur
3	rien	rien	Réhabilitation
4	rien	rien	Reconstruction
5	rien	mineur	Rien
6	rien	mineur	Mineur
7	rien	mineur	Réhabilitation
8	rien	mineur	Reconstruction
9	rien	réhabilitation	rien
10	rien	réhabilitation	mineur
11	rien	réhabilitation	réhabilitation
12	rien	réhabilitation	reconstruction
13	rien	reconstruction	rien
14	rien	reconstruction	mineur
15	rien	reconstruction	réhabilitation
16	rien	reconstruction	reconstruction
17	mineur	rien	rien
18	mineur	rien	mineur
19	mineur	rien	réhabilitation
20	mineur	rien	reconstruction
21	mineur	mineur	rien
22	mineur	mineur	mineur
23	mineur	mineur	réhabilitation
24	mineur	mineur	reconstruction
25	mineur	réhabilitation	rien
26	mineur	réhabilitation	mineur
27	mineur	réhabilitation	réhabilitation
28	mineur	réhabilitation	reconstruction
29	mineur	reconstruction	rien
30	mineur	reconstruction	mineur
31	mineur	reconstruction	réhabilitation
32	mineur	reconstruction	reconstruction
33	réhabilitation	rien	rien
34	réhabilitation	rien	mineur
35	réhabilitation	rien	réhabilitation
36	réhabilitation	rien	reconstruction

Tableau IV (suite)

Action	Chaussée	Aqueduc	Égout
37	réhabilitation	mineur	rien
38	réhabilitation	mineur	mineur
39	réhabilitation	mineur	réhabilitation
40	réhabilitation	mineur	reconstruction
41	réhabilitation	réhabilitation	rien
42	réhabilitation	réhabilitation	mineur
43	réhabilitation	réhabilitation	réhabilitation
44	réhabilitation	réhabilitation	reconstruction
45	réhabilitation	reconstruction	rien
46	réhabilitation	reconstruction	mineur
47	réhabilitation	reconstruction	réhabilitation
48	réhabilitation	reconstruction	reconstruction
49	reconstruction	rien	rien
50	reconstruction	rien	mineur
51	reconstruction	rien	réhabilitation
52	reconstruction	rien	reconstruction
53	reconstruction	mineur	rien
54	reconstruction	mineur	mineur
55	reconstruction	mineur	réhabilitation
56	reconstruction	mineur	reconstruction
57	reconstruction	réhabilitation	rien
58	reconstruction	réhabilitation	mineur
59	reconstruction	réhabilitation	réhabilitation
60	reconstruction	réhabilitation	reconstruction
61	reconstruction	reconstruction	rien
62	reconstruction	reconstruction	mineur
63	reconstruction	reconstruction	réhabilitation
64	reconstruction	reconstruction	reconstruction

Les résultats du calcul d'optimisation sont sauvegardés dans un fichier texte indépendant du logiciel. Ce fichier peut être ensuite lu par les autres modules du prototype pour faciliter l'analyse des résultats.

Le fichier texte BANN0T002.txt comprend les informations suivantes :

- nom du tronçon;

- nom de la rue et des rues transversales;
- horizon de planification;
- type de planification;
- paramètres de chaussée;
- paramètres d'aqueduc;
- paramètres d'égout;
- coûts de la chaussée;
- coûts de l'aqueduc;
- coûts de l'égout;
- nombre de variables de décision;
- nombre de contraintes;
- nombre d'itérations;
- temps de calcul;
- coût total;
- résultats, année après année.

5.3.2 Analyse d'un tronçon

Dans le module d'analyse du tronçon, les résultats sont affichés graphiquement pour en faciliter leur compréhension. La figure 41 montre l'état du tronçon pendant toute la période de planification tandis que la figure 42 illustre les coûts pendant la même période. Les coûts sont actualisés à l'année de conception en utilisant le taux d'escompte établi lors de la première étape. Les différentes interventions sont déterminées à partir des actions retenues par le module d'optimisation. La liste des interventions préconisées est affichée, année par année, comme l'indique la figure 43.

Le gestionnaire peut afficher la page-écran souhaitée en pressant un bouton de commande. Il lui est aussi possible de créer un document Microsoft Word contenant la fiche synthèse du tronçon pour la planification étudiée.

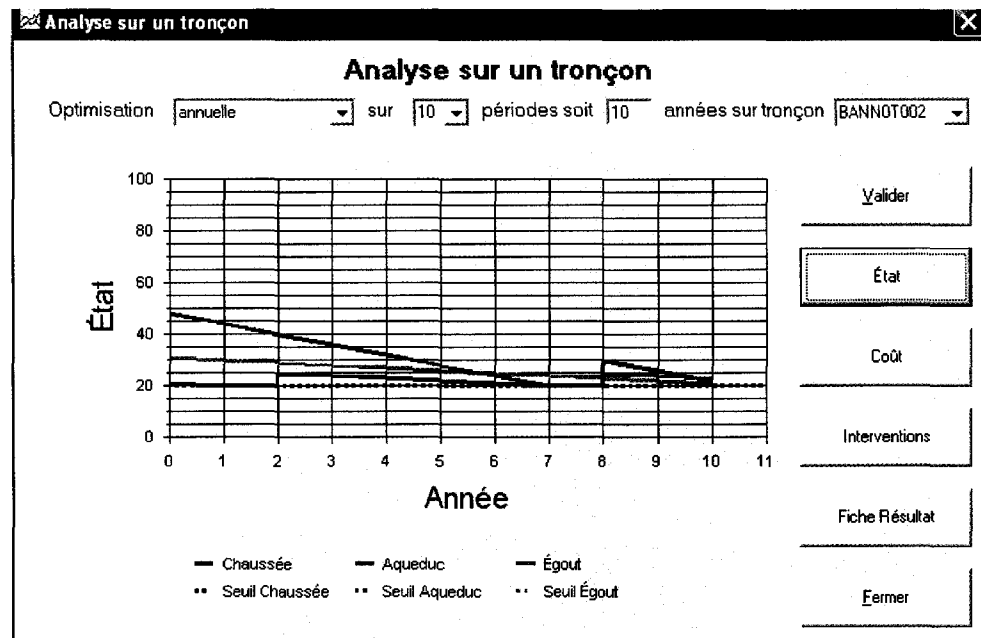


Figure 41 Analyse de l'état du tronçon : planification annuelle sur 10 ans

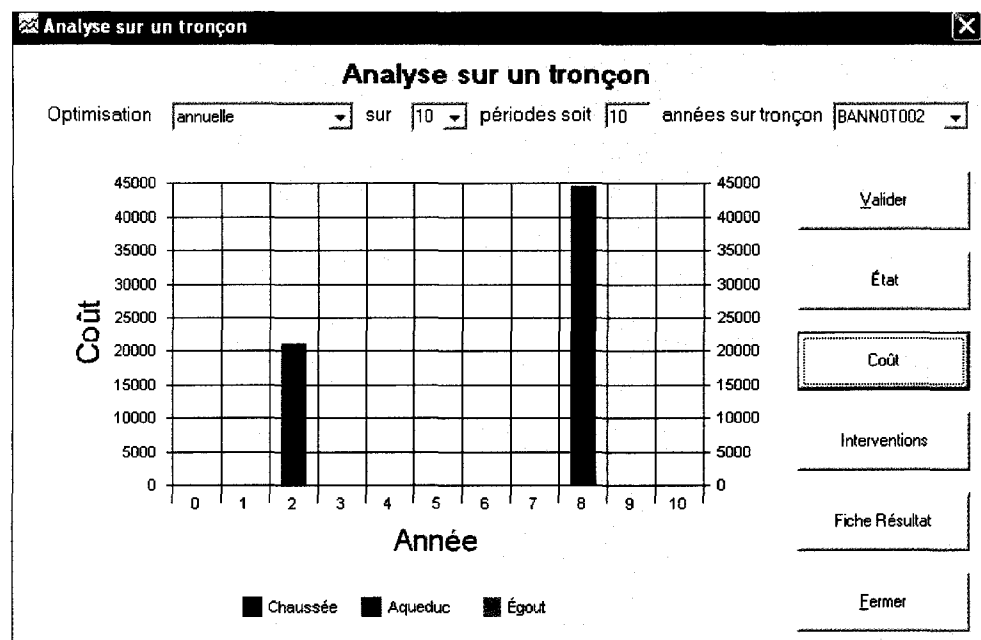


Figure 42 Analyse des coûts du tronçon : planification annuelle sur 10 ans

Analyse sur un tronçon

Optimisation : annuelle sur 10 périodes soit 10 années sur tronçon BANN0T002

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	Intervention	Coût	Intervention	Coût	Intervention	Coût	
Année 1							
Année 2			mineur	21 152			21 152
Année 3							
Année 4							
Année 5							
Année 6							
Année 7							
Année 8	mineur	28 904	mineur	15 784			44 688
Année 9							
Année 10							

Figure 43 Analyse des interventions sur le tronçon : planification annuelle sur 10 ans

Dans l'exemple choisi, les interventions sont limitées à des entretiens mineurs. Ces résultats sont pertinents malgré qu'un horizon de planification sur dix ans soit court; toutefois, une telle période peut paraître longue pour un élu qui a un mandat de quatre ans.

Pour réaliser une analyse sur un horizon de planification plus long, le logiciel offre au gestionnaire la possibilité de procéder à une planification annuelle, triennale ou quinquennale. Ainsi, pour une planification triennale sur sept périodes, le gestionnaire analyse les résultats, coûts et effets sur les trois infrastructures, pendant un horizon de 21 ans. Tout en fournissant des résultats pour que le gestionnaire puisse recommander les interventions à entreprendre au niveau réseau, cette approche offre l'avantage d'analyser sur un horizon trois fois plus long, sans augmenter indûment le temps de calcul. Cette analyse est reprise avec une planification triennale; la figure 44 montre l'état du tronçon, la figure 45 illustre les coûts et la figure 46 affiche la liste des interventions, période par période.

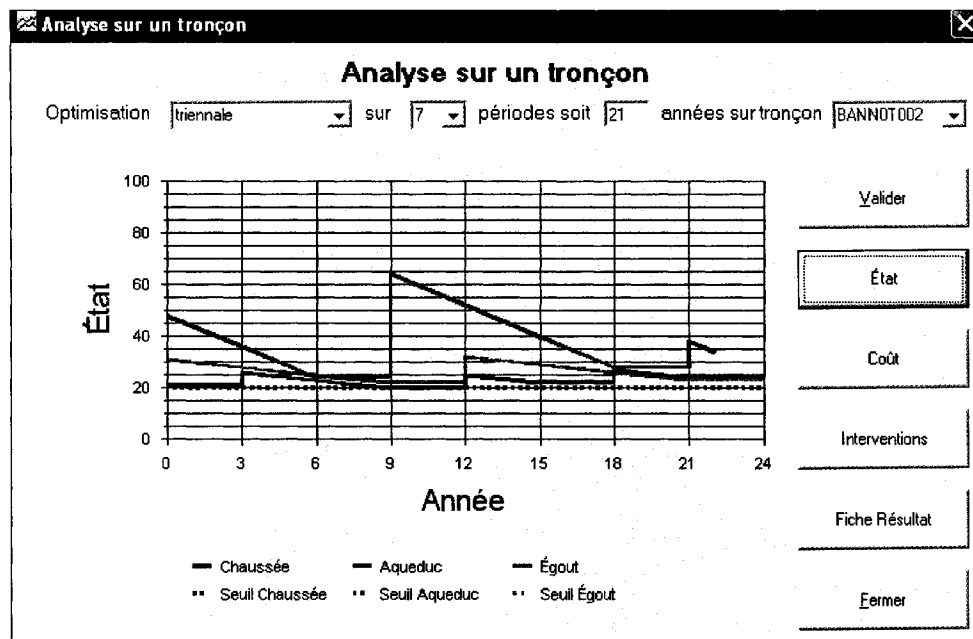


Figure 44 Analyse de l'état du tronçon : planification triennale sur 21 ans

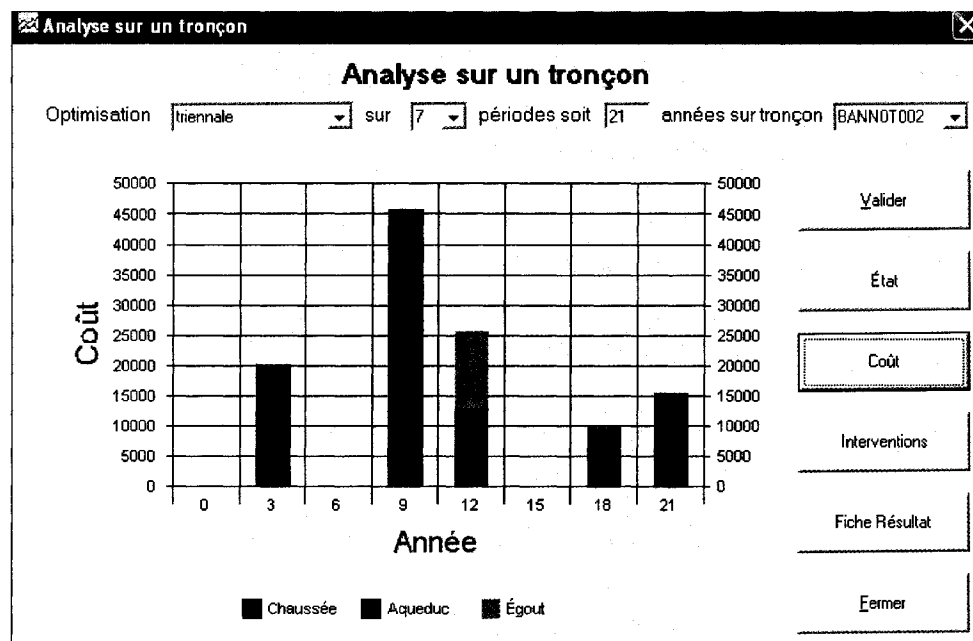


Figure 45 Analyse des coûts du tronçon : planification triennale sur 21 ans

Analyse sur un tronçon

Optimisation sur périodes soit années sur tronçon

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	Intervention	Coût	Intervention	Coût	Intervention	Coût	
Année 3			mineur	20 145			20 145
Année 6							
Année 9	réhabilitation	45 880					45 880
Année 12			mineur	12 985	mineur	12 618	25 603
Année 15							
Année 18			mineur	9 690			9 690
Année 21	mineur	15 329					15 329

Figure 46 Analyse des interventions sur le tronçon : planification triennale sur 21 ans

Dans l'exemple précédent, la qualité des infrastructures est maintenue juste au-dessus des seuils minima acceptables. Aussi, la variabilité des coûts et des paramètres intervient. Par exemple, un entretien mineur sur la chaussée rehausse le niveau de qualité de 10 en comparaison à 40 pour une réhabilitation soit une amélioration trois fois supérieure pour un coût 67% plus élevé. Une étude de sensibilité est réalisée lors de l'analyse des résultats afin de nuancer les variations des différents paramètres qui influencent la réponse.

5.3.3 Analyse du réseau

Une fois que tous les tronçons sont calculés pour un même horizon de planification, le réseau est analysé dans son ensemble ou secteur par secteur. Les pages-écrans affichant les résultats sont générées en appuyant sur le bouton de commande «Analyse réseau». La figure 47 illustre les résultats sur l'ensemble du réseau tandis que la figure 48 montre un réseau partiel composé des tronçons de la rue de l'Église.

Analyse sur le réseau

Optimisation : annuelle sur 10 périodes soit 10 années sur réseau : complet

Interventions pendant la première période

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
BANN0T002				
BANN0T001				
NEWM0T002				
NEWM0T001				
CLAU0T002	67 786	réhabilitation		
CLAU0T001				
JOSE0T006	36 173			réhabilitation
JOSE0T005	24 757			réhabilitation
JOSE0T004	55 181	réhabilitation		réhabilitation
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	100 214	réhabilitation	mineur	
EVEL0T004	39 158		réhabilitation	
GERT0T005				
GERT0T004	26 198		réhabilitation	
ETHE0T004				
FTHE0T003				

Figure 47 Analyse des interventions sur l'ensemble du réseau

Analyse sur le réseau

Optimisation : annuelle sur 10 périodes soit 10 années sur réseau : partiel

Interventions pendant la première période

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
EGLI0T012	18 095	réhabilitation		
EGLI0T011	31 238	reconstruction		
EGLI0T010	34 362	reconstruction		
EGLI0T009	35 619	reconstruction		
EGLI0T008	35 284	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T007	47 430	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T006	47 553	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T005	32 958	réhabilitation	réhabilitation	
Coût total	282 539			

Figure 48 Analyse des interventions sur une partie du réseau

Pour faciliter la compréhension, les informations sur les interventions et leurs coûts sont imprimés dans un document formaté en Microsoft Word. Un exemple d'une planification triennale sur 7 périodes est monté au tableau V.

Tableau V

Compilation des coûts pour période de planification

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18	An 21
BANN0T002	20 145		45 880	25 603		9 690	15 329
BANN0T001	52 889				19 391		
NEWM0T002	21 859			44 744			
NEWM0T001	10 902			17 967	12 224	5 244	
CLAU0T002	61 484			39 633		10 097	
CLAU0T001	11 118			21 317		10 184	
JOSE0T006	65 557			39 633			8 514
JOSE0T005	40 998	17 461				5 834	4 677
JOSE0T004	152 594						
VERD0T005							15 329
VERD0T004							14 860
EVEL0T005	115 594			59 222			8 859
EVEL0T004	35 518	52 160		14 155			24 178
GERT0T005			52 648	13 670			26 402
GERT0T004	23 762	56 199		14 450		18 777	9 315
ETHE0T004				58 590			
ETHE0T003		53 112		17 863			15 329
WELL0T008					32 012		
WELL0T007					34 128		
EGLI0T012	28 210			10 580		3 528	
EGLI0T011	29 464		13 214	4 722			
EGLI0T010	31 557		14 536			3 519	
EGLI0T009	32 633		15 068	4 822			3 108
EGLI0T008	32 003			17 755			3 055
EGLI0T007	31 332		14 536	4 666			3 008
EGLI0T006	31 445		14 536	4 739			3 055
EGLI0T005	29 894			4 822	9 921		3 108
HICK0T012	7 325	14 271		9 516		8 292	3 090
HICK0T011	7 921		12 328	9 800		3 810	7 145

Tableau V (suite)

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18	An 21
HICK0T010	7 170			19 411		3 449	2 911
HICK0T009	6 323			19 481		3 042	3 065
HICK0T008	25 202		18 806	4 761		4 176	3 069
HICK0T007	7 369		5 499	15 349		3 544	3 029
HICK0T006	23 812		5 440	4 700		8 275	3 029
HICK0T005	7 507		5 602	20 762		3 611	6 518
DUPU0T003	19 695		14 697	4 271			2 753
DUPU0T002	63 953					5 684	
DUPU0T001	27 246			12 696			
REGI0T005	38 379		5 608			3 615	
REGI0T004	12 175		5 479	12 529		3 532	
REGI0T003	11 881		20 477			3 785	
REGI0T002	11 685	20 171	6 034			10 629	
REGI0T001	12 581		5 685	13 747		3 665	
Coût total	1 149 182	213 374	276 073	565 976	107 676	135 982	192 735

Bien que le gestionnaire puisse voir les coûts impliqués à chaque période de planification, il est principalement intéressé à ceux de la première période. Le tableau VI montre un extrait du document, en format Microsoft Word, qui indique les interventions à programmer sur chaque infrastructure.

Tableau VI

Compilation des interventions pendant la première période de planification

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
BANN0T002	20 145	réhabilitation	mineur	
BANN0T001	52 889		réhabilitation	
NEWM0T002	21 859		réhabilitation	
NEWM0T001	10 902	réhabilitation	mineur	
CLAU0T002	61 484			
CLAU0T001	11 118		mineur	
JOSE0T006	65 557	reconstruction	réhabilitation	réhabilitation
JOSE0T005	40 998		réhabilitation	réhabilitation
JOSE0T004	152 594		reconstruction	reconstruction

Tableau VI (suite)

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	115 594	réhabilitation	réhabilitation	
EVEL0T004	35 518		réhabilitation	
GERT0T005				
GERT0T004	23 762		réhabilitation	
ETHE0T004				
ETHE0T003				
WELL0T008				
WELL0T007				
EGLI0T012	28 210	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T011	29 464	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T010	31 557	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T009	32 633	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T008	32 003	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T007	31 332	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T006	31 445	réhabilitation	réhabilitation	
EGLI0T005	29 894	réhabilitation	réhabilitation	
HICK0T012	7 325		mineur	
HICK0T011	7 921		mineur	
HICK0T010	7 170		mineur	
HICK0T009	6 323		mineur	
HICK0T008	25 202	réhabilitation	mineur	
HICK0T007	7 369		mineur	
HICK0T006	23 812	réhabilitation	mineur	
HICK0T005	7 507		mineur	
DUPU0T003	19 695	réhabilitation		
DUPU0T002	63 953		réhabilitation	
DUPU0T001	27 246		réhabilitation	
REGI0T005	38 379	reconstruction	réhabilitation	
REGI0T004	12 175		réhabilitation	
REGI0T003	11 881		réhabilitation	
REGI0T002	11 685		réhabilitation	
REGI0T001	12 581		réhabilitation	
Coût total	1 149 182			

5.4 Analyse des résultats

L'analyse des résultats porte sur une planification triennale où le gestionnaire doit recommander les interventions sur les réseaux d'infrastructures pour les trois prochaines années. Bien que les décisions ne visent que la première période d'analyse, le choix de l'horizon de planification influence le type d'intervention. D'autres paramètres comme les seuils minimums d'intervention et les économies dues à des interventions simultanées sont aussi soumis à un examen approfondi.

5.4.1 Variations de l'horizon de planification

Les tableaux V et VI montrés précédemment résumaient les interventions à mettre en œuvre pendant les 21 prochaines années. En examinant le tableau VI, on constate que sur 43 tronçons, 36 nécessitent une intervention durant la première période de planification. En faisant varier l'horizon de planification, la même remarque s'applique mais le choix du traitement varie, donc les coûts fluctuent. Le tableau VII montre la compilation des valeurs présentes des interventions à l'année 0 et les valeurs annuelles actualisées selon chaque horizon de planification.

Tableau VII

Tableau synthèse selon une planification triennale

Horizon en périodes	Valeur présente en dollars	Valeur annuelle en dollars
T2	1 022 269	201 405
T3	1 285 051	180 794
T4	1 974 509	222 775
T5	2 095 573	201 892
T6	2 365 052	202 321
T7	2 640 998	205 988

Au tableau VII, T4 signifie qu'une planification triennale est effectuée sur quatre périodes, T5 sur cinq périodes, etc. Puisque aucune tendance générale ne s'en dégage, un examen microscopique est nécessaire pour mettre en évidence les différences entre les six versions calculées. Le tableau VIII résume les coûts d'intervention pendant la première période selon la durée de l'horizon de planification.

