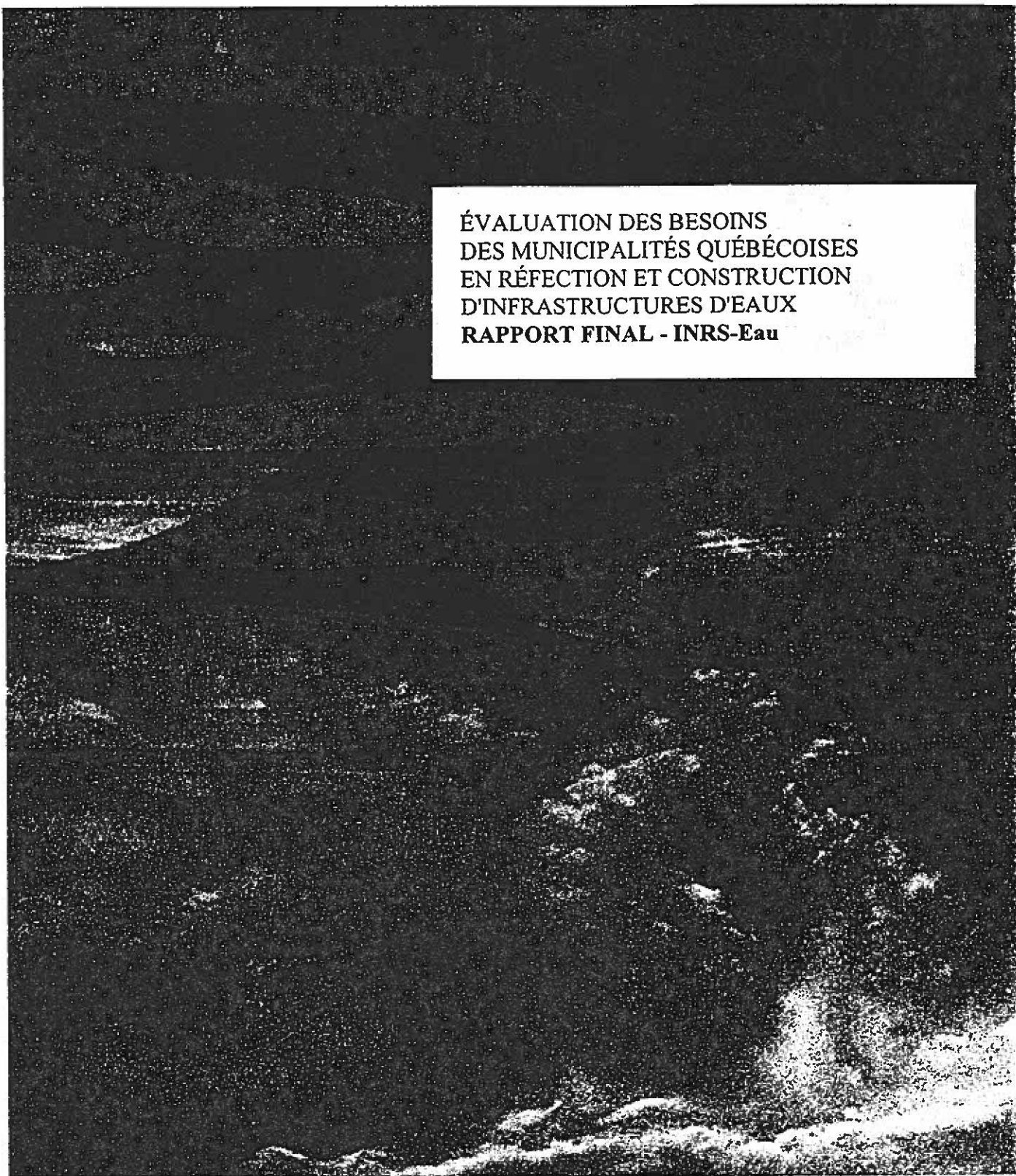


(original)

AUD6212-07-00

INRS-EAU

ÉVALUATION DES BESOINS
DES MUNICIPALITÉS QUÉBÉCOISES
EN RÉFECTION ET CONSTRUCTION
D'INFRASTRUCTURES D'EAUX
RAPPORT FINAL - INRS-Eau