Tableau VIII

Comparaison des coûts de première période selon l'horizon de planification

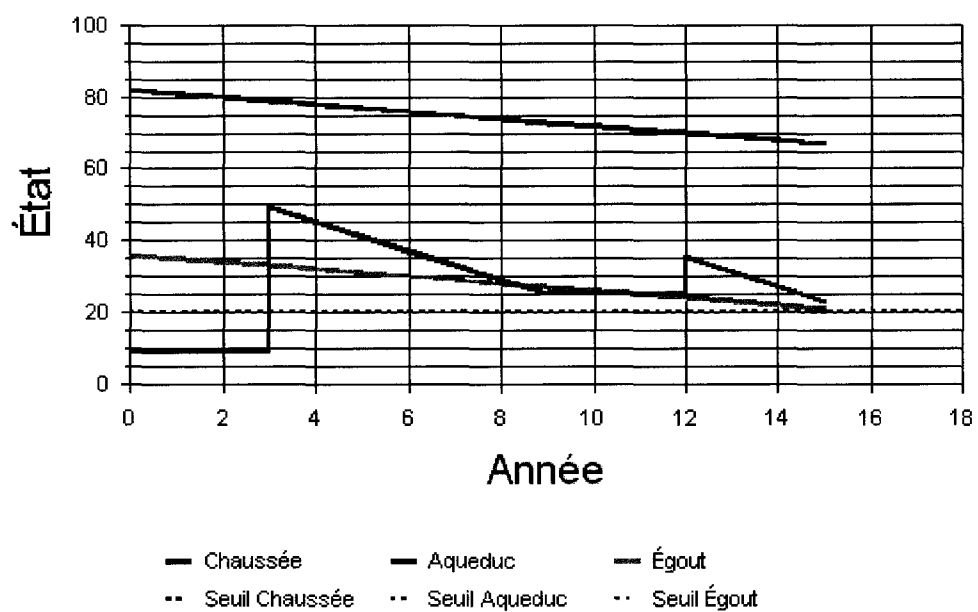
Tronçon	T4 en dollars	T5 en dollars	T6 en dollars	T7 en dollars
BANN0T002	20 145	20 145	20 145	20 145
BANN0T001	52 889	52 889	52 889	52 889
NEWM0T002	21 859	21 859	21 859	21 859
NEWM0T001	10 902	10 902	10 902	10 902
CLAU0T002	61 484	61 484	98 374	61 484
CLAU0T001	11 118	11 118	11 118	11 118
JOSE0T006	65 557	65 557	65 557	65 557
JOSE0T005	29 798	40 998	40 998	40 998
JOSE0T004	122 077	132 434	150 005	152 594
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	90 897	90 897	157 927	115 594
EVEL0T004	35 518	35 518	35 518	35 518
GERT0T005				
GERT0T004	23 762	23 762	23 762	23 762
ETHE0T004				
ETHE0T003				
WELL0T008				
WELL0T007				
EGLI0T012	28 210	28 210	38 058	28 210
EGLI0T011	29 464	40 089	40 089	29 464
EGLI0T010	31 557	43 245	43 245	31 557
EGLI0T009	32 633	44 749	44 749	32 633
EGLI0T008	32 003	44 119	44 119	32 003
EGLI0T007	31 332	43 020	43 020	31 332

Tableau VIII (suite)

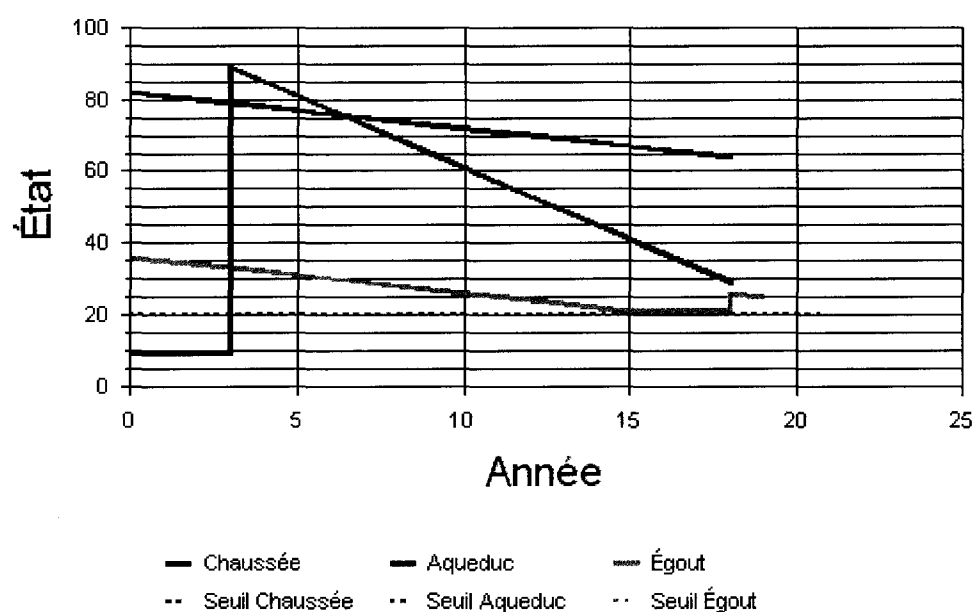
Tronçon	T4 en dollars	T5 en dollars	T6 en dollars	T7 en dollars
EGLI0T006	31 445	43 132	43 132	31 445
EGLI0T005	29 894	29 894	29 894	29 894
HICK0T012	7 325	7 325	7 325	7 325
HICK0T011	7 921	7 921	7 921	7 921
HICK0T010	7 170	7 170	7 170	7 170
HICK0T009	6 323	6 323	6 323	6 323
HICK0T008	25 202	35 115	35 115	25 202
HICK0T007	7 369	7 369	7 369	7 369
HICK0T006	23 812	23 812	23 812	23 812
HICK0T005	7 507	7 507	7 507	7 507
DUPU0T003	19 695	31 513	31 513	19 695
DUPU0T002	63 953	63 953	63 953	63 953
DUPU0T001	27 246	27 246	27 246	27 246
REGI0T005	28 117	28 117	38 379	38 379
REGI0T004	12 175	12 175	12 175	12 175
REGI0T003	11 881	11 881	11 881	11 881
REGI0T002	11 685	11 685	11 685	11 685
REGI0T001	12 581	12 581	12 581	12 581
Coût total	1 072 506	1 185 714	1 327 315	1 149 182

Les résultats sur un horizon de quatre périodes triennales sont éliminés de l'analyse parce qu'ils préconisent des interventions moins onéreuses et à plus courte portée mais sont malgré tout suffisantes pour maintenir l'état de chaque infrastructure au-dessus des seuils minimums pendant les 12 années d'analyse. Cette évaluation permet de faire ressortir les tronçons où une action est requise dès la première période d'analyse.

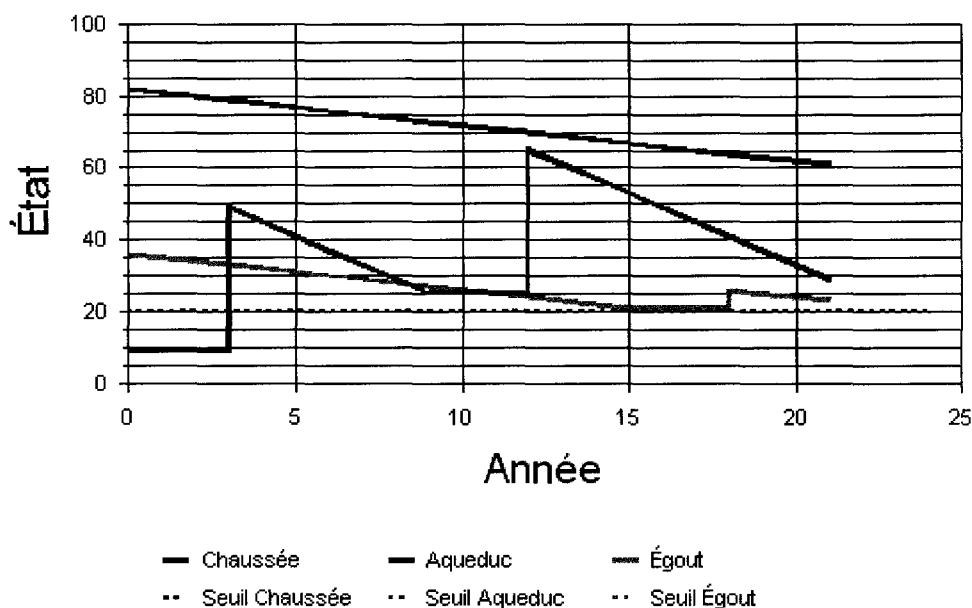
Le tronçon CLAU0T002 et dix autres ont le même comportement, c'est-à-dire que les coûts requis à la première période sont plus élevés lors d'une analyse sur six périodes que sur cinq ou sept. Les graphiques 20 à 22 montrent l'état des infrastructures pour des horizons de cinq, six et sept périodes soit respectivement 15, 18 et 21 ans. Dans ces graphiques, les seuils de l'aqueduc et de l'égout sont masqués par celui de la chaussée car ils ont la même valeur de 20.



Graphique 20 État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 5 périodes

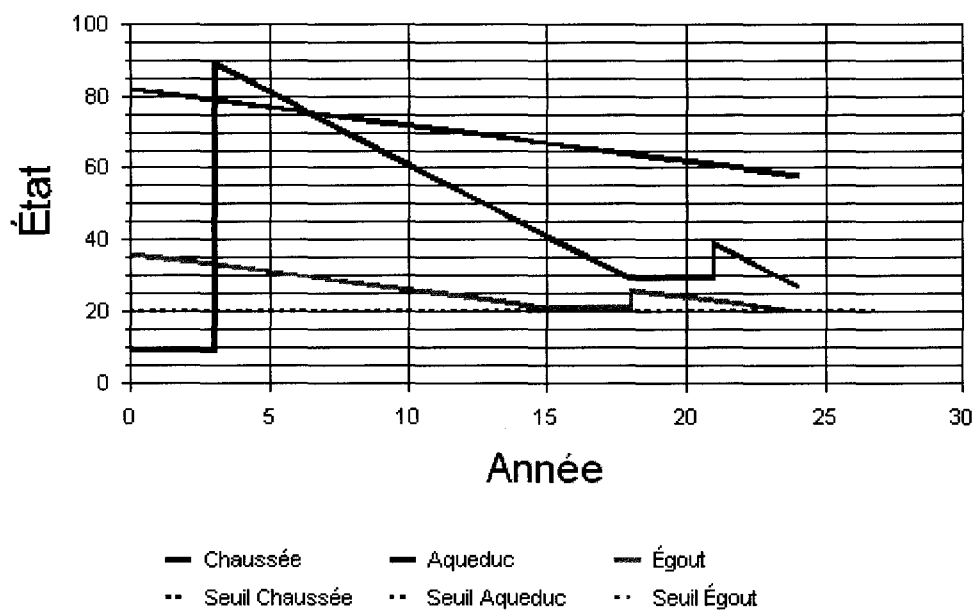


Graphique 21 État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 6 périodes

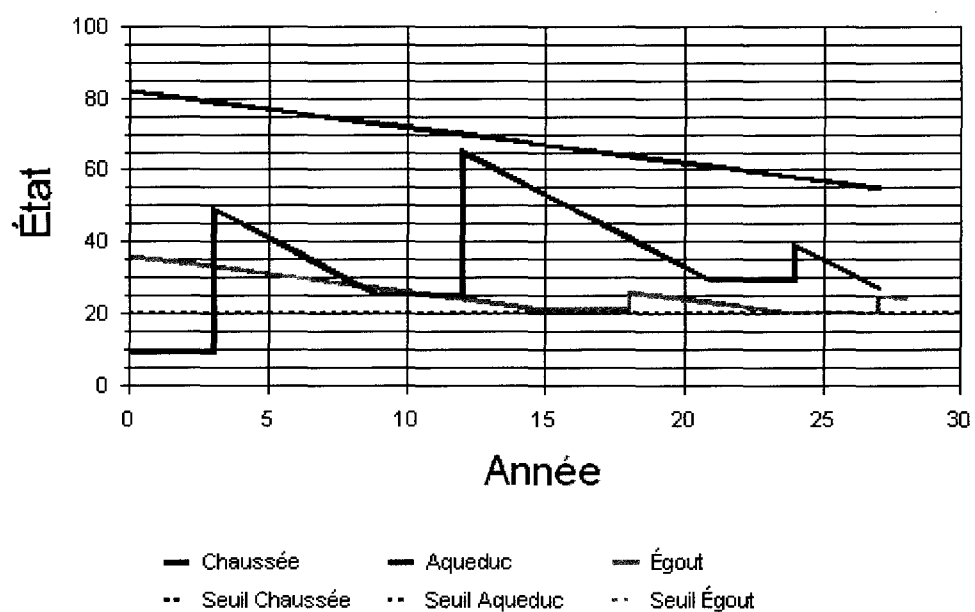


Graphique 22 État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 7 périodes

Sur un horizon de 15 ans, une réhabilitation de la chaussée dès la première période suivie d'un entretien mineur à la quatrième période permettent de maintenir l'état de la chaussée au-dessus du seuil, pour un coût de 85 264 dollars sur quinze ans. Par contre, sur 18 ans, il est plus économique de reconstruire immédiatement, ce qui génère un coût de 98 374 dollars sur 18 années. Sur un horizon de 21 ans, la solution la plus économique est de procéder à deux réhabilitations, une à la première période et l'autre à la quatrième, pour un coût total de 101 117 dollars sur 21 ans. En approfondissant cette analyse sur des horizons de 24 et 27 années, le même phénomène se produit, illustré par les graphiques 23 et 24. Sur huit périodes d'analyse, une reconstruction immédiate et un entretien mineur à la septième période sont la solution la plus économique, elle revient à 113 703 dollars sur 24 ans. Cependant, sur neuf périodes, une réhabilitation à la première période, une autre à la quatrième période et un entretien mineur à la huitième période revient à 114 358 dollars pendant les 27 années.



Graphique 23 État du tronçon CLAU0T002 : planification triennale sur 8 périodes



Graphique 24 État du tronçon CLAU0T002: planification triennale sur 9 périodes

Ces résultats démontrent qu'une période d'analyse plus longue n'engendre pas nécessairement le résultat le plus fiable. Par conséquent, pour la suite des analyses, un horizon de planification de six périodes représentant une analyse sur 18 ans semble être un compromis acceptable entre la vraisemblance des résultats et le temps de calcul. Le tableau IX indique les coûts des interventions pour cet horizon d'analyse lorsque les seuils minimaux sont fixés à 20 pour les trois infrastructures.

Tableau IX

Interventions compilées sur un horizon de 18 ans
pendant la première période de planification triennale

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
BANN0T002	20 145	réhabilitation	mineur	réhabilitation réhabilitation réhabilitation
BANN0T001	52 889		réhabilitation	
NEWM0T002	21 859		réhabilitation	
NEWM0T001	10 902		mineur	
CLAU0T002	98 374	reconstruction	mineur	
CLAU0T001	11 118		réhabilitation	
JOSE0T006	65 557		réhabilitation	
JOSE0T005	40 998		réhabilitation	
JOSE0T004	150 005	reconstruction	réhabilitation	
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	157 927	reconstruction	réhabilitation	
EVEL0T004	35 518		réhabilitation	
GERT0T005				
GERT0T004	23 762		réhabilitation	
ETHE0T004				
ETHE0T003				
WELL0T008				
WELL0T007				
EGLI0T012	38 058	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T011	40 089	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T010	43 245	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T009	44 749	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T008	44 119	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T007	43 020	reconstruction	réhabilitation	

Tableau IX (suite)

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
EGLI0T006	43 132	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T005	29 894	réhabilitation	réhabilitation	
HICK0T012	7 325		mineur	
HICK0T011	7 921		mineur	
HICK0T010	7 170		mineur	
HICK0T009	6 323		mineur	
HICK0T008	35 115	reconstruction	mineur	
HICK0T007	7 369		mineur	
HICK0T006	23 812	réhabilitation	mineur	
HICK0T005	7 507		mineur	
DUPU0T003	31 513	reconstruction		
DUPU0T002	63 953		réhabilitation	
DUPU0T001	27 246		réhabilitation	
REGI0T005	38 379	reconstruction	réhabilitation	
REGI0T004	12 175		réhabilitation	
REGI0T003	11 881		réhabilitation	
REGI0T002	11 685		réhabilitation	
REGI0T001	12 581		réhabilitation	
Coût total	1 327 315			

Les graphiques 20 à 24 confirment que le choix de l'horizon de planification influence le type d'intervention. Le modèle se comporte comme si, au bout de la période de planification, les infrastructures cessaient tout simplement de fonctionner. Or, elles continuent de fonctionner et ont une valeur résiduelle. Cette situation vient du fait que le choix des interventions à l'intérieur d'un horizon de planification est guidé par une minimisation des coûts et de l'obtention de la valeur résiduelle des infrastructures la plus faible possible au bout de l'horizon de planification.

Les graphiques 20 à 24 le montrent clairement, en particulier pour les chaussées, dont la dégradation en fonction du temps est importante. Le modèle semble privilégier une solution dans laquelle l'état du tronçon tend vers l'état minimal, pour chacune des infrastructures. Cette recherche d'une solution optimale dans laquelle la valeur résiduelle est la plus faible est guidée par les contraintes imposées dans le modèle sur les seuils

minimums d'état des infrastructures. Il est donc clair que ce modèle va tendre vers un état des infrastructures le plus bas possible à la fin de l'horizon de temps choisi, et adapter sa stratégie d'intervention sur les infrastructures en conséquence.

Par contre, ce «problème» n'est pas majeur et la situation est rassurante de constater que le coût annuel des interventions reste inchangé, ou presque, peu importe l'horizon choisi. En d'autres termes, si on fixait l'horizon à 50 années, le choix des interventions durant les 20 premières années serait probablement très semblable à celui dans lequel l'horizon de temps serait «infini», et serait similaire à celui observé pour un horizon de temps de 40 ans.

On peut présumer qu'il y aurait une stabilisation des coûts annuels, et probablement des stratégies d'intervention, à mesure que l'horizon de temps choisi augmente. Les gestionnaires plus sceptiques pourront faire rouler le SAGE pour des horizons 40 à 50 ans, et utiliser les résultats du modèle pour planifier les interventions sur les premiers 10 ans.

5.4.2 Variations des seuils minimums d'intervention

Les résultats des calculs montrés au tableau X sont basés sur des seuils minimums représentant une qualité de 20 pour les trois infrastructures. Ils identifient un nombre important de tronçons déficients où il faut intervenir dès la première période d'analyse. Il faudrait agir sur 84% des tronçons, soit 16 sections de chaussée, 34 sections d'aqueduc et 3 sections d'égout. Cette situation est due à la piètre qualité de la surface de la chaussée et à l'âge des conduites d'aqueduc.

Tableau X

Interventions compilées sur un horizon de 18 ans

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18
BANN0T002	20 145	17 461	45 880	25 603	11 635	9 690
BANN0T001	52 889					
NEWM0T002	21 859			38 199		
NEWM0T001	10 902			13 860		5 244
CLAU0T002	98 374					10 097
CLAU0T001	11 118			21 317		10 184
JOSE0T006	65 557			39 633		
JOSE0T005	40 998					5 834
JOSE0T004	150 005					
VERD0T005						
VERD0T004						
EVEL0T005	157 927	52 160	52 648	13 743	19 207	
EVEL0T004	35 518			14 155		
GERT0T005				13 670		
GERT0T004	23 762			14 450		18 777
ETHE0T004				58 590		
ETHE0T003				17 863		
WELL0T008						
WELL0T007					20 477	
EGLI0T012	38 058				5 953	3 528
EGLI0T011	40 089			4 722		
EGLI0T010	43 245					3 519
EGLI0T009	44 749			4 822		
EGLI0T008	44 119			4 739		
EGLI0T007	43 020			4 666		
EGLI0T006	43 132			4 739		
EGLI0T005	29 894			4 822		
HICK0T012	7 325	14 271	12 328	9 516		8 292
HICK0T011	7 921			9 800		3 810
HICK0T010	7 170			19 411		3 449
HICK0T009	6 323			19 481		3 042
HICK0T008	35 115			4 761		4 176
HICK0T007	7 369			15 349		3 544
HICK0T006	23 812			4 700		8 275
HICK0T005	7 507			20 762		3 611
DUPU0T003	31 513			4 271		
DUPU0T002	63 953					5 684
DUPU0T001	27 246			12 696		

Tableau X (suite)

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18
REGI0T005	38 379		5 608			3 615
REGI0T004	12 175		5 479	12 529		3 532
REGI0T003	11 881		20 477			3 785
REGI0T002	11 685	20 171	6 034			10 629
REGI0T001	12 581		5 685	13 747		3 665
Coût total	1 327 315	213 374	177 158	446 616	64 607	135 982

En considérant que l'aqueduc est en réalité de meilleure qualité que les calculs le prédisent, le calcul de la qualité de l'aqueduc est modifié et passe de $100 - \text{âge}$ à $110 - \text{âge}$. Dans ce cas, aucune section d'aqueduc n'a besoin d'une intervention immédiate. Mais cette procédure engendre des aberrations pour les conduites les plus jeunes. Par exemple, sur les tronçons de la rue Verdun refaits depuis cinq ans, la qualité de l'aqueduc est supérieure à 100, la limite maximum d'une infrastructure parfaite.

L'analyse des résultats indique une disparité importante entre les diverses périodes d'analyse. Cette différence peut être amoindrie en procédant à un nivellement des ressources tel que pratiqué en gestion de projets. La difficulté consiste à identifier les tronçons où l'intervention peut être retardée à la période d'analyse suivante. Cette pratique implique une étude de l'incidence des reports, étude qui requiert des données qui ne sont pas nécessairement disponibles.

Une autre approche pour réduire le nombre de tronçons où il faut agir dès la première période de planification est d'abaisser les seuils minimums d'intervention. Une passe informatique avec des seuils minimums de 5 pour la chaussée et 15 pour les infrastructures enfouies, donne des résultats qui limitent les interventions à 13 sections de chaussée, 3 sections d'égout et aucune d'aqueduc.

Un aperçu des cotes de qualité des infrastructures montre que l'état de plusieurs sections d'aqueduc se situe au niveau de la limite minimale tandis que celui de la chaussée est vraiment inférieur au seuil. Dans cette situation, peu importe la stratégie adoptée, de nombreuses sections de chaussée devront être traitées. En fixant les seuils minimums à 5, 18 et 20 respectivement pour la chaussée, l'aqueduc et l'égout, les coûts sont estimés à 762 517 dollars pour la planification triennale et à 2 193 860 dollars pour les 18 prochaines années, soit 187 676 dollars par année. Le tableau XI récapitule les coûts d'intervention générés par cette planification triennale.

Tableau XI

Coûts d'intervention générés par une planification triennale avec des seuils minimums de 5, 18 et 20 respectivement pour la chaussée, l'aqueduc et l'égout

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18
BANN0T002		17 402	45 880	25 603		
BANN0T001		45 688				10 051
NEWM0T002		18 882		10 886	23 594	
NEWM0T001		9 417		13 860	7 335	
CLAU0T002	98 374					10 097
CLAU0T001		9 604		7 166	12 224	4 837
JOSE0T006	32 810	28 288		39 633		
JOSE0T005	22 455	16 018	15 084			5 834
JOSE0T004	50 051	71 166			16 306	
VERD0T005						
VERD0T004						
EVEL0T005	133 230			26 856		9 786
EVEL0T004	35 518		45 058	14 155		
GERT0T005			52 648	13 670		
GERT0T004	23 762		48 547	14 450		18 777
ETHE0T004				58 590		
ETHE0T003			45 880	17 863		
WELL0T008					19 207	
WELL0T007					20 477	
EGLI0T012	26 261	10 191				3 528
EGLI0T011	28 334	10 154		4 722		
EGLI0T010	31 167	10 433				3 519
EGLI0T009	32 308	10 747		4 822		
EGLI0T008	44 119			4 739		

Tableau XI (suite)

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18
EGLI0T007	43 020			4 666		
EGLI0T006	43 132			4 739		
EGLI0T005	12 077	15 391		4 822	5 953	
HICK0T012		6 328	12 328	9 516		4 768
HICK0T011		6 843		20 450		
HICK0T010		6 194		19 411		
HICK0T009		5 462		19 481		
HICK0T008	35 115			10 357		
HICK0T007	7 369			9 450	9 199	
HICK0T006	7 291	14 271		9 399		4 768
HICK0T005	7 507			25 601		
DUPU0T003	31 513				3 689	
DUPU0T002		55 245				5 684
DUPU0T001		23 536		12 696		
REGI0T005	17 104	9 514	5 608		9 524	3 615
REGI0T004		10 517	5 479		10 823	3 532
REGI0T003		10 263	5 872	12 616		3 785
REGI0T002		10 094	23 458			10 629
REGI0T001		10 868	5 685		11 875	3 665
Coût total	762 517	442 516	311 527	420 219	150 206	106 875

La modification des seuils minimums d'intervention est une stratégie «discutable» pour pallier à l'absence de contraintes budgétaires. Le fait de baisser les seuils minimaux implique que les citoyens sont prêts à accepter des infrastructures de moins bonne qualité pour ne pas augmenter leur fardeau fiscal. Cette affirmation est lourde de conséquences pour de nombreux citoyens qui n'hésitent pas à se faire entendre.

5.4.3 Variations de l'économie des interventions simultanées

L'analyse du tableau XII montre que 21 tronçons requièrent une intervention dans le prochain programme triennal. De ce nombre, 13 interventions s'effectuent sur la chaussée, 11 sur l'aqueduc et 3 sur l'égout. Aucun tronçon ne bénéficie des économies générées par des interventions de reconstruction simultanée des trois infrastructures.

Pour ce faire, il faudrait que les trois infrastructures nécessitent une intervention rapidement.

Tableau XII

Interventions compilées sur un horizon de 18 ans
pendant la première période de planification triennale avec des
seuils minimums de 5, 18 et 20 respectivement pour la chaussée, l'aqueduc et l'égout

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
BANN0T002				
BANN0T001				
NEWM0T002				
NEWM0T001				
CLAU0T002	98 374	reconstruction		
CLAU0T001				
JOSE0T006	32 810			Réhabilitation
JOSE0T005	22 455			Réhabilitation
JOSE0T004	50 051	réhabilitation		Réhabilitation
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	133 230	reconstruction	mineur	
EVEL0T004	35 518		réhabilitation	
GERT0T005				
GERT0T004	23 762		réhabilitation	
ETHE0T004				
ETHE0T003				
WELL0T008				
WELL0T007				
EGLI0T012	26 261	reconstruction		
EGLI0T011	28 334	reconstruction		
EGLI0T010	31 167	reconstruction		
EGLI0T009	32 308	reconstruction		
EGLI0T008	44 119	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T007	43 020	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T006	43 132	reconstruction	réhabilitation	
EGLI0T005	12 077		réhabilitation	
HICK0T012				
HICK0T011				
HICK0T010				

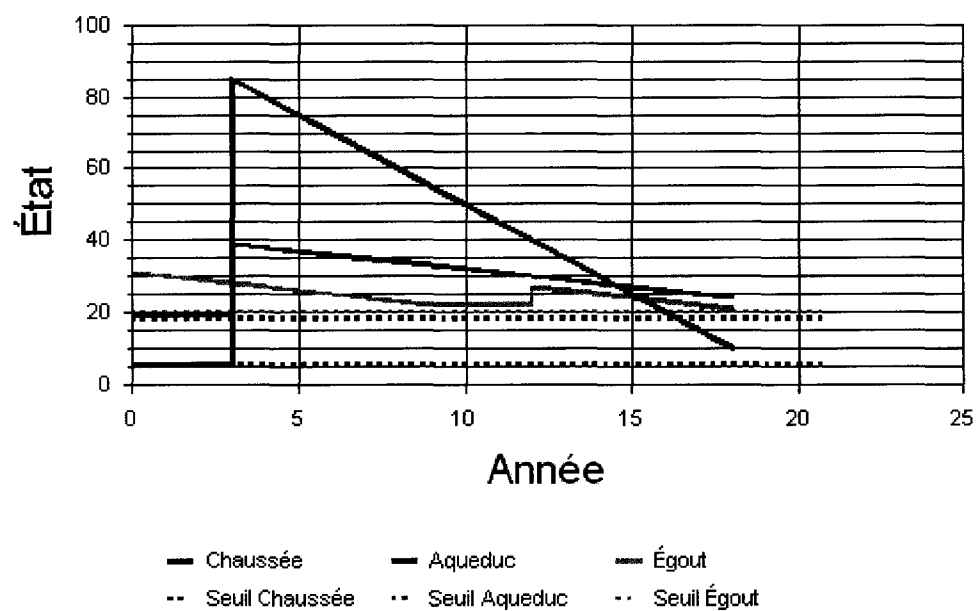
Tableau XII (suite)

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
HICK0T009				
HICK0T008	35 115	reconstruction	mineur	
HICK0T007	7 369		mineur	
HICK0T006	7 291		mineur	
HICK0T005	7 507		mineur	
DUPU0T003	31 513	reconstruction		
DUPU0T002				
DUPU0T001				
REGI0T005	17 104	réhabilitation		
REGI0T004				
REGI0T003				
REGI0T002				
REGI0T001				
Coût total	762 517			

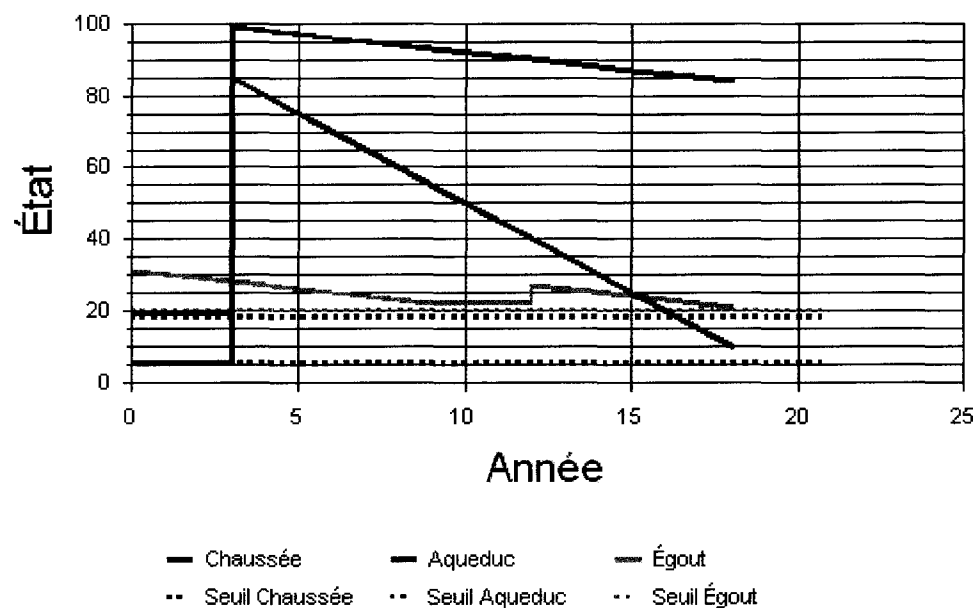
L'analyse du tableau XII fait également ressortir que 11 tronçons doivent être reconstruits dès la première période de planification. Parmi ceux-ci, cinq tronçons requièrent aussi une intervention sur l'aqueduc pendant la même période et quatre à la seconde période de planification. Étant donné que les actions s'appliquent à seulement deux infrastructures, aucune économie n'est réalisée. Constatant ce fait, le programme est modifié pour inclure des économies lors de reconstruction de la chaussée avec l'aqueduc et de la chaussée avec l'égout.

Sur les cinq tronçons qui nécessitent simultanément une reconstruction sur la chaussée et une autre intervention sur l'aqueduc dès la première période de planification, les trois tronçons EGLI0T008, EGLI0T007 et EGLI0T006 ont la même réaction. En appliquant l'économie sur les trois infrastructures, l'action recommandée sur l'aqueduc devient une réhabilitation. Par contre, en permettant cette économie sur deux infrastructures, il est plus économique de procéder à une reconstruction de l'aqueduc. Les répercussions sur l'état des infrastructures sont indiquées, par exemple sur le tronçon EGLI0T008, sur le

graphique 25 lorsque l'économie s'applique aux trois infrastructures et sur le graphique 26 lorsqu'elle s'applique à deux infrastructures.

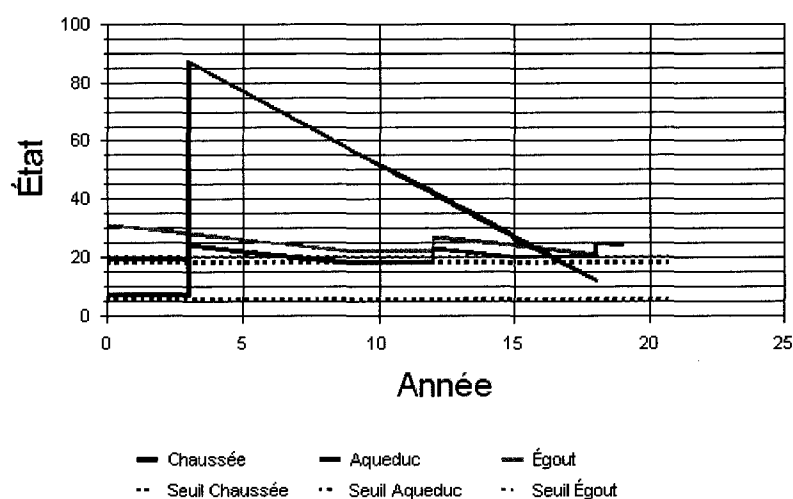


Graphique 25 État du tronçon EGLI0T008 : économie sur 3 infrastructures

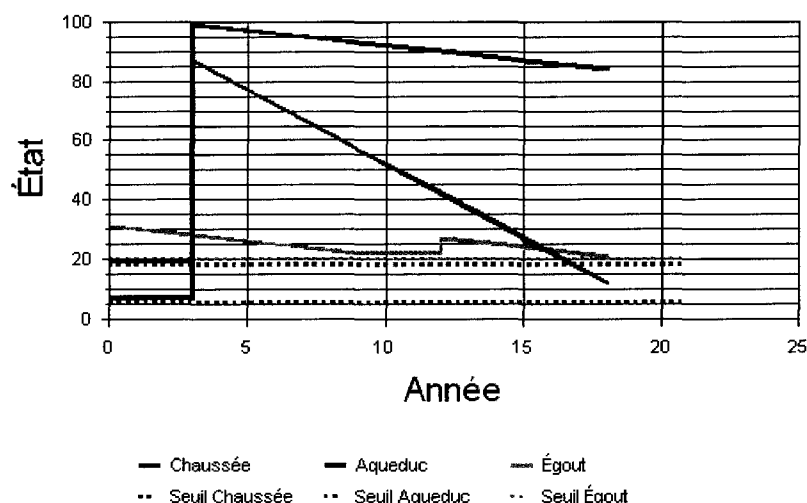


Graphique 26 État du tronçon EGLI0T008 : économie sur 2 infrastructures

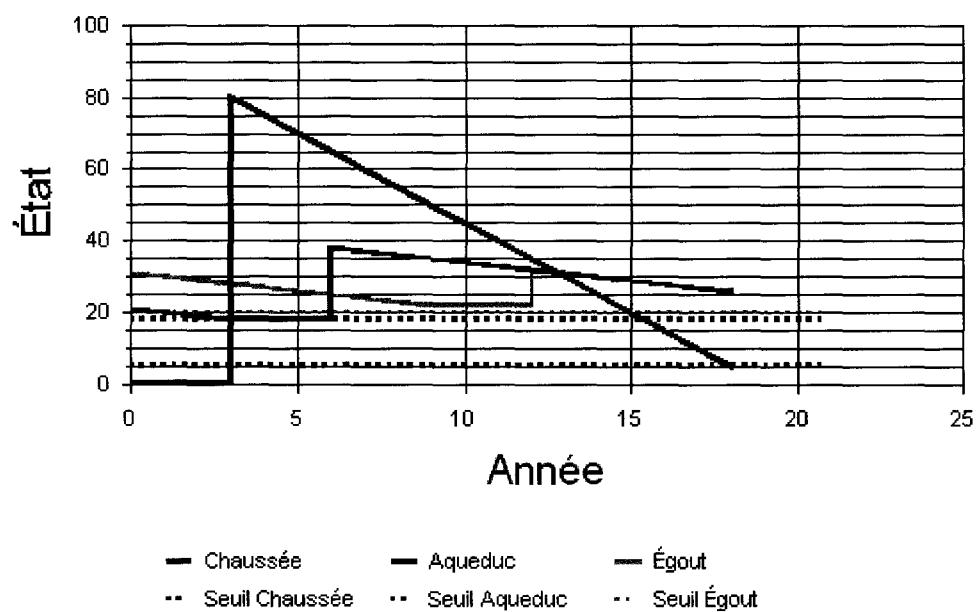
Sur les deux autres tronçons HICK0T008 et EVEL0T005, l'intervention initialement programmée sur l'aqueduc est un entretien mineur, mais leur réaction est différente. En effet, en appliquant l'économie à deux infrastructures, la recommandation demeure la même sur HICK0T008 mais une reconstruction est plus rentable sur EVEL0T005. Les graphiques 27 et 28 représentent l'état des infrastructures sur le tronçon EVEL0T005 dans les deux cas.



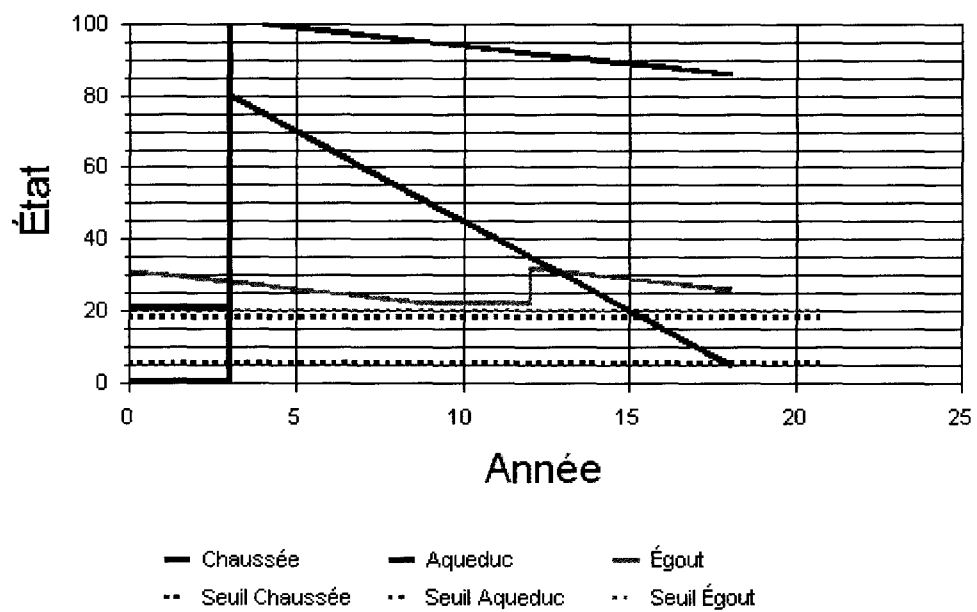
Graphique 27 État du tronçon EVEL0T005 : économie sur 3 infrastructures



Graphique 28 État du tronçon EVEL0T005 : économie sur 2 infrastructures



Graphique 29 État du tronçon EGLI0T011 : économie sur 3 infrastructures



Graphique 30 État du tronçon EGLI0T011 : économie sur 2 infrastructures

Les quatre tronçons EGLI0T009, EGLI0T010, EGLI0T011 et EGLI0T012 se comportent de la même façon lors du calcul des économies. En prenant l'exemple du tronçon EGLI0T011, les graphiques 29 et 30 montrent la modification de la recommandation d'intervention sur l'aqueduc. En effet, en plus de devancer les travaux de réhabilitation prévus à la deuxième période d'analyse, la nouvelle proposition est de reconstruire immédiatement l'aqueduc pour bénéficier des avantages de la reconstruction de la chaussée. Cette situation confirme, sans l'ombre d'un doute, les bienfaits de l'intégration des trois infrastructures dans le même système de décision.

CONCLUSION

Cette thèse a permis d'élaborer le cadre d'un système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles. Elle a justifié l'intérêt d'intégrer l'état de toutes les infrastructures dans la prise de décision en matière d'entretien et de réhabilitation (E&R). Elle a aussi prouvé la faisabilité de cette intégration dans une perspective d'optimisation des investissements. Finalement, elle a démontré le bénéfice de cette initiative dans le contexte du resserrement des budgets et de l'accroissement des besoins en cette matière.

Les infrastructures considérées sont plus particulièrement les chaussées, les réseaux d'égouts pluvial et sanitaire et les réseaux d'aqueduc, bien que les services d'utilités publiques tels les réseaux de distribution d'énergie, de gaz et d'électricité, et les réseaux de communication, de téléphonie et de câblodistribution pourraient être pris en considération. Les composantes des infrastructures civiles sont également définies dans ce document afin de situer les caractéristiques propres à chacun de leur mode de gestion.

Dans cette recherche, seules les informations concernant la chaussée, l'égout et l'aqueduc ont été recueillies et conservées dans une base de données pour modéliser le comportement des infrastructures et recommander des stratégies d'intervention. Ainsi, un tronçon contient une ou plusieurs sections de chaussée, une ou plusieurs sections d'égout et une ou plusieurs sections d'aqueduc. Une procédure standardisée transforme les tronçons ayant plus d'une section de chaque infrastructure selon le principe d'équivalence en termes de coûts. Il est possible d'incorporer dans le système d'autres infrastructures telles que les conduites de gaz, les câbles d'électricité et de téléphonie, etc. Il pourrait ainsi en résulter une meilleure coordination entre les diverses activités de répartition ou de construction.

En gestion des infrastructures civiles, les données sont une ressource indispensable pour la prise de décision. La formulation du diagnostic repose sur les informations recueillies lors de l'auscultation. La justesse de ce diagnostic est fonction de la qualité de l'inspection réalisée. Les modèles de prévision du comportement de chaque infrastructure sont primordiaux dans le choix de la stratégie d'intervention. Actuellement, les modèles prévisionnels des systèmes de gestion des conduites enfouies ne sont pas aussi avancés, sur les plans technologiques et technico-économiques, que ceux des systèmes de gestion des chaussées. Pour les fins de cette thèse, compte tenu du peu d'informations disponibles notamment pour les conduites souterraines, les modèles retenus sont linéaires pour chaque infrastructure. Son objectif a été de démontrer la faisabilité de l'intégration des différentes infrastructures dans un même système de décision.

Le système d'aide à la décision permet au gestionnaire d'identifier facilement les tronçons où une action est requise, le type d'intervention à privilégier ainsi que le moment le plus propice pour intervenir. La modélisation de la prise de décision constitue un élément important, voire indispensable, pour résoudre un problème d'optimisation. Cette étape a consisté à créer un modèle, c'est-à-dire reproduire la réalité d'un problème en ne retenant que les éléments essentiels. Ces éléments sont l'état actuel et prévisionnel des différentes infrastructures et les contraintes physiques subies par les infrastructures en termes de sollicitations. Le modèle est ouvert permettant d'inclure d'autres éléments comme les moyens mis à la disposition du gestionnaire en termes de ressources, les contraintes externes, politiques, socio-économiques, etc.

La formulation de la prise de décision comprend une fonction objectif et un certain nombre de contraintes. La fonction objectif est une fonction économique qui vise à minimiser les dépenses d'investissement sur chaque infrastructure pendant toute la période de planification. Les économies possiblement réalisées sur des travaux dans des

tronçons adjacents sont négligées, ce coût minimum est donc obtenu lorsque les tronçons sont considérés individuellement.

À cette fonction objectif ont été ajoutées les contraintes d'acceptabilité, les contraintes de faisabilité et les contraintes d'intégrité. Les contraintes d'acceptabilité spécifient les limites acceptables de serviabilité de chaque infrastructure. Les contraintes de faisabilité indiquent qu'une seule action par année est possible, soit quatre interventions possibles :

- a. ne rien faire;
- b. entretien mineur;
- c. réhabilitation;
- d. reconstruction.

Quant aux contraintes d'intégrité, elles limitent les variables de décision à deux seules possibilités, soit de faire une action précise à un temps donné ou de ne pas la faire. Ainsi, les variables de décision sont des variables binaires prenant la valeur 0 ou 1.

Le problème est résolu par programmation en nombre entier binaire pour lequel les propriétés des variables de décision sont exploitées. Une approche exhaustive où toutes les solutions possibles sont évaluées énumère, avec des variables de décision binaires, l'ensemble de toutes les solutions et contient 2^n éléments où n est le nombre de variables. Le concept de l'algorithme additif a été utilisé en considérant de façon implicite un certain nombre de variables. Cette façon de procéder permet de trouver des solutions optimales avec les ressources informatiques disponibles dans les services municipaux.

Un prototype SAGE, qui intègre les données des différentes infrastructures dans le même système de décision, a été développé et appliqué à un secteur de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal. Ce prototype, programmé en Visual Basic, lit les données nécessaires à son traitement, directement dans les bases de données Microsoft

Access conçues par les systèmes de gestion de la chaussée, de l'aqueduc et de l'égout. Les données concernant les paramètres d'intervention et les coûts unitaires sont paramétriques et conservées dans des fichiers indépendants.

Pour chaque tronçon du secteur étudié, il y a quatre actions possibles sur trois infrastructures, c'est-à-dire 4^3 soit 64 variables de décision par année de planification. Le nombre de contraintes est cinq par année de planification, soit une pour spécifier les seuils par infrastructure et deux par année de planification pour transformer la contrainte de faisabilité d'une forme d'égalité à une forme d'inégalité. Ainsi, sur un horizon de dix ans, il y a 640 variables de décision et 50 contraintes. Pour planifier sur des périodes plus longues, le SAGE offre au gestionnaire de procéder à une planification annuelle, triennale ou quinquennale.

L'analyse des résultats repose sur une planification triennale où le gestionnaire doit recommander les interventions sur les réseaux d'infrastructures pour les trois prochaines années. Bien que les décisions ne visent que la première période d'analyse, le choix d'un horizon de planification long est important. L'analyse porte aussi sur les seuils minimums d'intervention et les économies dues à des interventions simultanées. Les résultats complets des recommandations pour chaque tronçon sont fournis à l'annexe 2.

Cette thèse a démontré la faisabilité de l'intégration des différentes infrastructures dans un même système de décision. La mise en opération d'un SAGE des infrastructures civiles est prometteuse et contribuera, sans aucun doute, à l'amélioration de la qualité du processus de décision. L'objectif ultime est de fournir aux gestionnaires un outil pour leur permettre une programmation rentable des interventions à entreprendre, année après année, durant toute la période de planification. Le SAGE vient en appui au gestionnaire, et grâce au SAGE, le gestionnaire peut pousser plus loin sa propre expertise, en s'appuyant sur les résultats du SAGE pour gérer plus globalement et plus efficacement l'entretien des infrastructures.

RECOMMANDATIONS

Cette thèse s'appuie sur les modèles linéaires de prévision du comportement de chaque infrastructure afin de prouver la faisabilité de l'intégration des différentes infrastructures dans le même système de décision.

L'idée de cette thèse a mûri des recommandations publiées par Bruxelles (1999) dans le projet d'application sur la définition d'un système intégré de gestion des infrastructures civiles SIGIC. À partir de l'élaboration du SAGE proposé dans ce document, la suite de ce projet peut prendre plusieurs aspects et tracer la voie à d'autres projets, notamment :

- a. étendre le problème à des modèles prévisionnels non linéaires;
- b. ajouter des contraintes;
- c. développer les autres modules du SAGE;
- d. créer un outil de simulation permettant d'évaluer les impacts de décision inopportune.

R1 Extension du problème à des modèles prévisionnels non linéaires

Le problème d'optimisation a été simplifié en rendant linéaires les contraintes pour faciliter sa résolution sans introduire de biais au modèle. Maintenant que la faisabilité est prouvée, la prévision du comportement peut suivre des modèles non linéaires pour peaufiner l'exactitude de la prise de décision.

R2 Ajout de contraintes

Des contraintes supplémentaires peuvent être ajoutées au modèle pour tenir compte des autres infrastructures soient les ouvrages d'art, les trottoirs ou les services d'utilités publiques. Des contraintes d'adjacence peuvent prendre en considération d'éventuelles économies lorsque des tronçons de rue doivent être traités au même moment. La prise de

décision est «quelquefois» influencée par des interventions externes. Le modèle peut les considérer en introduisant des contraintes sociopolitiques.

R3 Développement des autres modules du SAGE

Les principaux modules d'un SAGE sont l'acquisition des données, la modélisation du comportement des infrastructures l'optimisation du processus de prise de décision, la planification et programmation des interventions et l'établissement d'un système de suivi. Cette thèse a présenté les différents modules en mettant l'emphasis sur l'optimisation de la prise de décision. Ces modules doivent être développés et diffusés aux gestionnaires des infrastructures civiles.

R4 Élaboration d'un outil de simulation permettant d'évaluer les impacts de décision non optimale

Le prototype de SAGE des infrastructures civiles est destiné à améliorer la qualité du processus de décision. Il énumère les différentes stratégies d'intervention, année après année, durant toute la période de planification et fournit aux gestionnaires la solution optimale pour qu'ils puissent programmer les interventions les plus rentables. S'ils planifient d'autres interventions, la solution n'est pas la plus économique à long terme. Ainsi, en imposant des actions précises à un certain moment, le SAGE de seconde génération pourrait simuler les coûts supplémentaires engendrés par cette initiative.

ANNEXE 1

Procédure détaillée de résolution

La procédure originale de Balas comprend les trois étapes suivantes :

- a. choix de la variable entrante;
- b. résolution de la nouvelle solution S_i ;
- c. détermination de la solution optimale.

Cette procédure est énoncée avec des termes qui nécessitent une définition; celle-ci est reprise par Taha (1971). À toute itération t , il est posé que :

N = ensemble des indices de toutes les variables x_j

J_t = ensemble des indices des variables x_j pour lesquelles une valeur binaire est attribuée, cet ensemble correspondant à une solution partielle

$N - J_t$ = ensemble des variables libres non incluses dans la solution partielle

N_t = ensemble des indices des variables x_j choisies dans l'ensemble $(N - J_t)$, ces variables étant des candidates prêtes à entrer dans la solution

A.1 Choix de la variable entrante

La première étape consiste à choisir la variable entrante x_k puisée parmi les variables libres dont l'indice est inclus dans l'ensemble des variables libres $(N - J_t)$. Ce choix est établi en deux phases qui, toutes les deux, évaluent les critères de faisabilité et d'optimalité. Lors de la première phase, les variables candidates les plus prometteuses sont recherchées dans l'ensemble N_t et les moins attrayantes sont éliminées sur la base des critères de faisabilité et d'optimalité. Le critère de faisabilité I permet d'éliminer toutes les variables libres en envoyant au moins une variable d'écart S_i négative dans la zone de solution réalisable. Le critère d'optimalité I permet d'exclure les variables qui n'améliorent pas la valeur de la fonction objectif z_t .

Dans la seconde phase, les deux tests fondés sur les critères de faisabilité et d'optimalité sont repris. Le critère de faisabilité II vérifie la possibilité d'obtenir une meilleure solution lorsque toutes les variables prometteuses dans N_t ont la valeur un. Si ce test

échoue, l'ensemble N_t ne peut améliorer la solution; s'il réussit, le critère d'optimalité II est appliqué en choisissant la variable candidate la plus prometteuse pour entrer dans la solution. Cette variable devra produire la plus petite valeur d'une mesure d'infaisabilité telle que décrite ultérieurement dans ce chapitre.

Taha (1975) définit quatre conditions établies selon les critères de faisabilité et d'optimalité à chaque phase. Ces quatre conditions sont testées successivement.

Le premier test est appelé le critère de faisabilité I. Pour toute variable libre x_r appartenant à l'ensemble $(N - J_t)$, si le coefficient $a_{ir} \geq 0$ pour tout i correspondant à $S_i < 0$, la variable x_r prend la valeur 1 et l'ensemble des indices d'une telle variable est notée E_t . Cela signifie que tout $j \in E_t$ soit exclu de l'ensemble des variables prometteuses. Les nouvelles valeurs de S_i sont calculées :

$$S_i^{t+1} = S_i^t - a_{ir}, \quad a_{ir} \geq 0, \quad S_i^t < 0 \quad (\text{A.1})$$

Le second test vérifie le critère d'optimalité I. La valeur de la fonction objectif étant initialisé à $z_{\min}$, la valeur z_t pour la solution courante est calculée par $z_t = \sum_{j \in J_t} c_j x_j$. Une variable libre x_j appartenant à l'ensemble $(N - J_t)$ ne peut améliorer la solution si, en prenant la valeur 1, la nouvelle valeur de la fonction objectif $c_j + z_t$ devient plus grand que $z_{\min}$. Cela implique que toute variable libre x_j satisfaisant $c_j + z_t \geq z_{\min}$ ne peut pas entrer dans la solution. L'ensemble D_t est défini comme l'ensemble des indices comprenant ces indices j .

L'ensemble N_t est déterminé par :

$$N_t = N - J_t - (E_t \cup D_t) \quad (\text{A.2})$$

Ainsi, l'ensemble N_t est obtenu en retirant de l'ensemble $(N - J_t)$ les ensembles E_t ainsi que les éléments non redondants de D_t . Si $N_t = \emptyset$, aucune variable ne peut prendre la

valeur 1, ce qui indique que J_t est sondé et qu'il faut utiliser la procédure à rebours. Sinon, le critère de faisabilité II est appliqué.