INRS

LA FORCE DE LA SCIENCE

**ÉVALUATION DES BESOINS DES MUNICIPALITÉS QUÉBÉCOISES EN RÉFECTION
ET CONSTRUCTION D'INFRASTRUCTURES D'EAUX
RAPPORT FINAL - INRS-Eau**

**Rapport rédigé pour le
Ministère des Affaires Municipales du Québec**

par

**Jean-Pierre Villeneuve
Sophie Duchesne
Alain Mailhot
Emmanuelle Musso
Geneviève Pelletier**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, Case postale 7500, SAINTE-FOY (Québec), G1V 4C7**

Projet MAM

Rapport de recherche No R512B

Février 1998

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xiii
1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	I-1

PARTIE 1 - AQUEDUC

1 INTRODUCTION	A-1
1.1 Le contexte	A-1
1.2 L'approche de modélisation et de transposition	A-5
2 REVUE DE LITTÉRATURE	A-7
2.1 La détérioration des conduites d'aqueduc	A-7
2.1.1 La corrosion	A-8
2.1.2 Les forces sur la conduite	A-9
2.1.3 Les facteurs de risque	A-10
2.2 Les modèles prédictifs	A-11
2.2.1 Les modèles de nature déterministe	A-12
2.2.2 Les modèles de type agrégé	A-14
2.2.3 Les modèles de régression	A-15
2.2.4 Les modèles probabilistes	A-17
2.3 La transposition des modèles prédictifs à des municipalités à faible historique	A-21
3 ACQUISITION DE L'INFORMATION DE BASE	A-25
3.1 Concept de tronçon	A-26
3.2 Structure des bases de données	A-28
3.3 Acquisition de l'information de base	A-31
3.4 Concepts de stratification, d'historique tronqué et de remplacement	A-33
3.4.1 Stratification	A-33
3.4.2 Historique tronqué	A-33
3.4.3 Remplacement versus installation	A-34
4 TRAITEMENT DE L'INFORMATION	A-37
4.1 Structuration des fichiers AQUEDUC et BRIS	A-38
4.1.1 Municipalité A	A-38
4.1.2 Municipalité B	A-41
4.1.3 Municipalité C	A-42
4.1.4 Municipalité D	A-43
4.1.5 Municipalité E	A-46
4.2 Analyses statistiques de base	A-46
4.2.1 Municipalité A	A-47
4.2.2 Municipalité B	A-50
4.2.3 Municipalité C	A-52
4.2.4 Municipalité D	A-55

4.2.5	Municipalité E	A-57
4.3	Schémas-résumés et tableaux comparatifs	A-59
4.3.1	Schémas-résumés	A-59
4.3.2	Tableaux comparatifs	A-61
5	DÉVELOPPEMENT ET ADAPTATION DU MODÈLE	A-149
5.1	Objectifs de modélisation	A-149
5.2	Nécessité de développer une approche originale	A-149
5.3	Modèle proposé	A-150
5.3.1	Considérations théoriques	A-151
5.3.2	Description du modèle	A-152
5.3.3	Hypothèses de base du modèle	A-154
6	CALAGE ET APPLICATION AUX MUNICIPALITÉS - TÉMOINS	A-159
6.1	Méthodologie de calage	A-159
6.2	Calage du modèle pour les municipalités-témoins	A-162
6.2.1	Municipalité A	A-163
6.2.2	Municipalité B	A-163
6.2.3	Municipalité C	A-164
6.2.4	Municipalité D	A-164
6.2.5	Municipalité E	A-165
6.3	Prédiction du nombre de bris pour des horizons de 5, 10 et 20 ans	A-165
6.3.1	Scénarios de remplacement et de croissance considérés	A-166
6.3.2	Évaluation du nombre de bris par an pour des horizons de 5, 10 et 20 ans	A-167
7	TRANSPOSITION DU MODÈLE	A-187
7.1	Méthodologie proposée	A-187
7.2	Prédiction du nombre de bris pour des horizons de 5, 10 et 20 ans pour les différentes classes de municipalités identifiées	A-193
8	ESTIMATION DES COÛTS	A-199
9	CONCLUSION	A-205
10	BIBLIOGRAPHIE	A-209