Le troisième test vérifie le critère de faisabilité II. À une contrainte i donnée

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + S_i = b_i \quad (\text{A.3})$$

où $S_i < 0$, les variables x_j telles que $j \in N_t$ et leurs coefficients $a_{ij} < 0$ seront considérées prometteuses si, en ayant simultanément la valeur un, une solution réalisable pour tous les S_i en résultait. Si ce test échoue, ces variables ne peuvent produire une solution réalisable. Ainsi, si, pour tout $S_i < 0$, la condition

$$\sum_{\substack{j \in N_t \\ a_{ij} < 0}} a_{ij} > S_i^t \quad (\text{A.4})$$

est satisfaite, l'ensemble N_t peut être abandonné. Alors, $N_t = \emptyset$ et l'ensemble J_t est considéré sondé. Dans ce cas, la procédure à rebours est appliquée; sinon, la condition d'optimalité II est vérifiée.

Le quatrième test est le critère d'optimalité II. Celui-ci définit v_j^t et, pour tout $j \in N_t$, le calcule

$$v_j^t = \sum_{\text{tout } i} \min(0, S_i^t - a_{ij}) \quad (\text{A.5})$$

Cette quantité v_j^t est considérée, telle qu'énoncée précédemment dans ce chapitre, comme une mesure empirique de l'infaisabilité dans S^{t+1} , une fois que la valeur un est attribuée aux variables x_j . La variable entrante est celle qui génère l'infaisabilité la plus faible, c'est-à-dire :

$$v_k^t = \max\{v_j^t\} \quad \text{pour } j \in N_t \quad (\text{A.6})$$

La nouvelle solution partielle J_{t+1} est obtenue en augmentant l'ensemble J_t avec la variable x_k :

$$J_{t+1} = J_t \cup \{+k\} = \{J_t, +k\} \quad (\text{A.7})$$

Le nouvel ensemble de variables permet d'aller de l'avant dans la procédure.

A.2 Résolution de la nouvelle solution S_i

À cette seconde étape, avec l'ensemble des variables J_{t+1} obtenu à l'étape précédente, une nouvelle solution S_i^{t+1} et une nouvelle valeur de la fonction objectif z_{t+1} sont calculées :

$$S_i^{t+1} = S_i^t - a_{ik} \quad (\text{A.8})$$

$$z_{t+1} = z_t + c_k \quad (\text{A.9})$$

Avec ces résultats, si, pour tout i , $S_i^{t+1} \geq 0$, alors $z_{\min}$ est ajusté à la nouvelle valeur de la fonction objectif.

$$z_{\min} = z_{t+1} \quad (\text{A.10})$$

Dans ce cas, j_{t+1} est considéré sondé et la procédure à rebours est appliquée. Dans le cas contraire, si une solution est négative $S_i^{t+1} < 0$, une nouvelle variable entrante doit être choisie et la procédure est ramenée à la première étape.

A.3 Détermination de la solution optimale

La troisième étape consiste à déterminer la solution optimale en appliquant la procédure à rebours. Cette dernière est appelée dès qu'une solution partielle J_{t+1} est sondée. Elle génère une nouvelle solution partielle en remplaçant le dernier élément du J_t par son complètement. Cette procédure se termine lorsque les 2^{es} solutions ont été énumérées, implicitement ou non.

L'algorithme original proposé par Balas est très lourd, particulièrement à cette étape car il nécessite de nombreux enregistrements. Cette difficulté a été surmontée en utilisant l'idée de Glover (1965) qui a été mis en application en 1966 par Geoffrion.

B. Procédure à rebours

Les règles de base de la procédure à rebours sont présentées à partir d'un exemple avec dix variables de décision x_j . À l'itération t du processus, la solution partielle J_t qui comprend l'ensemble des indices des variables x_j est $J_t = \{+2, +5, +3, +7\}$. En supposant que la solution J_t est sondée, la procédure à rebours est enclenchée en vérifiant le dernier élément de J_t , celui situé le plus à droite. Si celui-ci est positif, il est changé pour sa valeur négative indiquant ainsi que la valeur de sa variable correspondante est zéro. Au contraire, si le dernier élément est négatif, c'est le dernier élément positif qui devient négatif et tous les éléments à sa droite sont éliminés du J_t . Pour l'exemple en cours, puisque le dernier élément est positif, la nouvelle solution partielle est $J_{t+1} = \{+2, +5, +3, -7\}$.

Le processus se poursuit en suivant les deux premières étapes jusqu'à ce que la solution J_{t+1} soit sondée, et que la procédure à rebours soit à nouveau appliquée. Puisque le dernier élément de J_{t+1} est négatif, la nouvelle solution J_{t+2} est obtenue en rendant négatif le dernier élément positif de J_{t+1} et en supprimant les éléments à sa droite. Cette nouvelle solution $J_{t+2} = \{+2, +5, -3\}$ est alors vérifiée jusqu'au moment où elle est sondée.

Dans le cas où la solution J_{t+1} ne peut être déclarée sondée, une nouvelle variable libre qui prend la valeur un est introduite dans la solution. Si cette variable est x_8 , la solution est $J_{t+2} = \{+2, +5, +3, -7, +8\}$ jusqu'à ce qu'elle soit sondée. Si ce n'est pas possible, la solution est encore augmentée d'une nouvelle variable libre qui prend la valeur un. Le processus est répété autant de fois que nécessaire.

C. Logigramme de l'énumération implicite

Les étapes de la procédure de l'énumération implicite sont décrites par plusieurs auteurs dont Balas (1965), Glover (1965), Petersen (1967), Taha (1971) et Kuester (1973).

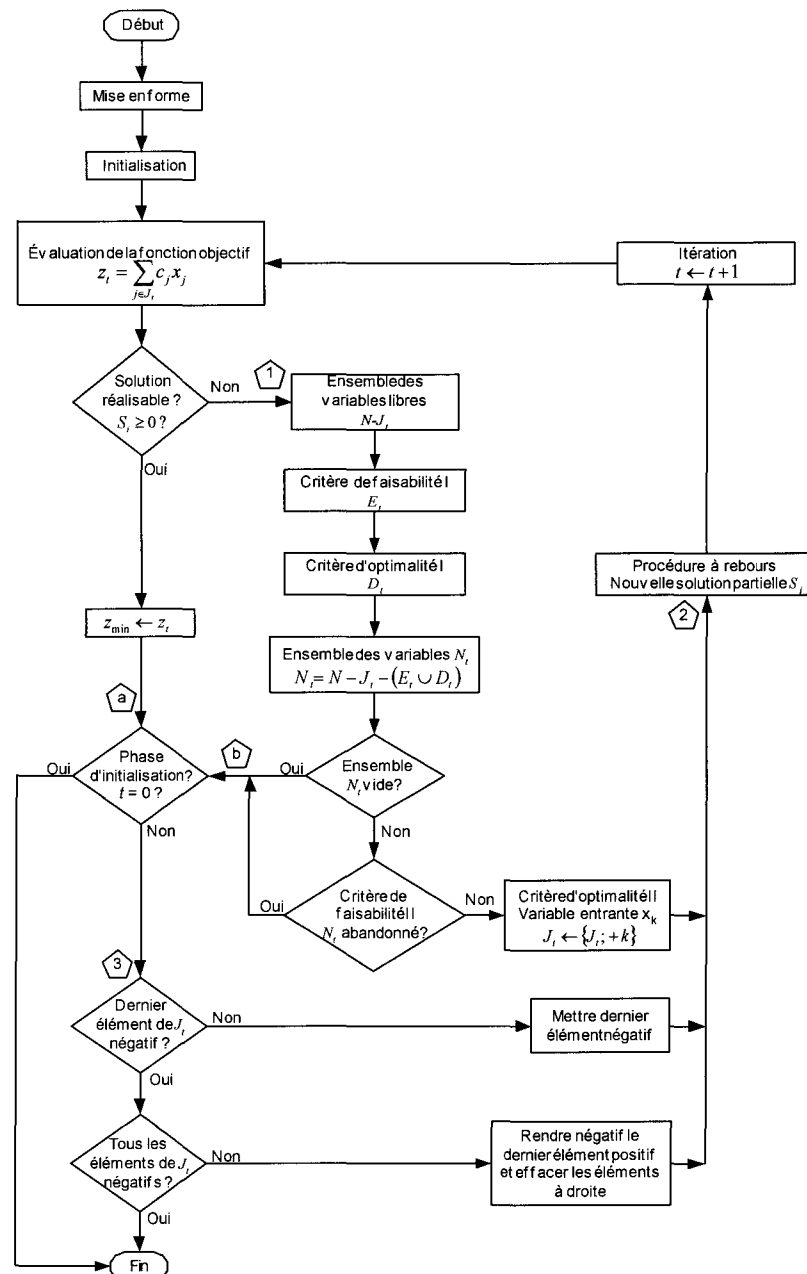


Figure 49 Logigramme de l'énumération implicite

Le logigramme présenté à la figure 49 est composé à partir de l'analyse et la synthèse de ceux publiés par les auteurs précédemment cités. Les branches (a) et (b) sont les indicateurs qu'une solution partielle est sondée. La branche (a) indique l'atteinte de la meilleure solution réalisable et la branche (b) prouve qu'il n'existe aucune meilleure solution réalisable. S'il y a occurrence de sondage dès la phase d'initialisation, à l'itération $t = 0$, le processus prend fin avec soit avec une solution réalisable où tous les x_j sont égaux à 0, soit sans solution réalisable. Les branches (1), (2) et (3) correspondent respectivement aux trois étapes soit le choix de la variable entrante, la résolution de la nouvelle solution S_i et la détermination de la solution optimale.

D. Application numérique

Un exemple numérique simple de programmation en nombre entier binaire est résolu avec l'algorithme additif de Balas. Le problème s'écrit :

$$\text{Minimiser } z = x_1 + 3x_2 + 5x_3 + 10x_4 \quad (\text{A.11})$$

sujet à

$$x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 6x_4 \geq 5 \quad (\text{A.12})$$

$$2x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 2 \quad (\text{A.13})$$

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } j = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A.14})$$

Le problème est posé sous une forme de minimisation ne nécessitant pas de transformation des variables de décision. Cependant les contraintes A.12 et A.13 doivent être écrites avec le signe «plus petit ou égal» en appliquant la substitution énoncée à l'équation 4.14 du chapitre 4:

$$-x_1 - 2x_2 - 3x_3 - 6x_4 \leq -5 \quad (\text{A.15})$$

$$-2x_1 - x_2 - x_3 - x_4 \leq -2 \quad (\text{A.16})$$

Écrit sous une forme matricielle, le problème devient, après l'ajout des variables d'écart :

$$\left[\begin{array}{cccc|cc} +1 & +3 & +5 & +10 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -3 & -6 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_0 \\ -5 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

avec :

$$x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ pour } j = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A.18})$$

$$S_i \geq 0 \text{ pour } i = 1, 2 \quad (\text{A.19})$$

À l'itération initiale :

$$z_{\min} = \infty \quad (\text{A.20})$$

$$J_0 = \emptyset \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^0 \\ S_2^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$$N = \{1; 2; 3; 4\} \quad (\text{A.23})$$

$$N - J_0 = \{1; 2; 3; 4\} \quad (\text{A.24})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Bien que $S_1^0 < 0$ et $S_2^0 < 0$, il n'y a aucun coefficient $a_{ij} \geq 0$. Cela signifie qu'aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_0 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} = \infty$, aucune variable x_j ne peut être exclue et $D_0 = \emptyset$. Il s'ensuit que :

$$N_0 = \{1; 2; 3; 4\} - \emptyset = \{1; 2; 3; 4\} \quad (\text{A.25})$$

Puisque $N_0 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_1 : -1 - 2 - 3 - 6 = -12 < -5 \quad (\text{A.26})$$

$$S_2 : -2 - 1 - 1 - 1 = -5 < -2 \quad (\text{A.27})$$

Ce test montre que N_0 ne peut être abandonné.

Le critère d'optimalité II est invoqué pour choisir la variable entrante. La mesure d'infaisabilité de chaque variable est déterminée :

$$v_1^0 = \min(0; -5 + 1) + \min(0; -2 + 2) = -4 + 0 = -4 \quad (\text{A.28})$$

$$v_2^0 = \min(0; -5 + 2) + \min(0; -2 + 1) = -3 - 1 = -4 \quad (\text{A.29})$$

$$v_3^0 = \min(0; -5 + 3) + \min(0; -2 + 1) = -2 - 1 = -3 \quad (\text{A.30})$$

$$v_4^0 = \min(0; -5 + 6) + \min(0; -2 + 1) = 0 - 1 = -1 \quad (\text{A.31})$$

Ainsi, la plus faible infaisabilité est calculée :

$$\max\{-4; -4; -3; -1\} = -1 \quad (\text{A.32})$$

Cette plus faible infaisabilité correspond à la variable x_4 , ce qui donne :

$$J_1 = \{+4\} \quad (\text{A.33})$$

À la première itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^1 \\ S_2^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 + 6 \\ -2 + 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.34})$$

et

$$z_1 = 10 \quad (\text{A.35})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors de la phase initiale, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_1 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} = \infty$, aucune variable x_j ne peut être exclue et $D_1 = \emptyset$. Il s'ensuit que :

$$N_1 = N - J_1 - \{E_1 \cup D_1\} = \{1; 2; 3; 4\} - \{+4\} - \emptyset = \{1; 2; 3\} \quad (\text{A.36})$$

Puisque $N_1 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_2 : -2 - 1 - 1 = -4 < -2 \quad (\text{A.37})$$

Ce test montre que N_1 ne peut être abandonné.

Le critère d'optimalité II est invoqué pour choisir la variable entrante. La mesure d'infaisabilité de chaque variable est déterminée :

$$v_1^1 = \min(0; +1+1) + \min(0; -1+2) = 0 + 0 = 0 \quad (\text{A.38})$$

$$v_2^1 = \min(0; +1+2) + \min(0; -1+1) = 0 + 0 = 0 \quad (\text{A.39})$$

$$v_3^1 = \min(0; +1+3) + \min(0; -1+1) = 0 + 0 = 0 \quad (\text{A.40})$$

Dans ce cas, la mesure d'infaisabilité est la même pour les trois variables, la variable entrante sera celle qui a le plus petit c_j . Cette pratique identifie la variable x_1 , ce qui donne :

$$J_2 = \{+4; +1\} \quad (\text{A.41})$$

À la seconde itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^2 \\ S_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1+1 \\ -1+2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +2 \\ +1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.42})$$

et

$$z_2 = 11 \quad (\text{A.43})$$

Puisque $\mathbf{S} > \mathbf{0}$, cette nouvelle solution partielle est réalisable. Par conséquent :

$$z_{\min} = z_2 = 11 \quad (\text{A.44})$$

J_2 est déclarée sondée. La procédure à rebours est appliquée et :

$$J_3 = \{+4; -1\} \quad (\text{A.45})$$

À la troisième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^3 \\ S_2^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.46})$$

et

$$z_3 = 10 \quad (\text{A.47})$$

$$N - J_3 = \{1; 2; 3; 4\} - \{4; 1\} = \{2; 3\} \quad (\text{A.48})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors des phases précédentes, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_3 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est appliqué. Puisque $z_{\min} - z_3 = 11 - 10 = 1$, les deux variables de l'ensemble $N - J_3$, c'est-à-dire x_2 et x_3 , ont leur coefficient $c_j \geq z_{\min} - z_3$. Il s'ensuit que :

$$D_3 = \{2; 3\} \quad (\text{A.49})$$

$$N_3 = N - J_3 - \{E_3 \cup D_3\} = \{2; 3\} - \{2; 3\} = \emptyset \quad (\text{A.50})$$

Puisque $N_3 = \emptyset$, la procédure à rebours est appelée. L'élément positif le plus à droite de l'ensemble des indices de la solution partielle devient négatif et les autres sortent.

$$J_4 = \{-4\} \quad (\text{A.51})$$

À la quatrième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^4 \\ S_2^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.52})$$

et

$$z_4 = 0 \quad (\text{A.53})$$

$$N - J_4 = \{1; 2; 3; 4\} - \{4\} = \{1; 2; 3\} \quad (\text{A.54})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors des phases précédentes, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_4 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} - z_4 = 11 - 0 = 11$, aucune des trois variables de l'ensemble $N - J_4$ n'ont leur coefficient $c_j \geq z_{\min} - z_4$. Il s'ensuit que :

$$D_4 = \emptyset \quad (\text{A.55})$$

$$N_4 = N - J_4 - \{E_4 \cup D_4\} = \{1; 2; 3\} - \emptyset = \{1; 2; 3\} \quad (\text{A.56})$$

Puisque $N_4 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_1 : -1 - 2 - 3 = -6 < -5 \quad (\text{A.57})$$

$$S_2 : -2 - 1 - 1 = -4 < -2 \quad (\text{A.58})$$

Ce test montre que N_4 ne peut être abandonné.

Le critère d'optimalité II est appliqué pour choisir la variable entrante. La mesure d'infaisabilité de chaque variable est déterminée :

$$v_1^4 = \min(0; -5 + 1) + \min(0; -1 + 2) = -4 + 0 = -4 \quad (\text{A.59})$$

$$v_2^4 = \min(0; -5 + 2) + \min(0; -1 + 1) = -3 + 0 = -3 \quad (\text{A.60})$$

$$v_3^4 = \min(0; -5 + 3) + \min(0; -1 + 1) = -2 + 0 = -2 \quad (\text{A.61})$$

La plus faible infaisabilité est calculée :

$$\max\{-4; -3; -2\} = -2 \quad (\text{A.62})$$

Cette plus faible infaisabilité correspond à la variable x_3 , ce qui donne :

$$J_5 = \{-4; +3\} \quad (\text{A.63})$$

À la cinquième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^5 \\ S_2^5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5+3 \\ -2+1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.64})$$

et

$$z_5 = 5 \quad (\text{A.65})$$

$$N - J_5 = \{1; 2; 3; 4\} - \{4; 3\} = \{1; 2\} \quad (\text{A.66})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors des phases précédentes, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_5 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} - z_5 = 11 - 5 = 6$, aucune des deux variables de l'ensemble $N - J_5$ n'ont leur coefficient $c_j \geq z_{\min} - z_5$. Il s'ensuit que :

$$D_5 = \emptyset \quad (\text{A.67})$$

$$N_5 = N - J_5 - \{E_5 \cup D_5\} = \{1; 2\} - \emptyset = \{1; 2\} \quad (\text{A.68})$$

Puisque $N_5 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_1 : -1 - 2 = -3 < -2 \quad (\text{A.69})$$

$$S_2 : -2 - 1 = -3 < -1 \quad (\text{A.70})$$

Ce test montre que N_5 ne peut être abandonné.

Le critère d'optimalité II est appliqué pour choisir la variable entrante. La mesure d'infaisabilité de chaque variable est déterminée :

$$v_1^5 = \min(0; -2 + 1) + \min(0; -1 + 2) = -1 + 0 = -1 \quad (\text{A.71})$$

$$v_2^5 = \min(0; -2 + 2) + \min(0; -1 + 1) = 0 + 0 = 0 \quad (\text{A.72})$$

La plus faible infaisabilité est calculée :

$$\max\{-1; 0\} = 0 \quad (\text{A.73})$$

Cette plus faible infaisabilité correspond à la variable x_2 , ce qui donne :

$$J_6 = \{-4; +3; +2\} \quad (\text{A.74})$$

À la sixième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^6 \\ S_2^6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2+2 \\ -1+2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ +1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.75})$$

et

$$z_6 = 8 \quad (\text{A.76})$$

Puisque $\mathbf{S} > \mathbf{0}$, cette nouvelle solution partielle est réalisable. Par conséquent :

$$z_{\min} = z_6 = 8 \quad (\text{A.77})$$

J_6 est déclarée sondée.

La procédure à rebours est appliquée et :

$$J_7 = \{-4; +3; -2\} \quad (\text{A.78})$$

À la septième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^7 \\ S_2^7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.79})$$

et

$$z_7 = 5 \quad (\text{A.80})$$

$$N - J_7 = \{1; 2; 3; 4\} - \{4; 3; 2\} = \{1\} \quad (\text{A.81})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors des phases précédentes, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_7 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} - z_7 = 8 - 5 = 3$, la variable x_1 n'a pas son coefficient $c_j \geq z_{\min} - z_7$. Il s'ensuit que :

$$D_7 = \emptyset \quad (\text{A.82})$$

$$N_7 = N - J_7 - \{E_7 \cup D_7\} = \{1\} - \emptyset = \{1\} \quad (\text{A.83})$$

Puisque $N_7 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_1 : -1 < -2 \leftarrow \text{cette condition n'est pas vérifiée} \quad (\text{A.84})$$

$$S_2 : -2 < -1 \quad (\text{A.85})$$

Ce test montre que N_7 peut être abandonné. La procédure à rebours est appliquée et :

$$J_8 = \{-4; -3\} \quad (\text{A.86})$$

À la huitième itération, la nouvelle solution partielle est :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1^8 \\ S_2^8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.87})$$

et

$$z_8 = 0 \quad (\text{A.88})$$

$$N - J_8 = \{1; 2; 3; 4\} - \{4; 3\} = \{1; 2\} \quad (\text{A.89})$$

Le test de faisabilité I est appliqué. Comme lors des phases précédentes, aucune variable ne peut être exclue de l'ensemble des variables prometteuses et donc $E_8 = \emptyset$.

Le test d'optimalité I est ensuite appliqué. Puisque $z_{\min} - z_8 = 8 - 0 = 8$, les variables x_1 et x_2 n'ont pas son coefficient $c_j \geq z_{\min} - z_8$. Il s'ensuit que :

$$D_8 = \emptyset \quad (\text{A.90})$$

$$N_8 = N - J_8 - \{E_8 \cup D_8\} = \{1; 2\} - \emptyset = \{1; 2\} \quad (\text{A.91})$$

Puisque $N_8 \neq \emptyset$, le critère de faisabilité II est vérifié. Il indique que :

$$S_1 : -1 - 2 = -3 < -5 \leftarrow \text{cette condition n'est pas vérifiée} \quad (\text{A.92})$$

$$S_2 : -2 - 1 = -3 < -2 \quad (\text{A.93})$$

Ce test montre que N_8 peut être abandonné.

Tous les éléments de J_8 sont négatifs, la procédure à rebours est complétée et la résolution prend fin. La valeur de $z_{\min} = 8$ correspond à z_6 . La solution optimale qui a été déterminée à la sixième itération, est J_6 . La réponse au problème de minimisation exprimée aux équations 4.61 à 4.64 est la suivante :

$$x_j = \begin{cases} 0 & \text{pour } j = 1; 4 \\ 1 & \text{pour } j = 2; 3 \end{cases} \quad (\text{A.94})$$

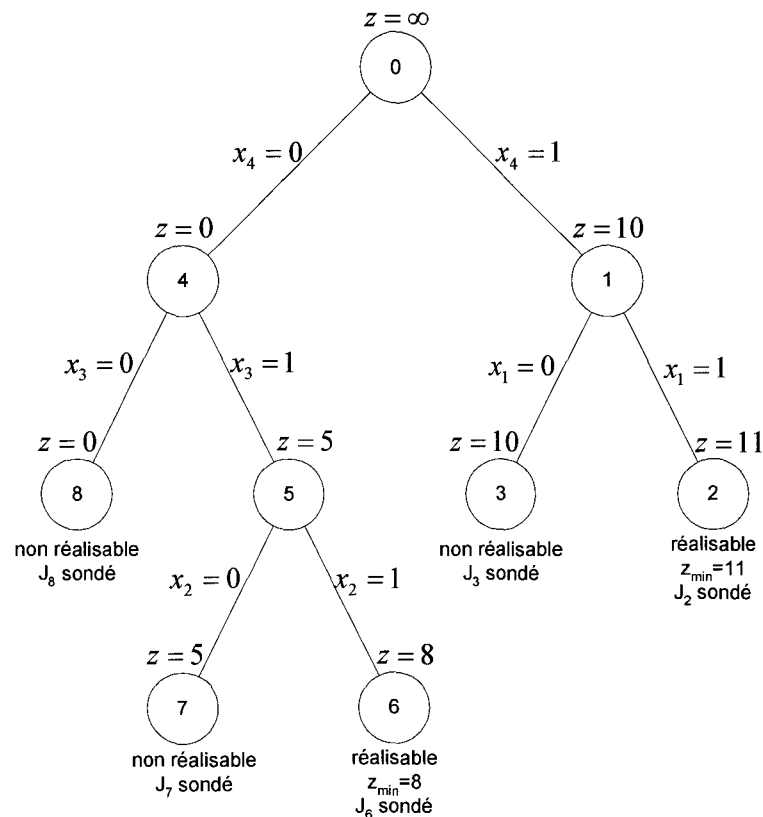


Figure 50 Représentation graphique de l'exemple de minimisation

La solution du problème est représentée graphiquement à la figure 50. Les nœuds sont symbolisés par des cercles numérotés de 0 à 8 indiquant l'ordre auquel les différentes solutions sont évaluées.

Le problème est résolu en huit évaluations mais les 2^4 soit 16 possibilités ont été implicitement énumérées. La solution réalisable procurant le plus faible $z_{\min}$ constitue la solution recherchée; c'est la solution J_6 où $x_1=0$, $x_2=1$, $x_3=1$ et $x_4=0$.

ANNEXE 2

Recommandations sur chaque tronçon

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

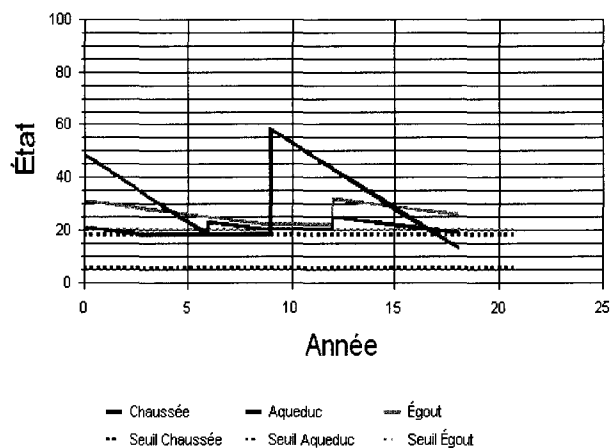
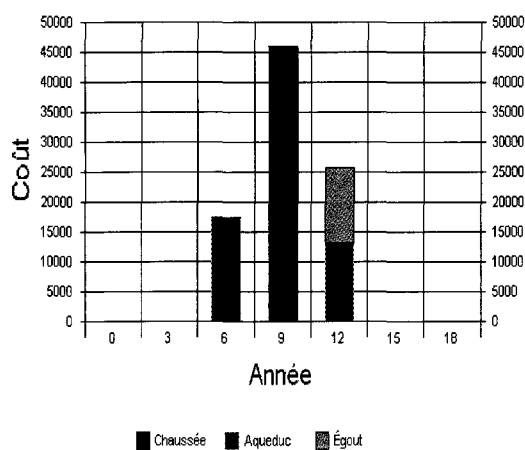
Rue Bannantyne entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **BANN0T002**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	10
Réhabilitation	40	20	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	17 402			17 402
An 9	réhabilitation	45 880					45 880
An 12			mineur	12 985	mineur	12 618	25 603
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

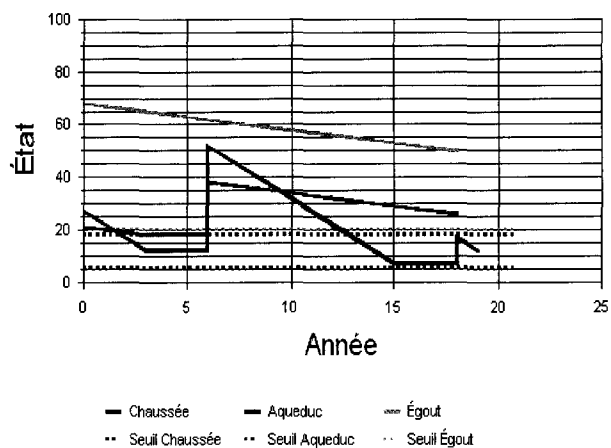
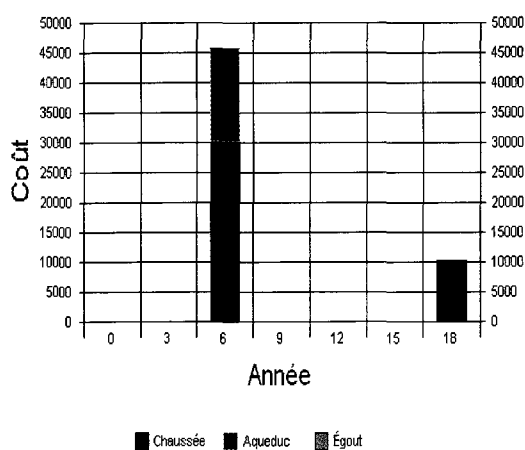
Rue Bannantyne entre Rue Hickson et Rue Dupuis

Tronçon : **BANN0T001**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	10
Réhabilitation	40	20	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6	réhabilitation	30 081	réhabilitation	15 606			45 688
An 9							
An 12							
An 15							
An 18	mineur	10 051					10 051

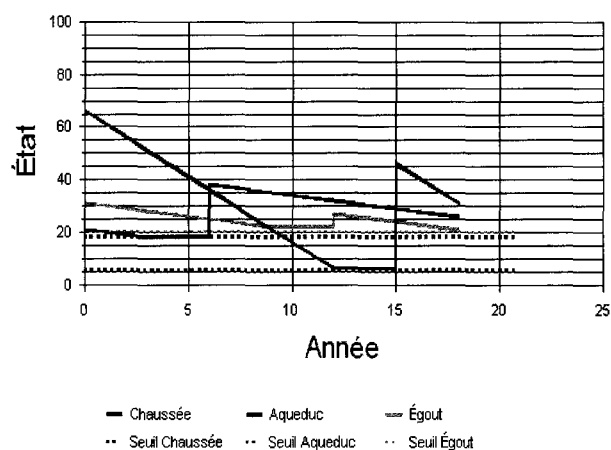
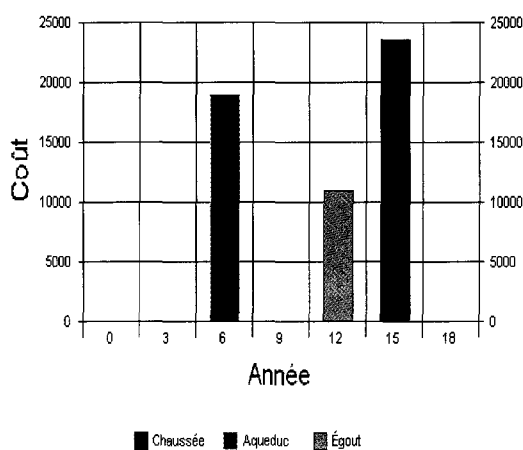
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Newmarch entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **NEWM0T002**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	18 882			18 882
An 9							
An 12					mineur	10 886	10 886
An 15	réhabilitation	23 594					23 594
An 18							

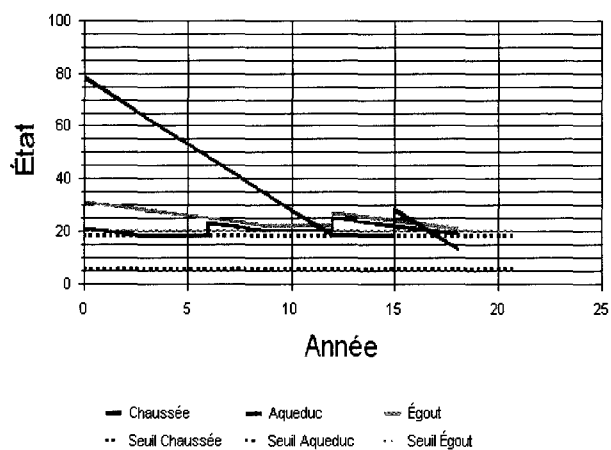
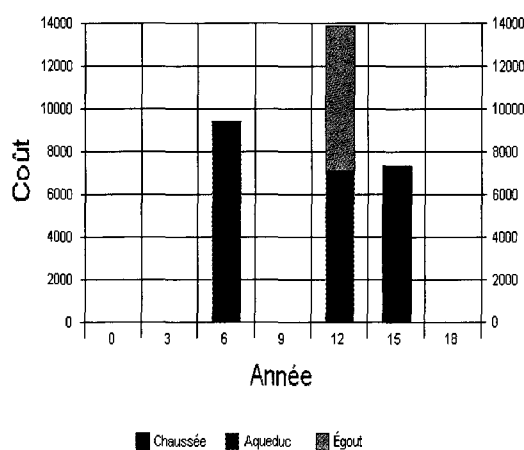
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Newmarch entre Rue Hickson et Rue Dupuis

Tronçon : **NEWM0T001**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	9 417			9 417
An 9							
An 12			mineur	7 027	mineur	6 832	13 860
An 15	mineur	7 335					7 335
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

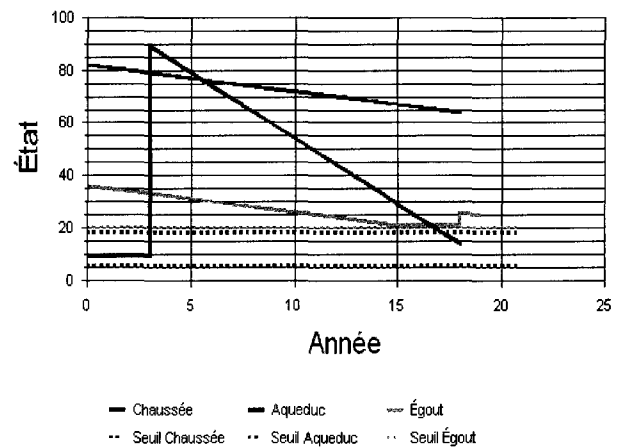
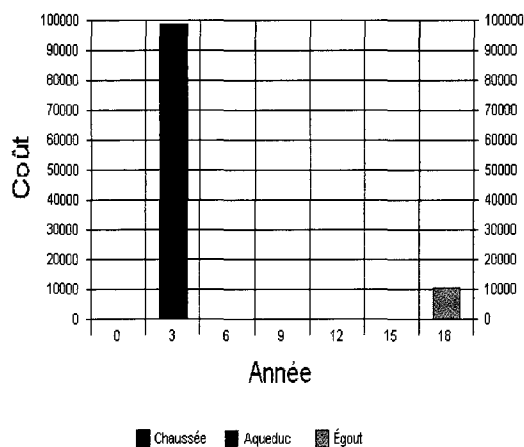
Rue Claude entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **CLAU0T002**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	5
Réhabilitation	40	40	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	98 374					98 374
An 6							
An 9							
An 12							
An 15							
An 18					mineur	10 097	10 097

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

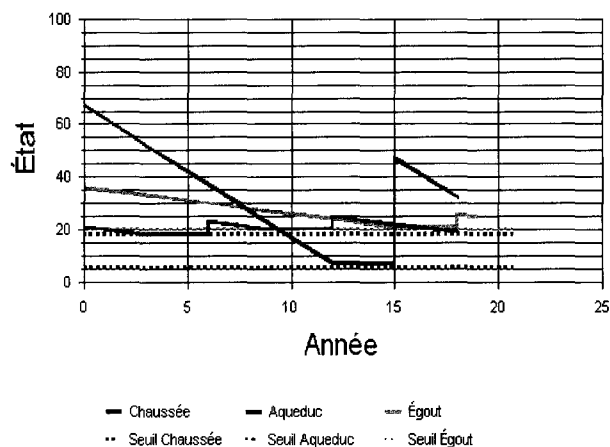
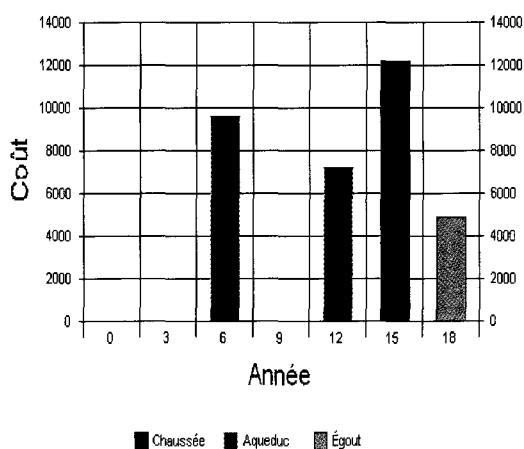
Rue Claude entre Rue Hickson et Rue Dupuis

Tronçon : **CLAU0T001**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	9 604			9 604
An 9							
An 12			mineur	7 166			7 166
An 15	réhabilitation	12 224					12 224
An 18					mineur	4 837	4 837

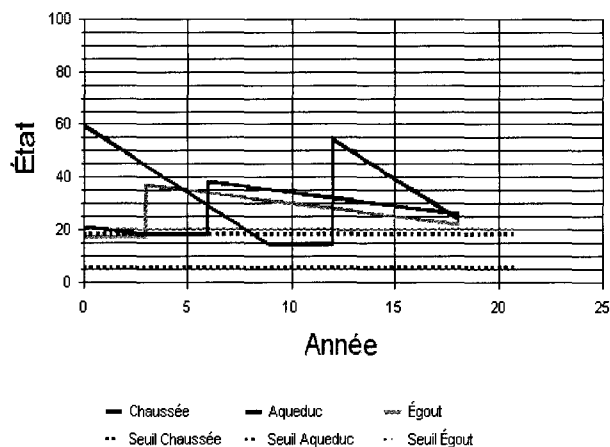
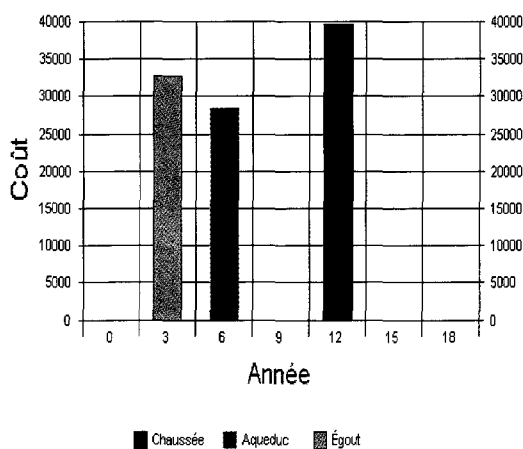
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Joseph entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **JOSE0T006**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3					réhabilitation	32 810	32 810
An 6			réhabilitation	28 288			28 288
An 9							
An 12	réhabilitation	39 633					39 633
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

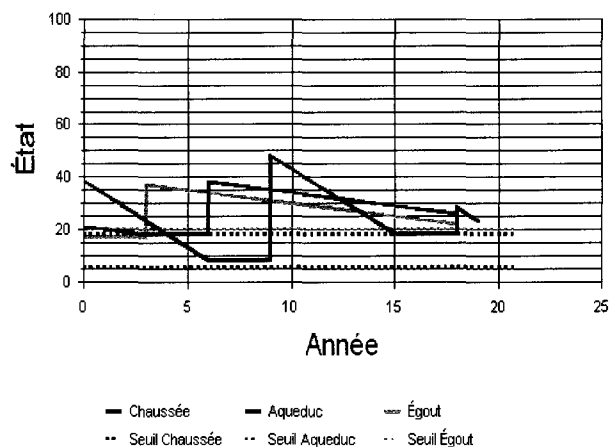
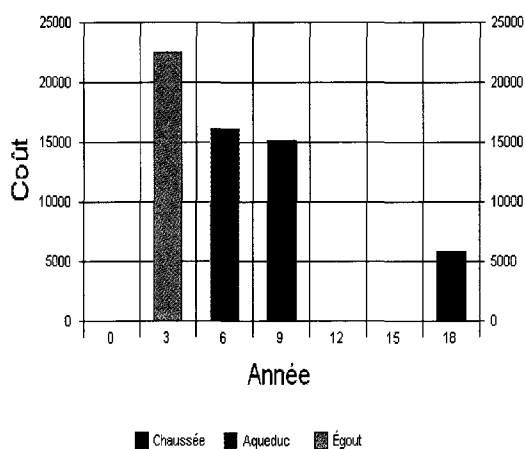
Rue Joseph entre Rue Hickson et Rue Dupuis

Tronçon : **JOSE0T005**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3					réhabilitation	22 455	22 455
An 6			réhabilitation	16 018			16 018
An 9	réhabilitation	15 084					15 084
An 12							
An 15							
An 18	mineur	5 834					5 834

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

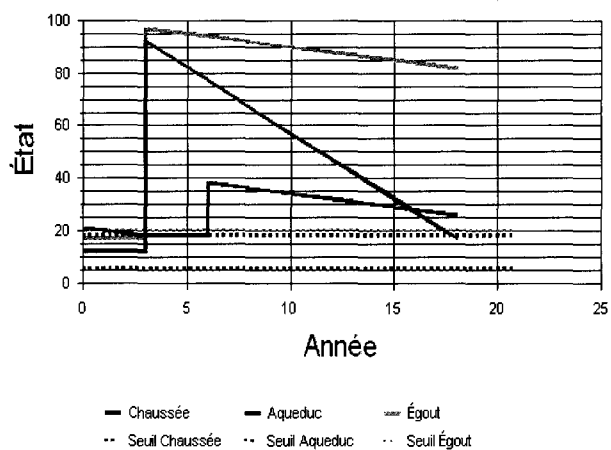
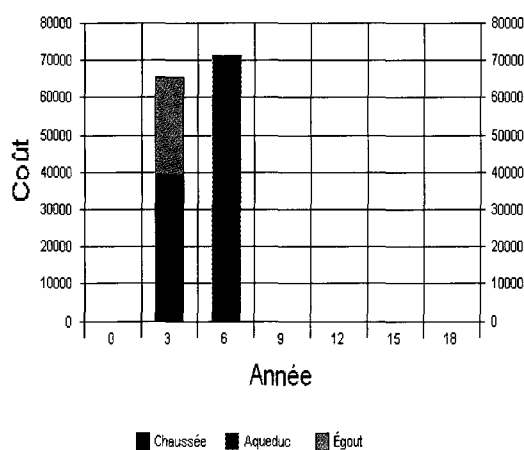
Rue Joseph entre Rue Dupuis et Rue Régina

Tronçon : **JOSE0T004**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	39 045			reconstruction	26 370	65 416
An 6			réhabilitation	71 166			71 166
An 9							
An12							
An15							
An18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

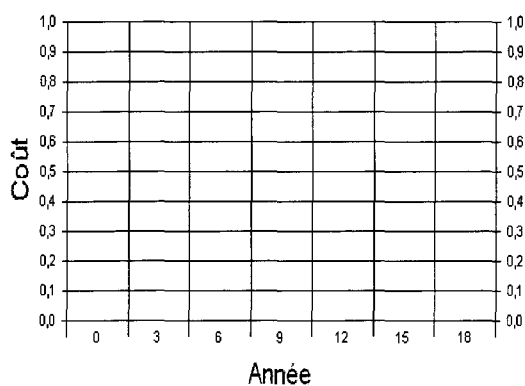
Rue de Verdun entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **VERD0T005**

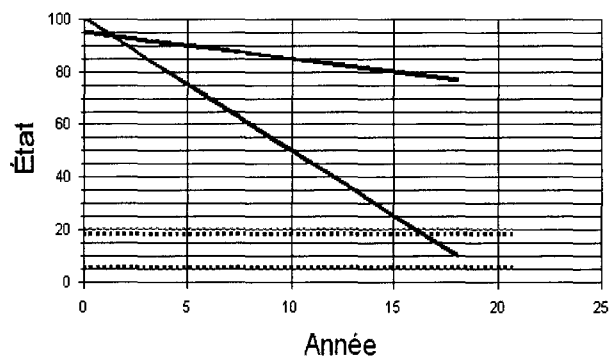
Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc --- Égout
 .. Seuil Chaussée .. Seuil Aqueduc .. Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9							
An 12							
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

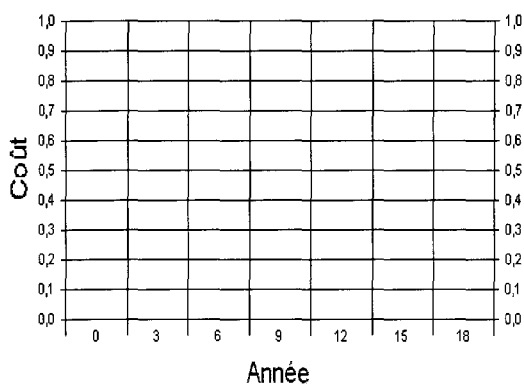
Rue de Verdun entre Rue Hickson et Rue Régina

Tronçon : **VERD0T004**

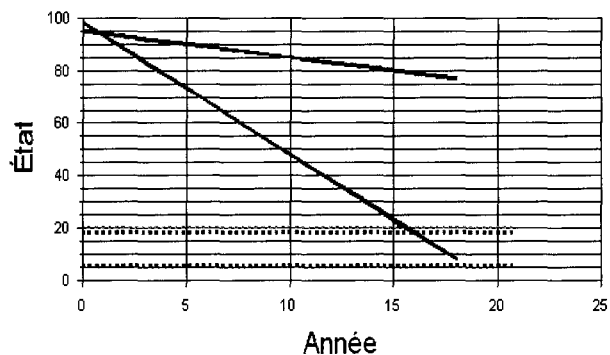
Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc — Égout
 .. Seuil Chaussée .. Seuil Aqueduc .. Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9							
An 12							
An 15							
An 18							

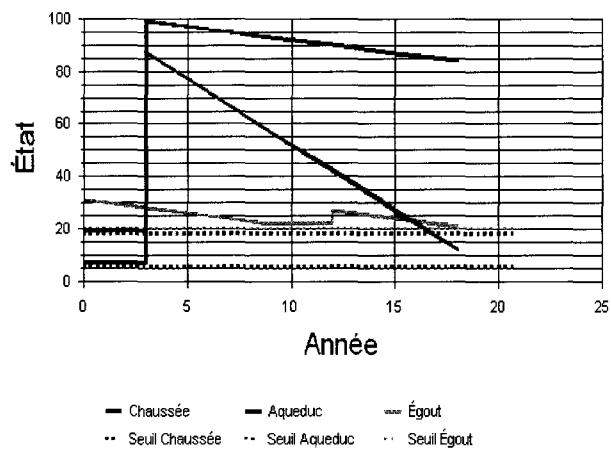
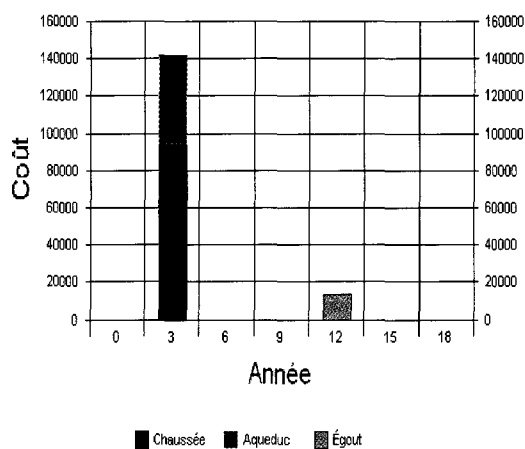
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Evelyn entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **EVEL0T005**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	94 072	reconstruction	47 661			141 733
An 6							
An 9							
An 12					mineur	13 743	13 743
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

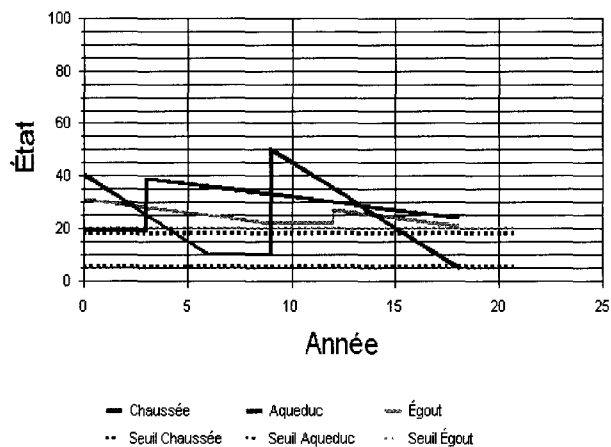
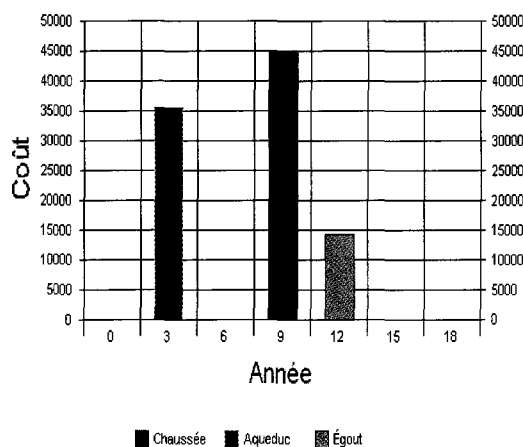
Rue Evelyn entre Rue Hickson et Rue Régina

Tronçon : **EVEL0T004**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			réhabilitation	35 518			35 518
An 6							
An 9	réhabilitation	45 058					45 058
An 12					mineur	14 155	14 155
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

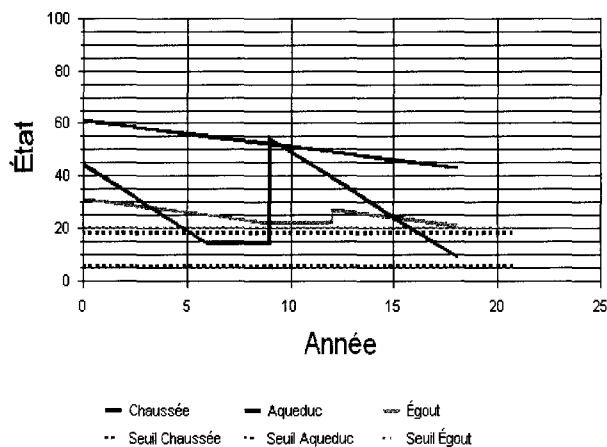
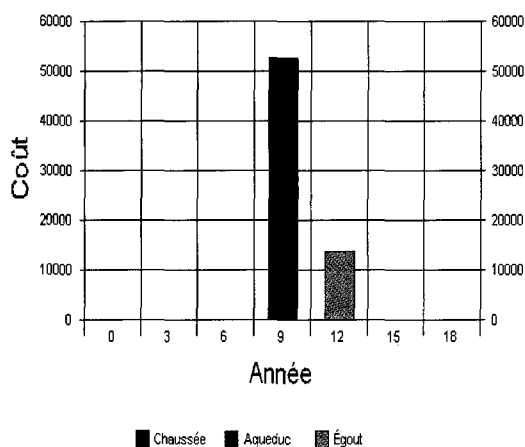
Rue Gertrude entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **GERT0T005**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	5
Réhabilitation	40	40	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9	réhabilitation	52 648					52 648
An 12					mineur	13 670	13 670
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