PARTIE 2 - ÉGOUT

1	INTRODUCTION	E-1
1.1	Le contexte	E-1
1.2	La problématique liée à l'évaluation de l'état des conduites d'égout et à leur réhabilitation	E-3
1.2.1	Les défauts structuraux et leurs origines	E-4
1.2.2	Les méthodes d'auscultation	E-5
1.2.2.1	Description générale des principales méthodes d'auscultation	E-5
1.2.2.2	L'auscultation télévisuelle	E-6
1.2.3	La réhabilitation des conduites	E-8

2	REVUE DE LITTÉRATURE	E-11
2.1	Programmes de réhabilitation	E-11
2.2	Modèles de planification de la réhabilitation	E-13
2.3	Choix d'un modèle	E-17
3	ACQUISITION DE L'INFORMATION DE BASE	E-19
3.1	Information à recueillir	E-19
3.2	Choix des municipalités-témoins	E-19
4	TRAITEMENT ET STRUCTURATION DE L'INFORMATION	E-21
4.1	Structuration des fichiers ÉGOUTS des municipalités-témoins	E-21
4.1.1	La municipalité B	E-21
4.1.2	La municipalité A	E-25
4.2	Analyses statistiques de base	E-29
4.2.1	La municipalité B	E-29
4.2.2	La municipalité A	E-33
4.3	Conclusion	E-36
5	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE	E-39
5.1	Principe de modélisation retenu	E-39
5.2	Développement du modèle	E-40
5.2.1	Prise en compte de scénarios de croissance	E-40
5.2.2	Discretisation du temps	E-41
5.2.3	Prise en compte de scénarios de remplacement	E-42
5.2.4	Hypothèse concernant le paramètre λ	E-43
5.3	Conclusion	E-44
6	CALAGE ET APPLICATION AUX MUNICIPALITÉS-TÉMOINS	E-47
6.1	Calage et application à la municipalité B	E-47
6.1.1	Calage du paramètre λ	E-47
6.1.2	Les résultats du modèle	E-50
6.1.3	Influence du matériau	E-52
6.2	Calage et application à la municipalité A	E-53
6.2.1	Calage du paramètre λ	E-53
6.2.2	Résultats du modèle	E-55
6.2.3	Influence du matériau	E-58
6.3	Comparaison avec la ville C	E-59
6.4	Conclusions	E-61
7	TRANSPOSITION DU MODÈLE	E-63
7.1	Méthodologie proposée	E-63
7.1.1	Transposition du modèle aux municipalités ayant répondu au questionnaire de l'INRS-Urbanisation	E-63
7.1.2	Transposition des résultats à l'échelle de la province de Québec	E-65
7.2	Résultats	E-65
7.2.1	Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant le linéaire de réseau d'égout	E-65

7.2.2	Application du modèle	E-68
7.2.3	Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant l'infiltration	E-69
7.2.4	Transposition à l'échelle du Québec	E-72
7.3	Conclusion	E-74
8	SCÉNARIOS DE REMPLACEMENT	E-77
8.1	Scénarios de remplacement simulés	E-78
8.2	Résultats des simulations	E-78
8.2.1	Résultats des simulations pour la ville A	E-79
8.2.2	Résultats des simulations pour la ville C	E-80
8.2.3	Résultats obtenus à l'échelle du Québec	E-82
8.3	Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant les travaux de remplacement des conduites d'égout effectués ces dernières années	E-87
8.3.1	Taux de remplacement annuel moyen	E-88
8.3.2	Taux de remplacement annuel moyen durant le programme TICQ (1994 à 1996)	E-89
8.4	Conclusion	E-91
9	ESTIMATION DES COÛTS	E-93
10	CONCLUSION	E-99
11	BIBLIOGRAPHIE	E-101
CONCLUSION GÉNÉRALE		C-1
ANNEXES		X-1
ANNEXE A1 - Études de cas		X-3
1.1	Ville de New York, N.Y.	X-3
1.2	Cincinnati, Ohio/New Haven, Connecticut	X-6
1.3	Boston, Massachusetts	X-11
1.4	Winnipeg, Manitoba	X-13
1.5	Banlieues de Paris et de Bordeaux et syndicats ruraux du Kronthal et du Kochersberg, France	X-15
ANNEXE E1 -	Caractéristiques des 133 villes retenues	X-19
ANNEXE E2 -	Pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état en 1997 simulé pour les 133 villes retenues	X-25
ANNEXE E3 -	Note d'infiltration donnée aux 133 villes retenues	X-29
ANNEXE E4 -	Évolution du pourcentage du linéaire de réseau en mauvais état dans les 20 ans à venir selon le scénario moyen	X-33
ANNEXE E5 -	Calcul des coûts de remplacement des conduites d'égout	X-43
5.1	Données de la ville A	X-43
5.2	Données de la ville C	X-44
5.3	Données du questionnaire de l'INRS-Urbanisation	X-44