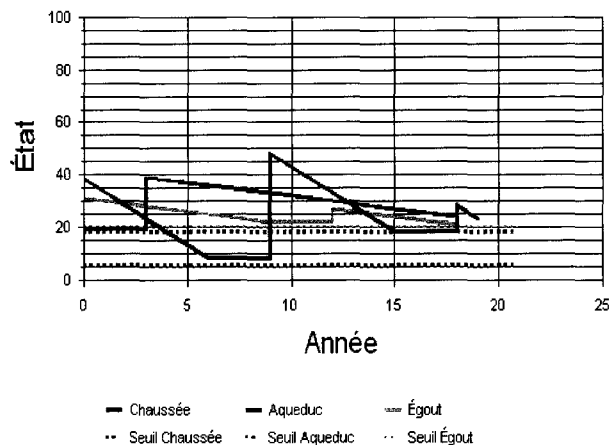
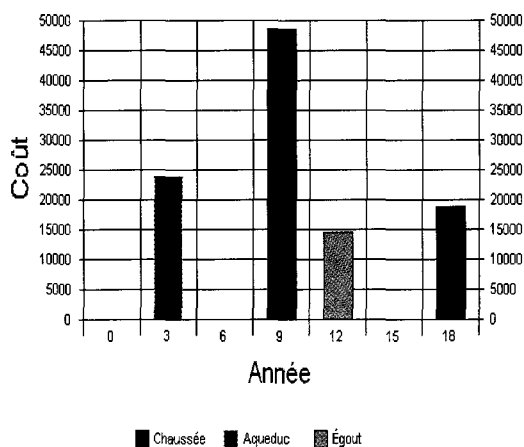
Rue Gertrude entre Rue Hickson et Rue Régina

Tronçon : **GERT0T004**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			réhabilitation	23 762			23 762
An 6							
An 9	réhabilitation	48 547					48 547
An 12					mineur	14 450	14 450
An 15							
An 18	mineur	18 777					18 777

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

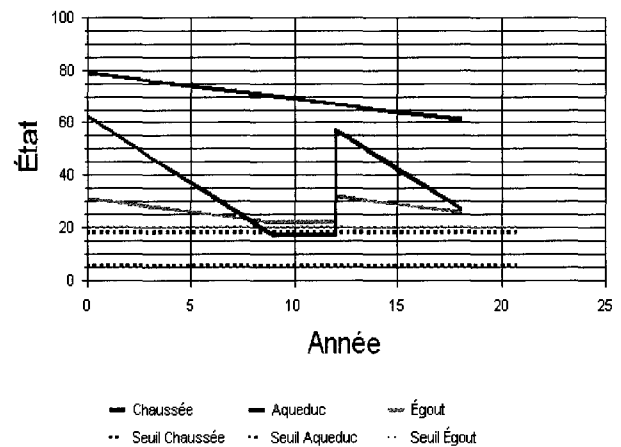
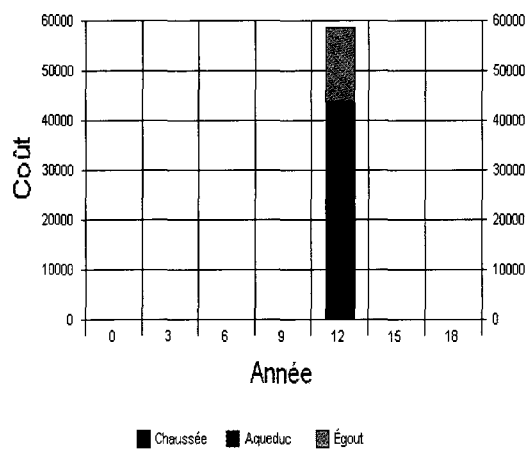
Rue Ethel entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **ETHE0T004**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9							
An 12	réhabilitation	43 795			mineur	14 795	58 590
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

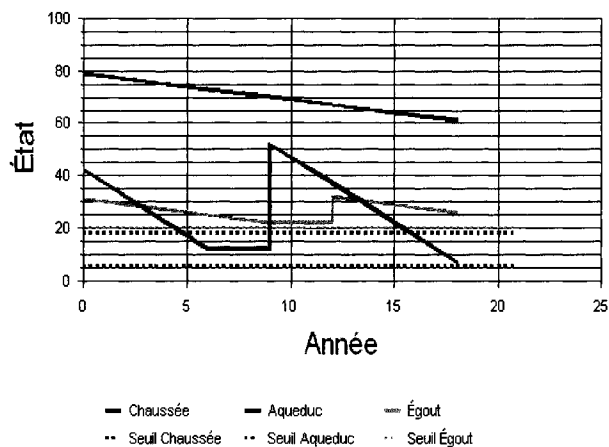
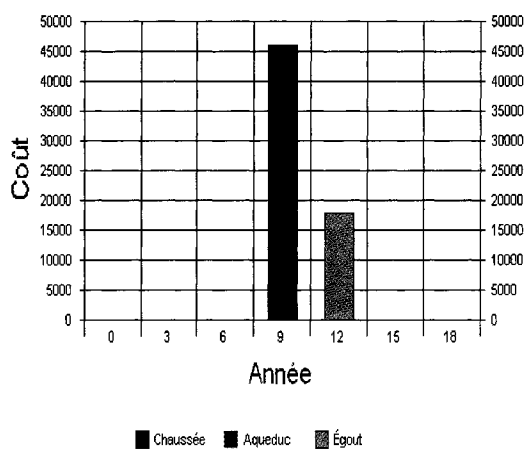
Rue Ethel entre Rue Hickson et Rue Régina

Tronçon : **ETHE0T003**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9	réhabilitation	45 880					45 880
An 12					mineur	17 863	17 863
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

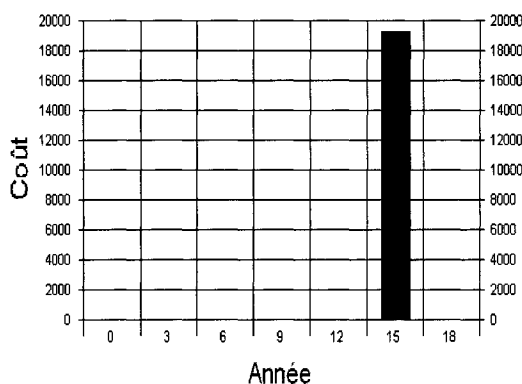
Rue Wellington entre Rue de l' Église et Rue Hickson

Tronçon : **WELL0T008**

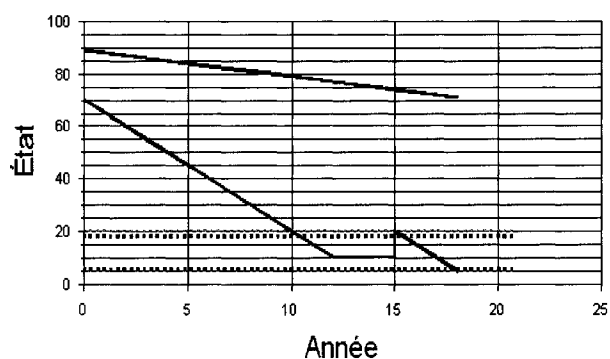
Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc --- Égout
 -- Seuil Chaussée -- Seuil Aqueduc .. Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9							
An 12							
An 15	mineur	19 207					19 207
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

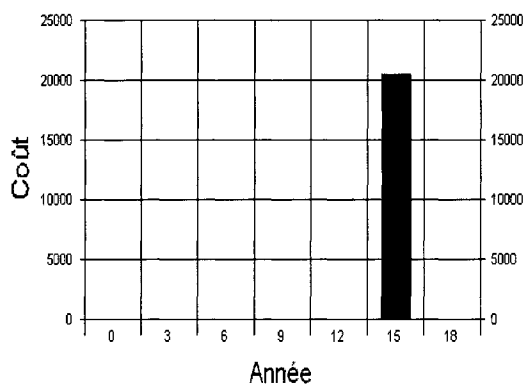
Rue Wellington entre Rue Hickson et Rue Régina

Tronçon : **WELL0T007**

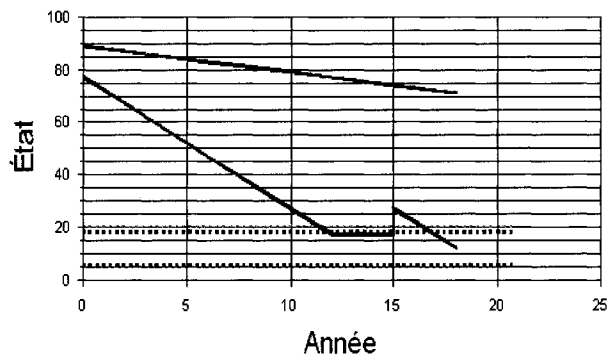
Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	10	10
Réhabilitation	40	40	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc Égout
 .. Seuil Chaussée .. Seuil Aqueduc .. Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6							
An 9							
An 12							
An 15	mineur	20 477					20 477
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

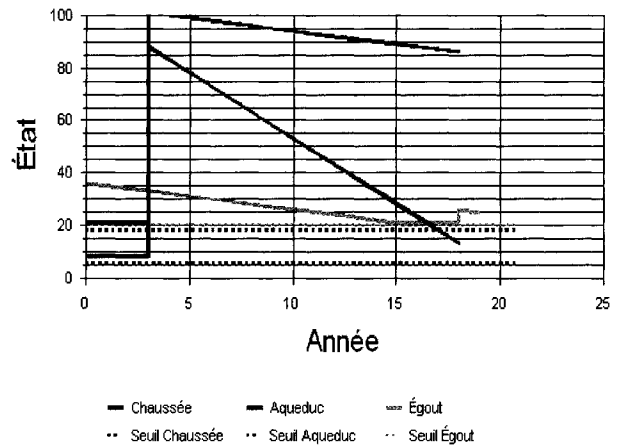
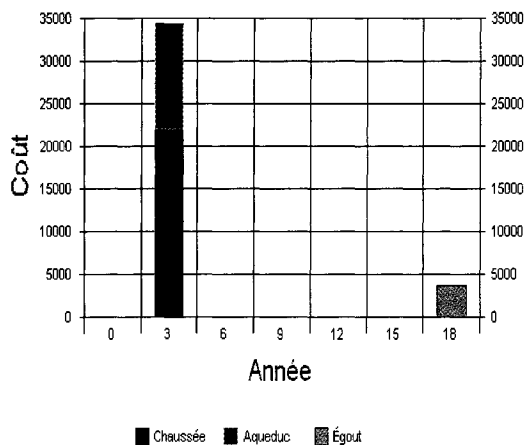
Rue de l' Église entre Rue Bannantyne et Rue Newmarch

Tronçon : **EGLI0T012**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	21 884	reconstruction	12 483			34 367
An 6							
An 9							
An 12							
An 15							
An 18					mineur	3 528	3 528

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

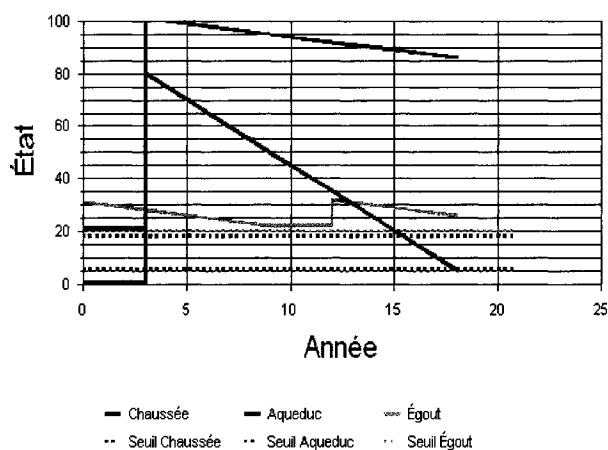
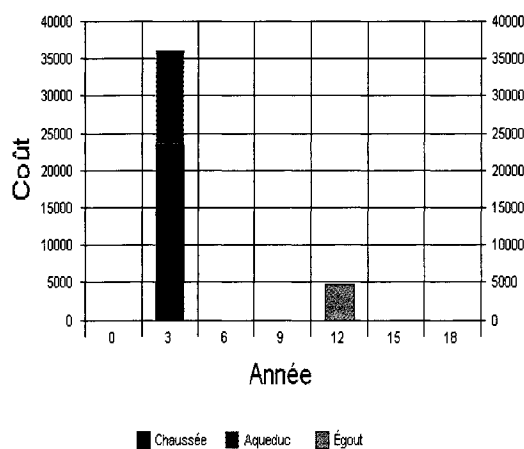
Rue de l' Église entre Rue Newmarch et Rue Claude

Tronçon : **EGLI0T011**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	10
Réhabilitation	40	20	40
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	23 611	reconstruction	12 439			36 051
An 6							
An 9							
An 12					mineur	4 722	4 722
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

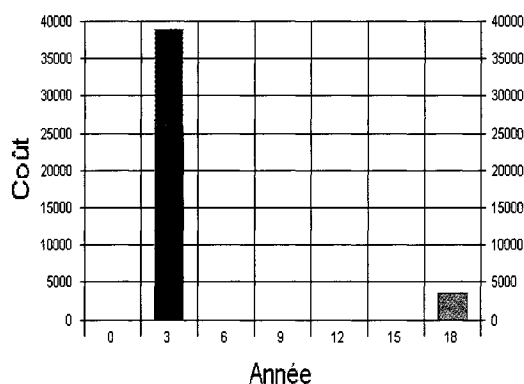
Rue de l' Église entre Rue Claude et Rue Joseph

Tronçon : **EGLI0T010**

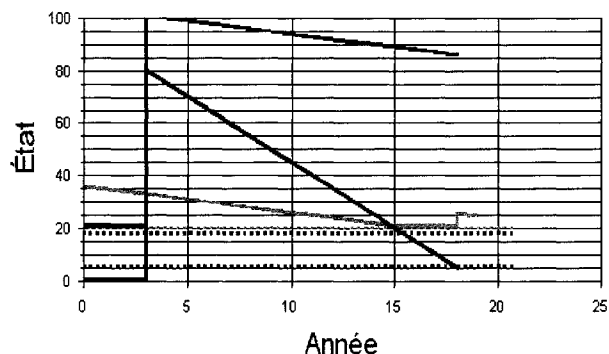
Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc — Égout
-- Seuil Chaussée -- Seuil Aqueduc -- Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	25 973	reconstruction	12 780			38 753
An 6							
An 9							
An 12							
An 15							
An 18					mineur	3 519	3 519

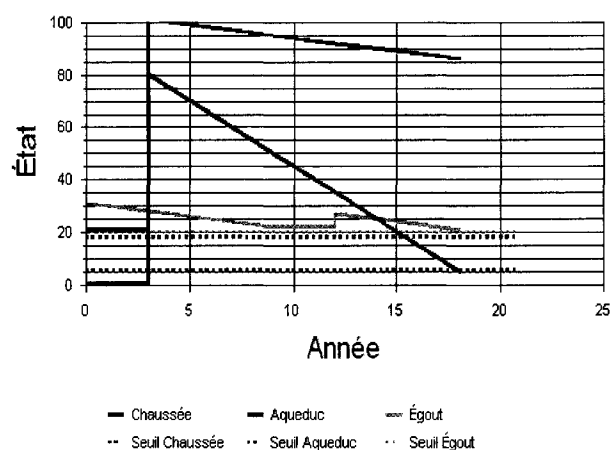
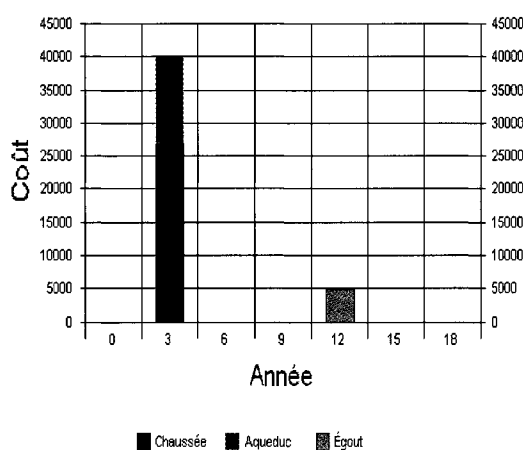
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue de l'Église entre Rue Joseph et Rue de Verdun

Tronçon : **EGLI0T009**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	20
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	26 923	reconstruction	13 165			40 088
An 6							
An 9							
An 12					mineur	4 822	4 822
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

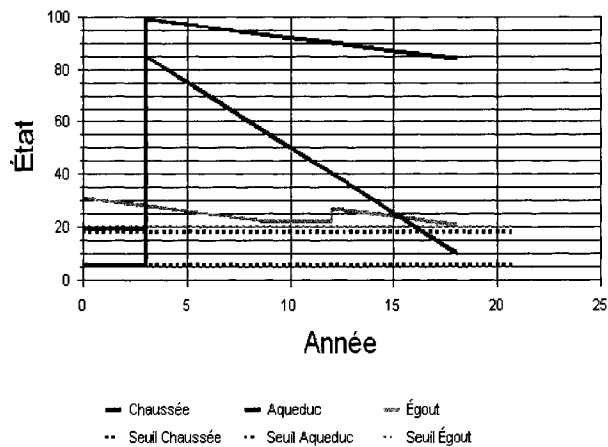
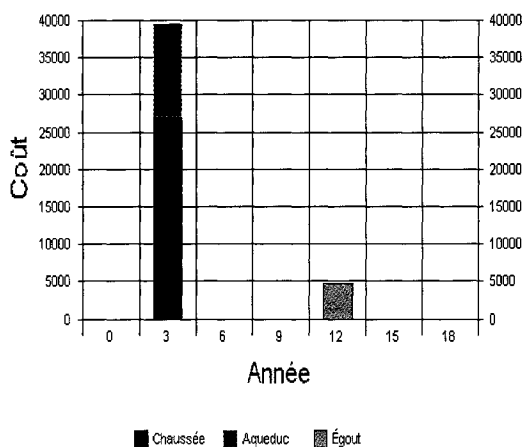
Rue de l' Église entre Rue de Verdun et Rue Evelyn

Tronçon : **EGLI0T008**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	26 923	reconstruction	12 499			39 422
An 6							
An 9							
An 12					mineur	4 739	4 739
An 15							
An 18							

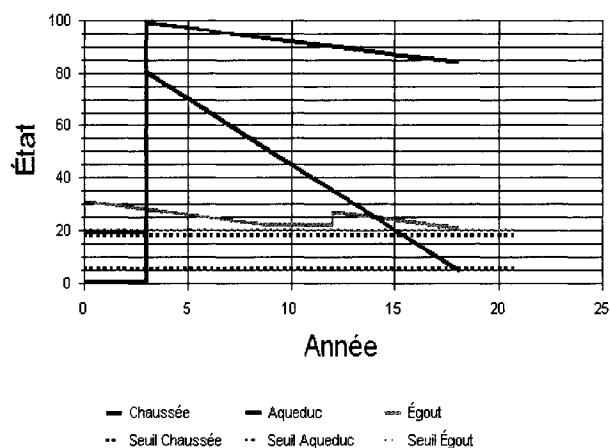
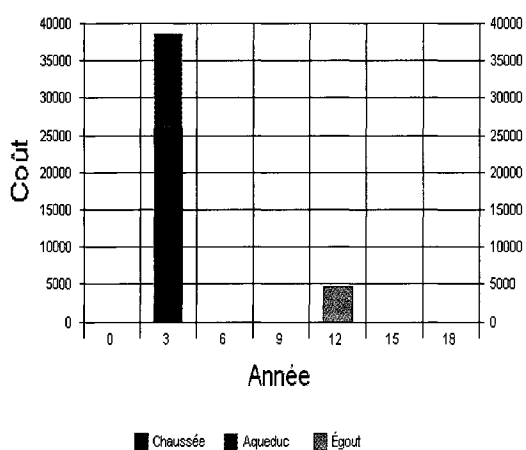
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue de l' Église entre Rue Evelyn et Rue Gertrude

Tronçon : **EGLI0T007**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	25 973	reconstruction	12 543			38 516
An 6							
An 9							
An 12					mineur	4 666	4 666
An 15							
An 18							

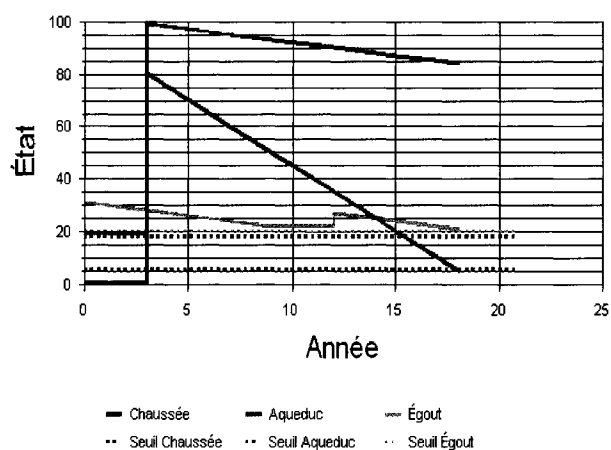
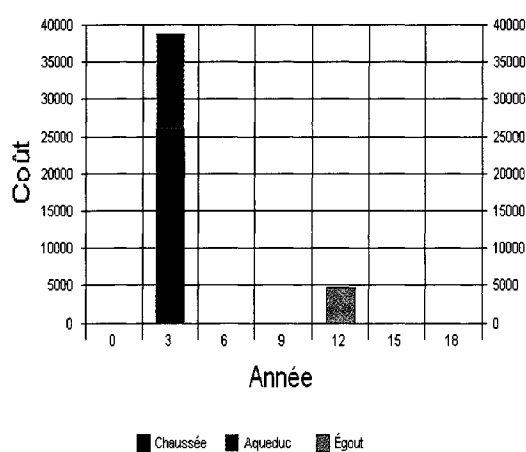
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue de l' Église entre Rue Gertrude et Rue Ethel

Tronçon : **EGLI0T006**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	25 973	reconstruction	12 661			38 634
An 6							
An 9							
An 12					mineur	4 739	4 739
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

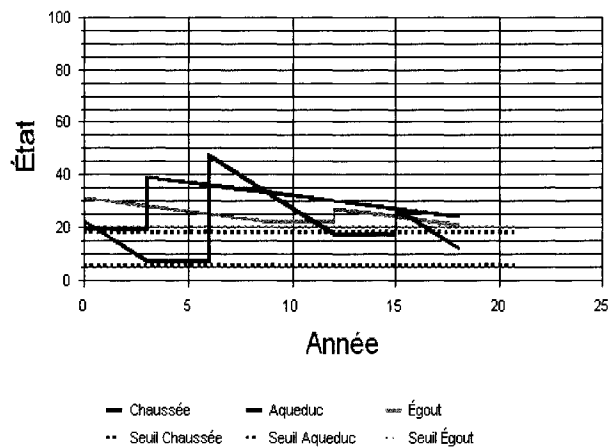
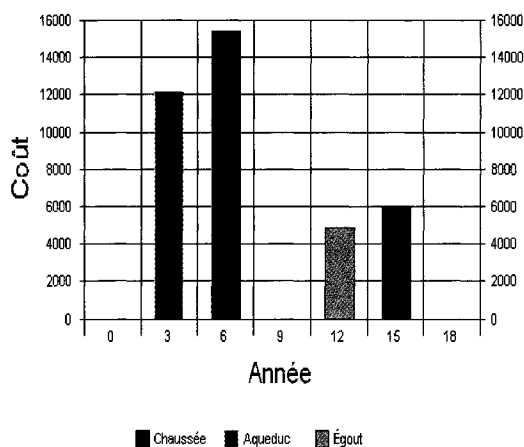
Rue de l' Église entre Rue Ethel et Rue Wellington

Tronçon : **EGLI0T005**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			réhabilitation	12 077			12 077
An 6	réhabilitation	15 391					15 391
An 9							
An 12					mineur	4 822	4 822
An 15	mineur	5 953					5 953
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

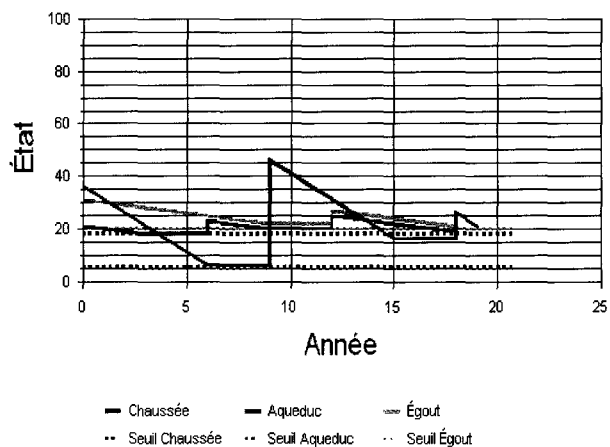
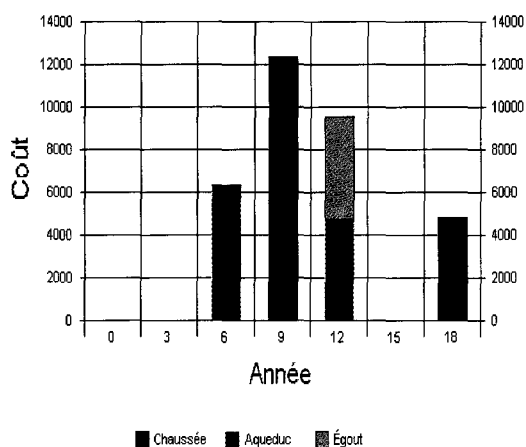
Rue Hickson entre Rue Bannantyne et Rue Newmarch

Tronçon : **HICK0T012**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	6 328			6 328
An 9	réhabilitation	12 328					12 328
An 12			mineur	4 722	mineur	4 794	9 516
An 15							
An 18	mineur	4 768					4 768

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

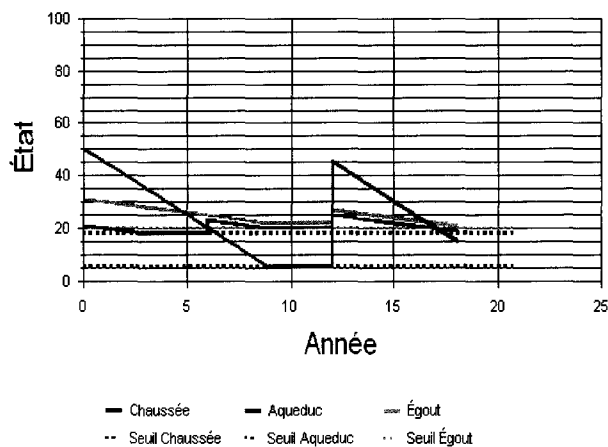
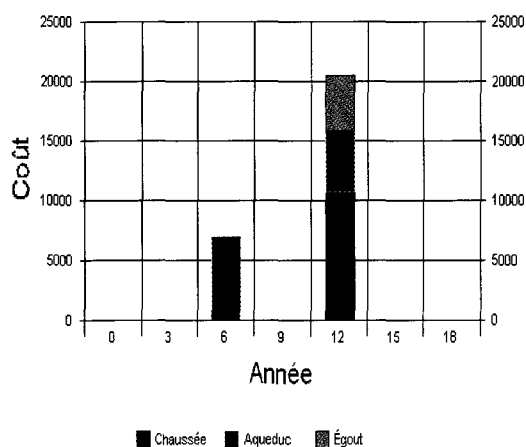
Rue Hickson entre Rue Newmarch et Rue Claude

Tronçon : **HICK0T011**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	6 843			6 843
An 9							
An 12	réhabilitation	10 650	mineur	5 106	mineur	4 694	20 450
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

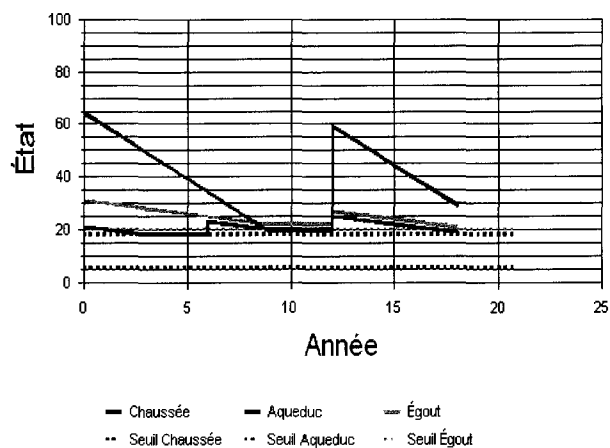
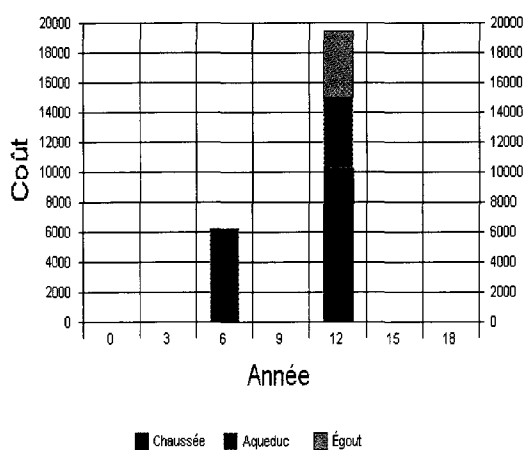
Rue Hickson entre Rue Claude et Rue Joseph

Tronçon : **HICK0T010**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	6 194			6 194
An 9							
An 12	réhabilitation	10 274	mineur	4 622	mineur	4 516	19 411
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

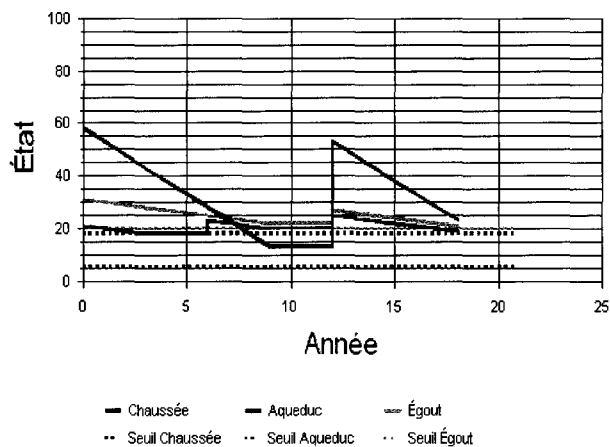
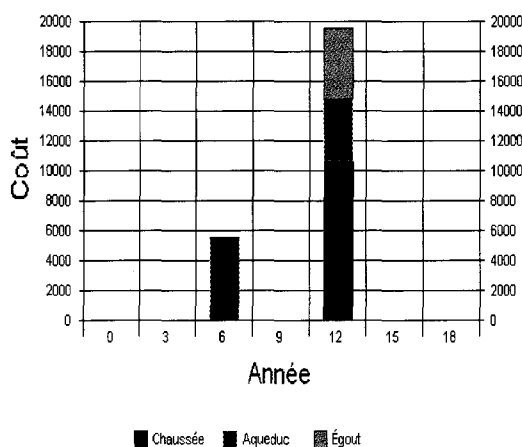
Rue Hickson entre Rue Joseph et Rue de Verdun

Tronçon : **HICK0T009**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			mineur	5 462			5 462
An 9							
An 12	réhabilitation	10 650	mineur	4 076	mineur	4 755	19 481
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

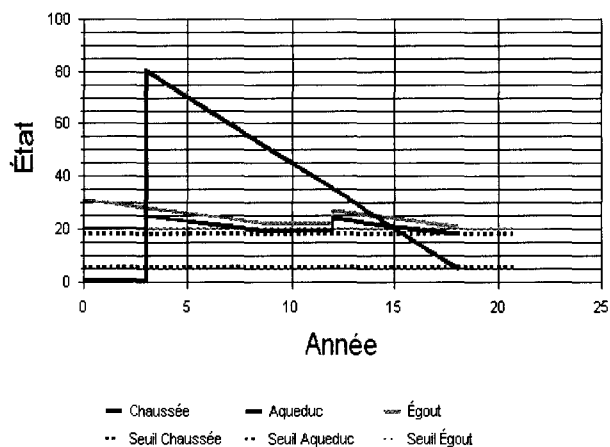
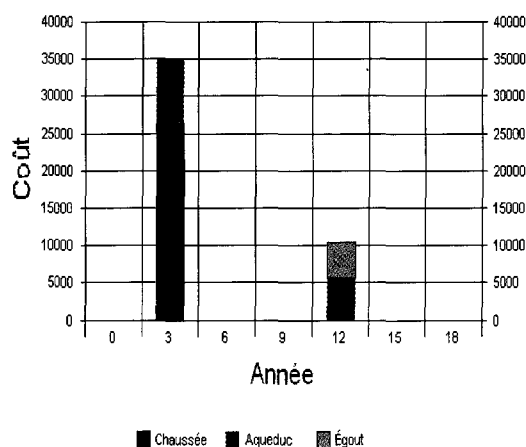
Rue Hickson entre Rue de Verdun et Rue Evelyn

Tronçon : **HICK0T008**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	26 433	mineur	8 682			35 115
An 6							
An 9							
An 12			mineur	5 596	mineur	4 761	10 357
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

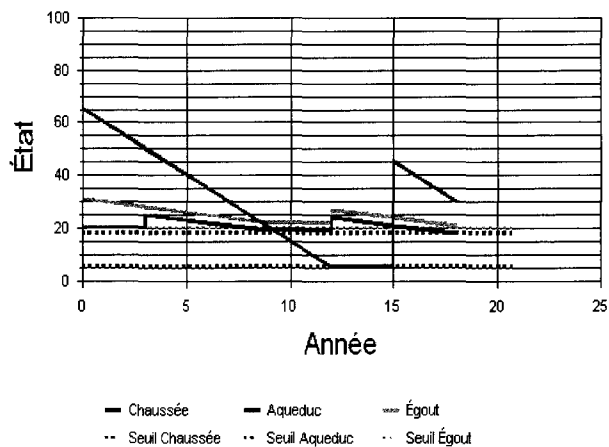
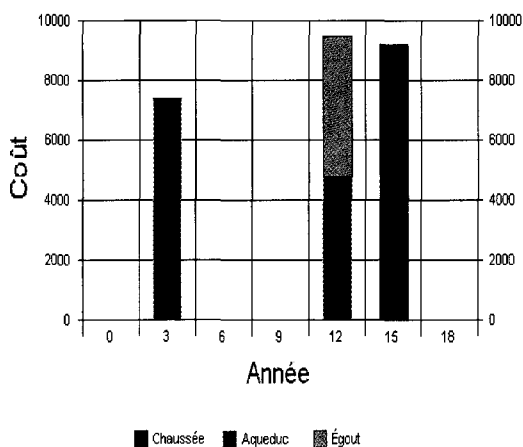
Rue Hickson entre Rue Evelyn et Rue Gertrude

Tronçon : **HICK0T007**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			mineur	7 369			7 369
An 6							
An 9							
An 12			mineur	4 750	mineur	4 700	9 450
An 15	réhabilitation	9 199					9 199
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

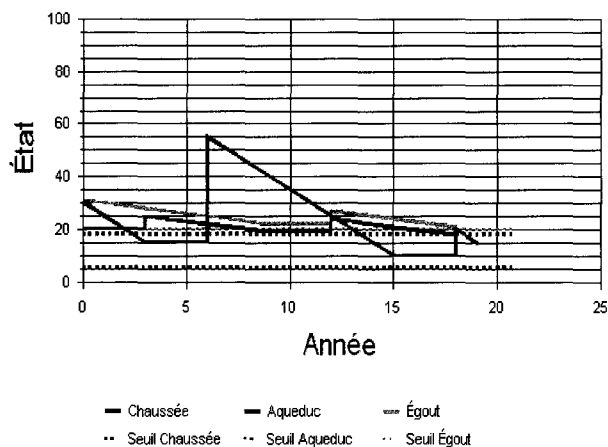
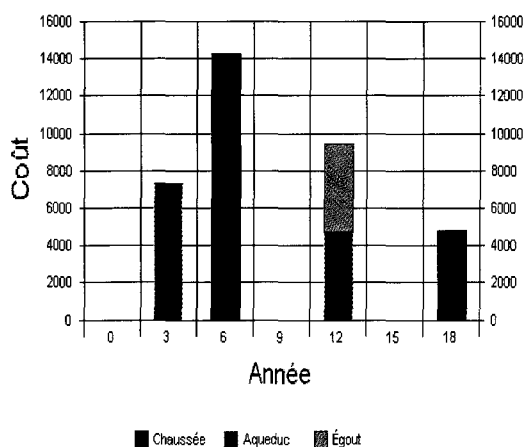
Rue Hickson entre Rue Gertrude et Rue Ethel

Tronçon : **HICK0T006**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			mineur	7 291			7 291
An 6	réhabilitation	14 271					14 271
An 9							
An 12			mineur	4 700	mineur	4 700	9 399
An 15							
An 18	mineur	4 768					4 768

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

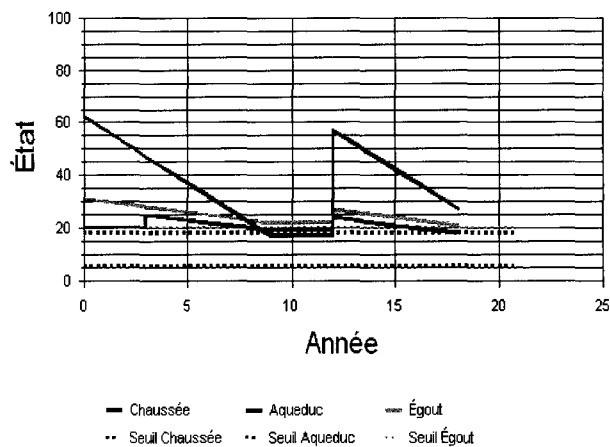
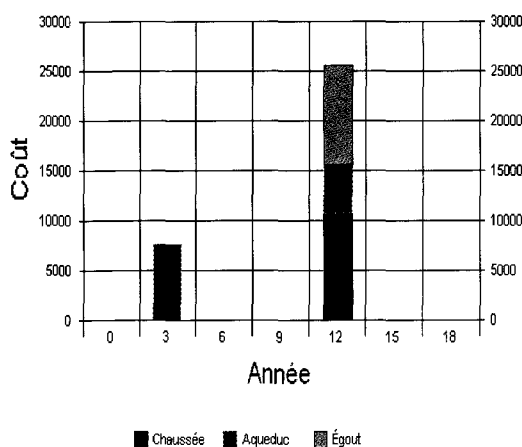
Rue Hickson entre Rue Ethel et Rue Wellington

Tronçon : **HICK0T005**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3			mineur	7 507			7 507
An 6							
An 9							
An 12	réhabilitation	10 650	mineur	4 839	mineur	10 112	25 601
An 15							
An 18							

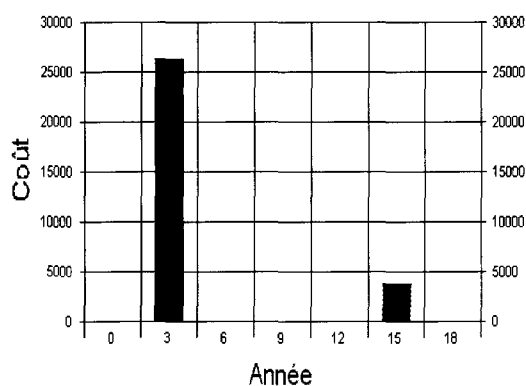
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Dupuis entre Rue Bannantyne et Rue Newmarch

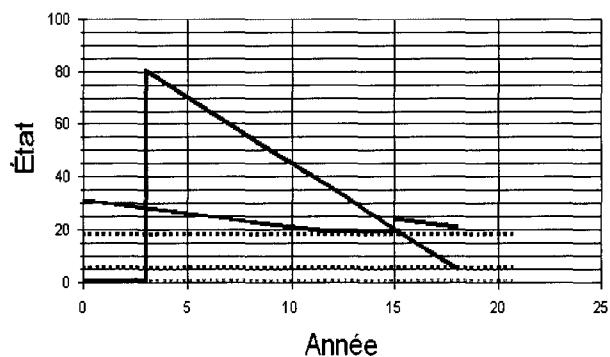
Tronçon : **DUPU0T003**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	100
Seuil minimum	5	18	0
Entretien mineur	10	5	0
Réhabilitation	40	20	0
Reconstruction	80	80	0

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



■ Chaussée ■ Aqueduc ■ Égout



— Chaussée — Aqueduc — Égout
 .. Seuil Chaussée .. Seuil Aqueduc .. Seuil Égout

	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	26 261			reconstruction		26 261
An 6							
An 9							
An 12							
An 15			mineur	3 689			3 689
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

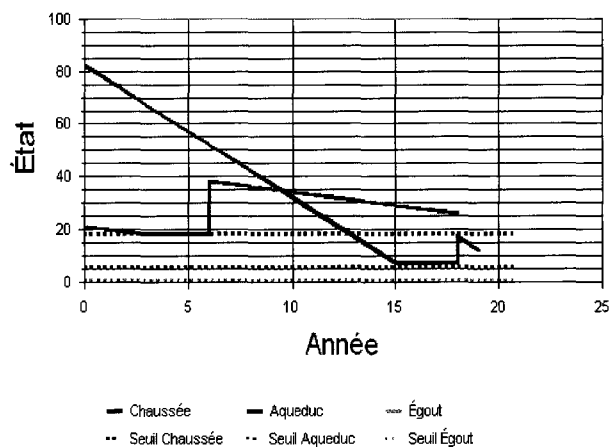
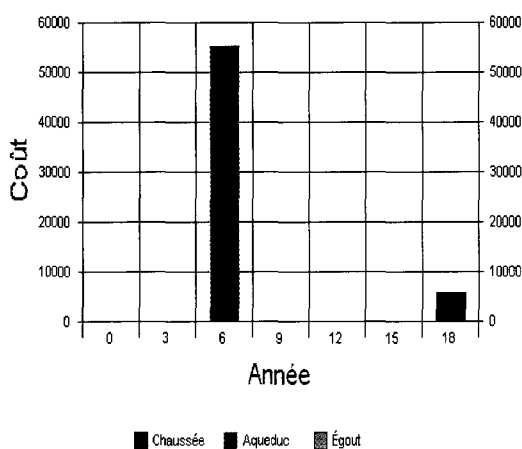
Rue Dupuis entre Rue Newmarch et Rue Claude

Tronçon : **DUPU0T002**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	100
Seuil minimum	5	18	0
Entretien mineur	10	5	0
Réhabilitation	40	20	0
Reconstruction	80	80	0

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	55 245			55 245
An 9							
An 12							
An 15							
An 18	mineur	5 684					5 684

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

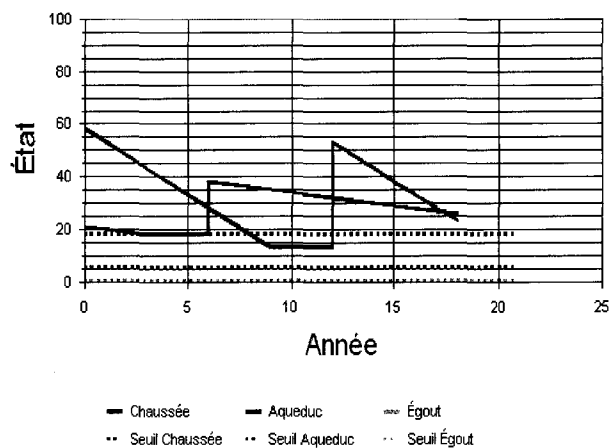
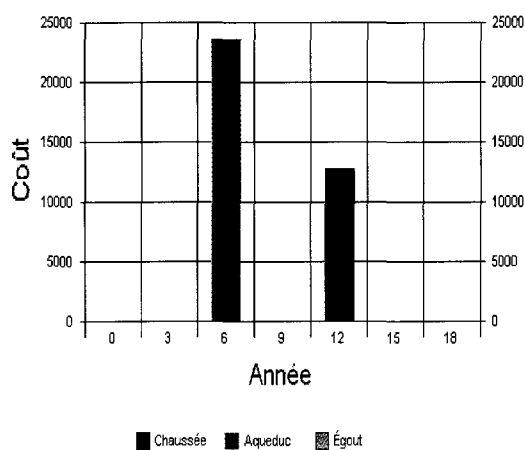
Rue Dupuis entre Rue Claude et Rue Joseph

Tronçon : **DUPU0T001**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	100
Seuil minimum	5	18	0
Entretien mineur	10	5	0
Réhabilitation	40	20	0
Reconstruction	80	80	0

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	23 536			23 536
An 9							
An 12	réhabilitation	12 696					12 696
An 15							
An 18							

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

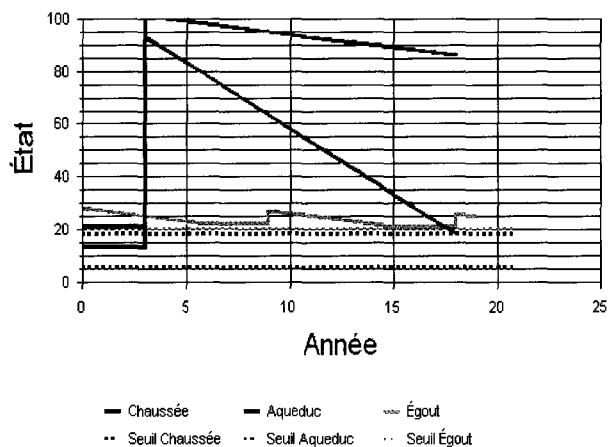
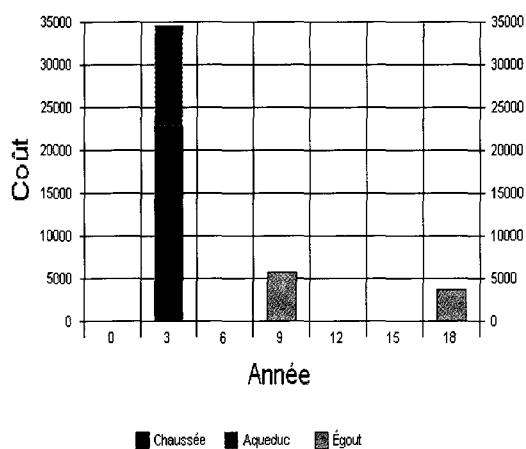
Rue Régina entre Rue Joseph et Rue de Verdun

Tronçon : **REGI0T005**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3	reconstruction	22 805	reconstruction	11 654			34 459
An 6							
An 9					mineur	5 608	5 608
An 12							
An 15							
An 18					mineur	3 615	3 615

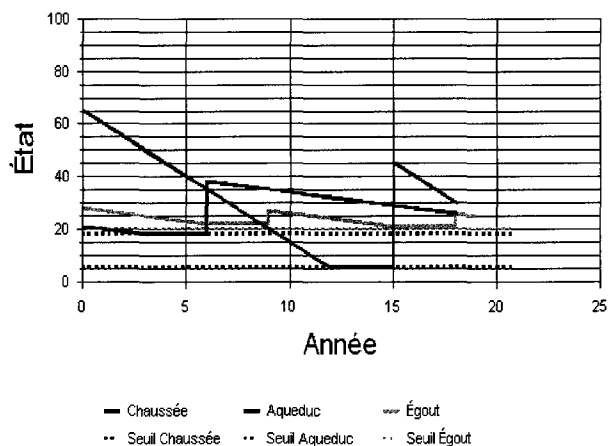
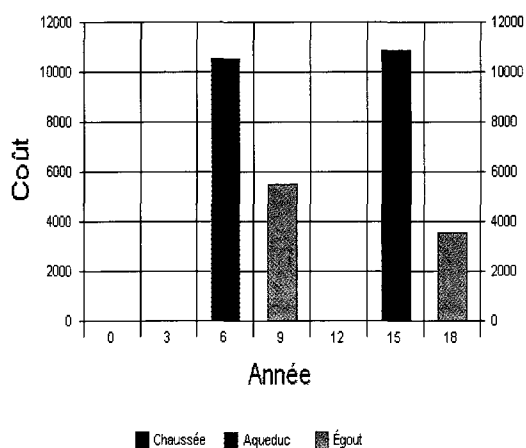
SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

Rue Régina entre Rue de Verdun et Rue Evelyn

Tronçon : **REGI0T004**Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	10 517			10 517
An 9					mineur	5 479	5 479
An 12							
An 15	réhabilitation	10 823					10 823
An 18					mineur	3 532	3 532

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

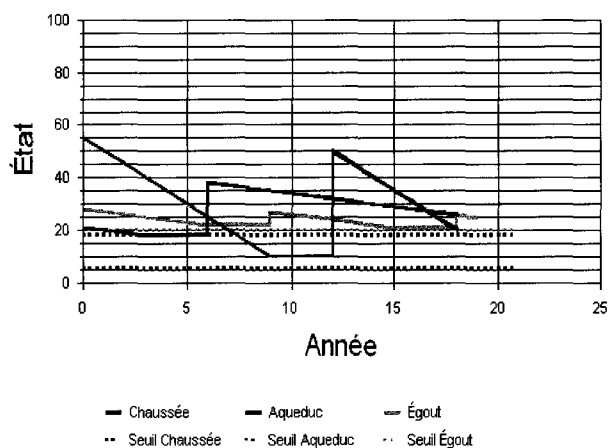
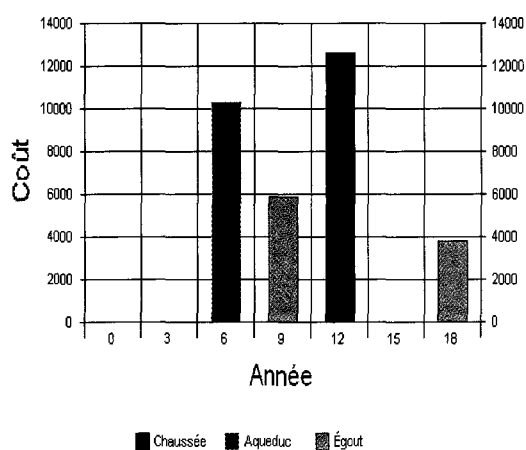
Rue Régina entre Rue Evelyn et Rue Gertrude

Tronçon : **REGI0T003**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	10 263			10 263
An 9					mineur	5 872	5 872
An 12	réhabilitation	12 616					12 616
An 15							
An 18					mineur	3 785	3 785

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

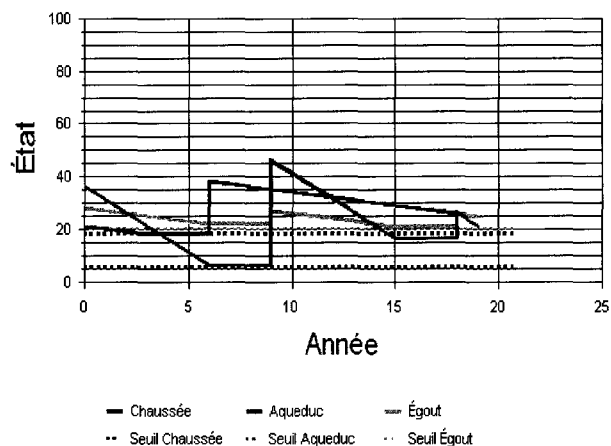
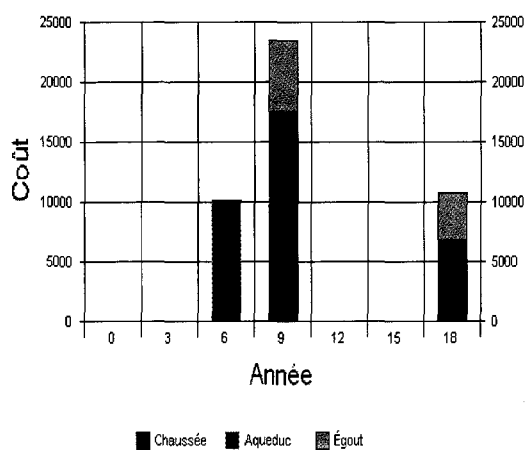
Rue Régina entre Rue Gertrude et Rue Ethel

Tronçon : **REGI0T002**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	10 094			10 094
An 9	réhabilitation	17 424			mineur	6 034	23 458
An 12							
An 15							
An 18	mineur	6 739			mineur	3 889	10 629

SYSTÈME D'AIDE À LA GESTION ET L'ENTRETIEN (SAGE) DES INFRASTRUCTURES MUNICIPALES

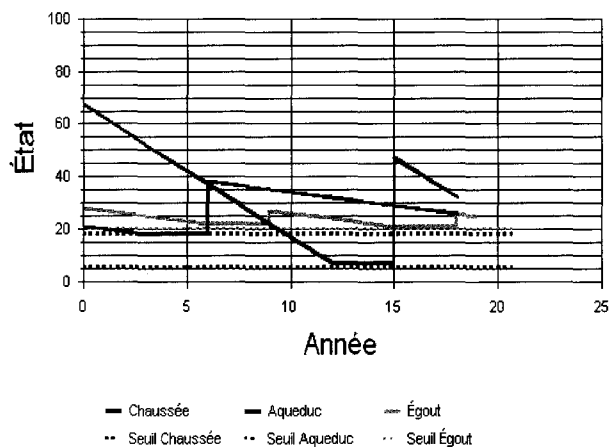
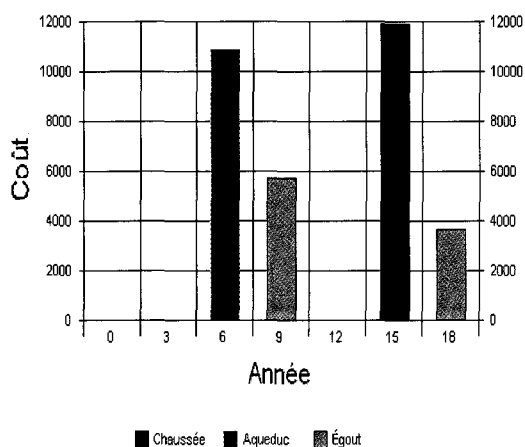
Rue Régina entre Rue Ethel et Rue Wellington

Tronçon : **REGI0T001**

Planification **triennale** sur 6 périodes soit 18 années

Param. interventions	Chaussée	Aqueduc	Égout
Durée de vie	19	82	80
Seuil minimum	5	18	20
Entretien mineur	10	5	5
Réhabilitation	40	20	30
Reconstruction	80	80	80

Param. coûts	Chaussée		Aqueduc		Égout	
Entretien mineur	15	\$ / m ²	100	\$ / m long	100	\$ / m long
Réhabilitation	25	\$ / m ²	90	% reconstruction	75	% reconstruction
Reconstruction	40	\$ / m ²	1,2	\$ / mmφ / m long	0,7	\$ / mmφ / m long
Économie	20	%	5	%	5	%



	Chaussée		Aqueduc		Égout		Coût total
	intervention	coût	intervention	coût	intervention	coût	
An 3							
An 6			réhabilitation	10 868			10 868
An 9					mineur	5 685	5 685
An 12							
An 15	réhabilitation	11 875					11 875
An 18					mineur	3 665	3 665

SAGE : Première période de planification triennale sur 6 périodes

Tronçon	Coût	Chaussée	Aqueduc	Égout
BANN0T002				
BANN0T001				
NEWM0T002				
NEWM0T001				
CLAU0T002	98 374	reconstruction		
CLAU0T001				
JOSE0T006	32 810			Réhabilitation
JOSE0T005	22 455			Réhabilitation
JOSE0T004	65 416	reconstruction		Reconstruction
VERD0T005				
VERD0T004				
EVEL0T005	141 733	reconstruction	reconstruction	
EVEL0T004	35 518		réhabilitation	
GERT0T005				
GERT0T004	23 762		réhabilitation	
ETHE0T004				
ETHE0T003				
WELL0T008				
WELL0T007				
EGLI0T012	34 367	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T011	36 051	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T010	38 753	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T009	40 088	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T008	39 422	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T007	38 516	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T006	38 634	reconstruction	reconstruction	
EGLI0T005	12 077		réhabilitation	
HICK0T012				
HICK0T011				
HICK0T010				
HICK0T009				
HICK0T008	35 115	reconstruction	mineur	
HICK0T007	7 369		mineur	
HICK0T006	7 291		mineur	
HICK0T005	7 507		mineur	
DUPU0T003	26 261	reconstruction		Reconstruction
DUPU0T002				
DUPU0T001				
REGI0T005	34 459	reconstruction	reconstruction	
REGI0T004				
REGI0T003				
REGI0T002				
REGI0T001				
Coût total	815 978			

SAGE : Planification triennale sur 6 périodes soit 18 années

Tronçon	An 3	An 6	An 9	An 12	An 15	An 18
BANN0T002		17 402	45 880	25 603		
BANN0T001		45 688				10 051
NEWM0T002		18 882		10 886	23 594	
NEWM0T001		9 417		13 860	7 335	
CLAU0T002	98 374					10 097
CLAU0T001		9 604		7 166	12 224	4 837
JOSE0T006	32 810	28 288		39 633		
JOSE0T005	22 455	16 018	15 084			5 834
JOSE0T004	65 416	71 166				
VERD0T005						
VERD0T004						
EVEL0T005	141 733			13 743		
EVEL0T004	35 518		45 058	14 155		
GERT0T005			52 648	13 670		
GERT0T004	23 762		48 547	14 450		18 777
ETHE0T004				58 590		
ETHE0T003			45 880	17 863		
WELL0T008					19 207	
WELL0T007					20 477	
EGLI0T012	34 367					3 528
EGLI0T011	36 051			4 722		
EGLI0T010	38 753					3 519
EGLI0T009	40 088			4 822		
EGLI0T008	39 422			4 739		
EGLI0T007	38 516			4 666		
EGLI0T006	38 634			4 739		
EGLI0T005	12 077	15 391		4 822	5 953	
HICK0T012		6 328	12 328	9 516		4 768
HICK0T011		6 843		20 450		
HICK0T010		6 194		19 411		
HICK0T009		5 462		19 481		
HICK0T008	35 115			10 357		
HICK0T007	7 369			9 450	9 199	
HICK0T006	7 291	14 271		9 399		4 768
HICK0T005	7 507			25 601		
DUPU0T003	26 261				3 689	
DUPU0T002		55 245				5 684
DUPU0T001		23 536		12 696		
REGI0T005	34 459		5 608			3 615
REGI0T004		10 517	5 479		10 823	3 532
REGI0T003		10 263	5 872	12 616		3 785
REGI0T002		10 094	23 458			10 629
REGI0T001		10 868	5 685		11 875	3 665
Coût total	815 978	391 477	311 527	407 106	124 376	97 089

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, D.M., Wirahadikusumah, R., Short, T.J., Shahbahrami, S. (1998). Optimization Modeling For Sewer Network Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(5), 402-410.
- Al-Swailmi, S. (1994). Framework for Municipal Maintenance Management Systems. *Transportation Research Record*, 1442, 3-10.
- AQTR (1977). *Guide de gestion routière*. Ottawa : Édition Agence d'Arc inc.
- Aqua Data inc. (2004). *Logiciel Aqua Cad : Spécifications et Graphiques*, [En ligne]. http://www.aquadata.com/default_francais.htm (Consulté le 3 mai 2004).
- Assaf, G.J. (1988). *Analyse du comportement des chaussées*. Waterloo : Université de Waterloo.
- AWWA (2004). *The Authoritative Resource for Safe Drinking Water*, [En ligne]. <http://www.awwa.org> (Consulté le 3 mai 2004).
- Balas, E. (1965). An additive algorithm for solving linear programs with zero-one variables. *Operations research*, 13(4), 517-549.
- Beaulieu, D., Bédard, Y., Bhérer, L., Boulanger, M., Boutin, G., Dutil, F. (1990) *Guide de la géomatique*. Sainte-Foy : Ordre des arpenteurs-géomètres du Québec.
- Beg, M.A., Zhang, Z., Hudson, R. (2000). Development of Pavement Type Evaluation Procedure for Texas Department of Transportation. *Transportation Research Record*. 1699, 23-32.
- Bégin, L. (1997). *Development and Implementation of an Integrated Infrastructure Management System (IIMS) for the City of Nepean*. Infra'97: Urban Infrastructure Week.
- Behera, P.K., Papa, F., Adams, B.J. (1999). Optimization of Regional Storm-Water Management Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125, 107-114.
- Bengassem, J. (2001). *Élaboration d'un système d'aide au diagnostic hydraulique et structural des réseaux d'assainissement urbains*. Montréal : École de technologie supérieure.

Bernard, F. (2000). *Notes de cours MGC-870 : Gestion de l'entretien des ouvrages d'infrastructure*. Montréal : École de technologie supérieure.

Bernard, F. Bruxelles, C., Pelletier, G.R. (2000). *Proposition d'élaboration d'un guide de gestion des infrastructures municipales*. Document présenté au Ministère des Affaires municipales et de la Métropole MAMM.

Boucher, M. (1998). *Revue générale et comparaison de systèmes de gestion des chaussées*. Thèse de maîtrise. Montréal : École de technologie supérieure.

Brière, F.G. (2000). *Distribution et collecte des eaux* (2^e éd). Montréal : Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.

Bruxelle, C.E., Boudreau, S., Assaf, G.J. (1996). *Systèmes intégrés pour la gestion des infrastructures urbaines*. Montréal : Conférence au 64^e congrès de l'ACFAS.

Bruxelle, C.E., Boudreau, S., Assaf, G.J. (1997). Une approche intégrée et graphique pour la réhabilitation des chaussées. *Routes et transports, AQTR*, 27(1), 35-41.

Bruxelle, C. (1999). *Définition d'un système intégré de gestion des infrastructures civiles (SIGIC)*. Thèse de maîtrise. Montréal : École de technologie supérieure.

Bruxelle, C. (2002). *Notes de cours MGC-800 : Optimisation et analyse de faisabilité*. Montréal : École de technologie supérieure.

Cafiso, S., Di Graziano, A., Kerali, H.R., Odoki, J.B. (2002). Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management. *Transportation Research Board*. Washington : 81st Annual Meeting.

CERIU (1997). *Les classeurs du CERIU - Infrastructures souterraines*. Montréal : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.

Cititech Systems inc. (1998). *Focus on the Future, Complete Street : Innovative Software for Public Works*, [En ligne]. <http://www.cititech.com/focus.htm> (Consulté le 16 octobre 1998).

Chootinan, P., Chen, A. (2002). Pavement Maintenance Programming using a Stochastic Simulation based Genetic Algorithm approach. *Transportation Research Board*. Washington : 81st Annual Meeting.

- Cunha, M., C., Sousa, J. (1999). Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125-4, 215-221.
- Dandy, G.C., Engelhardt, M. (2001). Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement using Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127-4, 214-223.
- De Melo e Silva, F., Van Dam, T.J., Bulleit, W.M., Ylitalo, R. (2000). Proposed Pavement Performance Models for Local Government Agencies in Michigan. *Transportation Research Record*, 1699, 81-86.
- Desnaultiers, G. (2002). *Notes de cours: Recherche opérationnelle II*. Montréal : École polytechnique de Montréal.
- Déziel, J. (1976). *Histoire de Verdun 1665, 1876-1976*. Verdun : Édition Comité du centenaire.
- Evdorides, H. T., Kerali, H. G. R., Rivière, N., Ørnskov, J. K. (2002). Condition-Based Method for Programming Road Infrastructure Maintenance. *Transportation Research Record*, 1816, 10-15.
- Ferreira, A., Antunes, A., Picado-Santos, L. (2001). A GIS-Based Pavement Management System. Seattle : Fifth International Conference on Managing Pavements.
- Flintsch, G.W., Zaniewski, J.P., Medina, A. (1998). Development of a Knowledge-Based Formula to Prioritize Pavement Rehabilitation Projects. *Transportation Research Record*, 1643, 54-61.
- Fortin, P., Falardeau, T., Désilets, J., Montplaisir, L., Chartrand, L., Paul, J-L., Simard, C. (2004). Programme d'inventaire et d'entretien des infrastructures municipales Ville de Longueuil, Infra 2004.
- Fwa, T. F., Chan, W. T., Hoque, K. Z. (1998). Analysis of Pavement Management Activities Programming by Genetic Algorithms. *Transportation Research Record*, 1643, 1-6.
- Gabrys, B., Bargiela, A. (1999). Neural Networks Based Decision Support in Presence of Uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125-5, 272-280.

- Ganeshan, R., Grobler, F., Wang, C-Y.E., Coimbatore, V. (2001). Citywork: Application of collaborative technologies for infrastructure management. *Journal of computing in civil engineering*, 15, 74-80.
- Garceau, J., Abdul-Nour, G., Gharbi, A., Lakshmanan, R. (1996). *Analyse de rentabilité en ingénierie*. Trois-Rivières : Les éditions SMG.
- Garfinkel, R.S., Nemhauser, G.L. (1972). *Integer Programming*. New York: John Wiley and sons.
- Gendreau, M., Duclos, L.P. (1990). Decision-support system for pavement management at the network level. *Transportation Research Record*, 1272, 80-84.
- Gharbi (1995). *Notes de cours ING-801 : Analyse de faisabilité*. Montréal : École de technologie supérieure.
- GIE Technologies inc. (2004). *Pavement Data Collection... at the speed of traffic*, [En ligne]. <http://www.gietech.com/index.htm> (Consulté le 3 mai 2004).
- Glover, F. (1965). A multiphase-dual algorithm for the zero-one integer programming problem. *Operations research*, 13(6), 879-919.
- Golberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Massachussetts: Addison-Wesley.
- Greenberg, H. (1971). *Integer Programming*. New York: Academic Press.
- Grigg, N. S. (1992). *Urban Water Infrastructure, Planning Management and Operation*. Malabar : Kreiger Publishing Company.
- Guide national pour des infrastructures municipales durables (2002a). *Entretien préventif en temps opportun des routes municipales : guide d'introduction*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.
- Guide national pour des infrastructures municipales durables (2002b). *Détérioration et inspection des réseaux de distribution d'eau*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.
- Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003a). *Processus de planification des priorités et de budgétisation relatif à l'entretien ou à la réhabilitation des chaussées*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.

Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003b). *Élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.

Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003c). *Choix de techniques de réhabilitation ou de remplacement de tronçons de réseau de distribution d'eau*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.

Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003d). *Choix de techniques de réhabilitation ou de remplacement de conduites d'égout*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.

Guide national pour des infrastructures municipales durables (2003e). *Paramètres de réinvestissement dans les infrastructures municipales*. Fédération canadienne des municipalités (FCM) et Conseil national de recherches Canada.

Hass, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Malabar : Kreiger Publishing Company.

Haas, R., Hudson, W.R. (1996). Defining and Serving Clients for Pavements. *Transportation Research Record*, 1524, 1-9.

Hahn, M.A., Palmer, R.N., Merrill, S., Lukas, A.B. (2002). Expert System for Prioritizing the Inspection of Sewers: Knowledge Base Formulation and Evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128-2, 121-129.

Harfan (2005). Harfan Technologie. [En ligne]. http://www.harfan.com/Principal_fra.asp (Consulté le 2 mai 2005).

Harper, W.V., Majidzadeh, K. (1993). Integrated Pavement and Bridge Management Optimization. *Transportation Research Record*, 1397, 83-89.

Hazelrigg, G.A. (1996). *Systems Engineering : An Approach to Information Based Design*. New York : Prentice-Hall.

Heltzel, C., Loomis, R., Lalonde, É. (2004). Integrated decision support system simplifies capital Improvement planning. INFRA 2004.

Hicks, R.G., Dunn, K., Moulthrop, J.S. (1997). Framework for Selecting Effective Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements. *Transportation Research Record*, 1597, 1-10.

Hill, L., Cheetham, A., Haas, R. (1991). Development and Implementation of a Pavement Management System for Minnesota. *Transportation Research Record*, 1311, 230-241.

Hillier, F.S., Lieberman, G.J. (1995). *Introduction to Mathematical Programming* (2nd edition). New York: McGraw-Hill.

Hudson, W.R., Haas, R., Uddin, W. (1997). *Infrastructure Management*. New York : McGraw-Hill.

Hudson, W. R., Hudson, S.W. (1989). Pavement Management Systems Lead the Way for Infrastructure Management Systems. *Third International Conference on Managing Pavements, Transportation Research Board*, 99-112.

IRC (2000). Institut de recherche en construction : des efforts conjugués pour une méthode d'aide à la décision en matière de réhabilitation des égouts. [En ligne]. http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ci/v5no4/v5no4_11_f.html. (Consulté le 2 mai 2005).

IRC (2002). Institut de recherche en construction : recherche - réhabilitation des infrastructures urbaines. [En ligne]. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/uir/bu/indexf.html>. (Consulté le 2 mai 2005).

IRC (2003). Institut de recherche en construction : infrastructures urbaines. [En ligne]. http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ci/v8no2/v8no2_16_f.html. (Consulté le 2 mai 2005).

Irrgang, F.C., Maze, T.H. (1993). Status of Pavement Management Systems and Data Analysis Models at State Highway Agencies. *Transportation Research Record*, 1397, 1-6.

Kali, O., Bruxelles, C., Bernard, F. (2001). *Intégration de la gestion des chaussées dans un système d'information géographique*. Infra 2001 : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.

Kazanowski, A.D. (1968). *A Standardized Approach to Cost-Effectiveness Evaluations, Cost Effectiveness*. J. Morley English, John Wiley and Sons.

Kuester, J.L., Mize, J.H. (1973). *Optimization Techniques with Fortran*. New York : McGraw-Hill.

Landry, J. (2000). Système intégré d'aide à la décision (SIAD) pour la gestion globale de tous les réseaux d'infrastructures municipales adapté aux petites et moyennes municipalités : c'est enfin une réalité! INFRA 2000.

- Landry, J. (2001). *Système informatisé de gestion globale des infrastructures urbaines*. Montréal : École de technologie supérieure.
- LARIM (2000). *Conception et réalisation d'un système intégré de gestion coordonnée d'infrastructures urbaines (SIGEC)*. Laboratoire de recherche en réseautique et informatique mobile (LARIM) de l'École Polytechnique de Montréal.
- Le Moigne, J.L. (1977). *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*. Collection Systèmes-Décisions. Paris: Presses Universitaires de France.
- Li, N., Huot, M., Haas, R. (1996a). Cost-Effectiveness-Based Priority Programming of Standardized Pavement Maintenance. *Transportation Research Record*, 1592, 8-16.
- Li, N., Xie, W-C., Haas R. (1996b). Reliability-Based Processing of Markov Chains for Modeling Pavement Network Deterioration. *Transportation Research Record*, 1524, 203-213
- Li, N., Haas, R., Huot, M. (1998). Integer Programming of Maintenance and Rehabilitation Treatments for Pavement Networks. *Transportation Research Record*, 1629, 242-248.
- Li, N. Kazmierowski, T., Tighe, S., Haas, R. (2001). *Integrating Dynamic Performance Prediction Models into Pavement Management Maintenance and Rehabilitation Programs*. Seattle : 5th International Conference on Managing Pavements.
- Locher, M. (2005). *Application des Algorithmes Génétiques à l'optimisation des offres dans un marché d'électricité libéralisé*. Lausanne : Laboratoire de Réseaux Électriques École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Mailhot, A. Duchesne, S., Musso, E., Villeneuve, J-P. (2000a). Modélisation de l'évolution de l'état structural des réseaux d'égout : application à une municipalité du Québec. *Société canadienne de génie civil*, 27, 65-72.
- Mailhot, A., Pelletier, G., Noël, J-F., Villeneuve, J-P. (2000b). *Modélisation de l'évolution de l'état structural des réseaux d'aqueduc de quatre municipalités du Québec*. Infra 2000 : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.
- Mathieu, P., Cinq-Mars, C., Marcoux, C. (2000). Développement d'un cadre de référence pour l'implantation de la gestion intégrée des infrastructures urbaines au Québec. INFRA 2000.

- Mbwana, J.R., Turnquist, M.A. (1996). Optimization Modeling for Enhanced Network-Level Pavement Management System. *Transportation Research Record*, 1524, 76-85.
- Micevski, T., Kuczera, G., Coombes, P. (2002). Markov Model for Storm Water Pipe Deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, 8, 49-56.
- MIMS (2005). Municipal Infrastructure Management System. [En ligne]. <http://www.albertamims.org/>. (Consulté le 2 mai 2005).
- Minoux, M. (1989). *Programmation mathématique: Théorie et algorithmes*. Tome 2. Paris : Dunod.
- MTQ (1996). *Lexique des ouvrages routiers*. Québec : Les publications du Québec.
- National Project Team. (1997). *Pavement Design and Management Guide*. Ottawa : Association du Transport du Canada.
- Nemhauser, G. Wolsey, L. (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. New York : John Wiley & sons.
- Nobert, Y., Ouellet, R., Parent, R. (1999). *La recherche opérationnelle* (2^{ème} éd). Montréal: Gaëtan Morin éditeur.
- Nunoo, C., Jolibois, S.C., Agyei, E. (2002). Optimization of Pavement Preservation Programming Using Shuffled Complex Evolution Algorithm. *Transportation Research Board, Annual Meeting*.
- Pelletier, L.O., Lalonde, É. (2000). SIAD-Ville de SAINTE-FOY : Lumières sur nos infrastructures : Plan directeur de réfection intégrant les réseaux d'aqueduc, d'égouts et de voirie - Méthodologie et résultats obtenus à la Ville de Sainte-Foy. INFRA 2000.
- Petersen, C.C. (1967). Computational experience with variants of the Balas algorithm applied to the selection of R&D projects. *Management science*, 13(9), 736-784.
- Rajani, B.B., Kleiner, Y. (2001). WARP – water mains renewal planner. Kitchener : International Conference on Underground Infrastructure Research.
- Ravirala, V., Grivas, (1995). Goal-Programming Methodology for Integrating Pavement and Bridge Programs. *Journal of Transportation Engineering*, 121-4, 345-351.
- Réseau environnement (1999). *Le contrôle des fuites*. Montréal : Réseau environnement.

- Rivard, G., Dupuis, P. (2000). *Évaluation du comportement hydraulique d'un réseau d'égout existant : paramètres et critères d'analyse pour la réhabilitation*. Infra 2000 : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.
- Sebaaly, P.E., Hand, A., Epps, J., Bosch, C. (1996). Nevada's Approach to Pavement Management. *Transportation Research Record*, 1524, 109-117.
- Shahin, M.Y., Walther, J.A. (1990). *Pavement Maintenance Management for Roads and Streets Using the PAVER System*. Champaign, Ill.: US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory.
- Shenoy, G.V. (1989). *Linear Programming: Methods and applications*. New Delhi: John Wiley and sons.
- Shewen, E., Kovacs, E. (1995). Enterprise-Wide Integrated Infrastructure Asset Management. *Public Works*, September 1995.
- Shober, S.F., Friedrichs, D.A. (1998). Pavement Preservation Strategy. *Transportation Research Record*, 1643, 44-53.
- Stubler, J., Mir, F. (2001). *Maintenance proactive des structures : outils de gestion intégrée des ouvrages d'art d'Advitam : exemple du pont Vasco de Gama et applications au Canada*. Infra 2001 : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines.
- Tack, J.N., Chou Y. J. (2001). Pavement Performance Analysis Applying Probabilistic Deterioration Methods. *Transportation Research Record*, 1769, 20-27.
- Taha, H.A. (1971). *Operations Research: An introduction*. New York: MacMillan publishing.
- Taha, H.A. (1975). *Integer programming: Theorie, Applications and Computations*. London: Academic Press.
- Tecsult (1999). *Intégration de la gestion des données d'infrastructures urbaines à l'aide d'une approche géomatique*. Travaux d'infrastructures Canada-Québec.
- Tessier, G.R. (1990). *Guide de construction et d'entretien des chaussées*. Montréal : Association québécoise du transport et des routes.
- Vallée, T., Yıldızoglu, M. (2001). Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. Nantes : Université de Nantes

Verdun (2004). *Arrondissement Verdun: statistiques*, [En ligne]. <http://verdun.ville.montreal.qc.ca/a24-fr/stata24f.asp> (Consulté le 3 mai 2004).

Wang, F., Zhang, Z., Machemehl, R.B. (2003). Decision Making Problem for Managing Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects. *Transportation Research Board*. Washington : 82nd Annual Meeting.

Wirahadikusumah, R., Abraham, D., Iseley, T. (2001). Challenging Issues in Modeling Deterioration of Combined Sewers. *Journal of infrastructure systems*, 7, 77-84.

WRc (1986) Sewerage Rehabilitation Manual Second edition United Kingdom

Wu, N., Coppins, R. (1981). *Linear Programming and extensions*. New York: McGraw Hill Publishing.

XP-SWMM (2004). *XP-Software : why use XP-SWMM* [En ligne]. <http://www.xpsoftware.com.au/products/xpswmm.htm> (Consulté le 3 mai 2004).

Yang, S.L., Sun, Y.H., Yeh, W.W. (2000). Optimization of Regional Water Distribution System with Blending Requirements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126, 229-235.

Zaniewski, J., Mamlouk, M. (1999). Pavement Preventive Maintenance: Key to Quality Highways. *Transportation Research Record*, 1680, 26-29.

Zimmerman, K.A., Smith, K.O., Grogg, M.G. (2000). Applying Economic Concepts from Life-Cycle Cost Analysis to Pavement Management Analysis. *Transportation Research Record*, 1699, 58-65.