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE 1 - AQUEDUC

Tableau 3.1	Structure et informations contenues dans le fichier AQUEDUC	A-29
Tableau 3.2	Structure et informations contenues dans le fichier BRIS	A-30
Tableau 3.3	Inclusion des numéros civiques dans le fichier AQUEDUC	A-31
Tableau 3.4	Caractéristiques générales des municipalités-témoins	A-33
Tableau 4.1	Caractéristiques générales des cinq municipalités-témoins	A-65
Tableau 4.2	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par intervalles de diamètres	A-66
Tableau 4.3	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par intervalles de longueurs	A-67
Tableau 4.4	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par périodes d'urbanisation	A-68
Tableau 4.5	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type de matériau	A-69
Tableau 4.6	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type d'occupation du sol	A-70
Tableau 4.7	Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type de sol	A-71
Tableau 5.1	Type de distribution et paramètres selon l'ordre du bris	A-152
Tableau 6.1	Paramètres de calage obtenus pour les municipalités-témoins	A-162
Tableau 6.2	Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 5 ans	A-168
Tableau 6.3	Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 10 ans	A-169
Tableau 6.4	Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 20 ans	A-170
Tableau 6.5	Nombre de bris simulé pour l'année 1996 ayant servi au calcul des pourcentages d'augmentation apparaissant aux Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4	A-171
Tableau 6.6	Pourcentages de linéaires qu'il est nécessaire de remplacer annuellement pour que le nombre de bris après 20 ans soit comparable au nombre de bris de 1996 (scénario (4))	A-171
Tableau 7.1	Municipalités retenues pour la présente étude	A-190
Tableau 7.2	Caractéristiques des différentes classes de municipalités	A-194
Tableau 7.3	Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 5 ans	A-195
Tableau 7.4	Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 10 ans	A-195
Tableau 7.5	Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 20 ans	A-196

Tableau 7.6	Pourcentage de linéaire à remplacer annuellement afin que le nombre de bris sur un horizon de 20 ans se maintienne au niveau actuel	A-196
Tableau 7.7	Pourcentage d'augmentation moyen du nombre de bris pour l'ensemble des municipalités à l'étude en fonction des scénarios de remplacement	A-197
Tableau 8.1	Pourcentage des réseaux dans quatre catégories de diamètres pour les cinq municipalités-témoins	A-199
Tableau 8.2	Coût unitaire de remplacement pour les diamètres 150, 200, 250 et 300 mm (estimé pour la ville C)	A-200
Tableau 8.3	Coûts unitaires de remplacement relevés dans différentes études	A-201
Tableau 8.4	Estimation des coûts annuels de remplacement à l'échelle du Québec pour les différents scénarios de remplacement considérés	A-202
Tableau 9.1	Estimation des coûts annuels de remplacement à l'échelle du Québec pour les différents scénarios de remplacement considérés	A-207

PARTIE 2 - ÉGOUT

Tableau 1.1	Principaux défauts structuraux	E-5
Tableau 1.2	Défauts structuraux détectables par l'inspection télévisuelle	E-7
Tableau 4.1	Structuration de la base de données "ÉGOUT" de la ville B	E-25
Tableau 4.2	Structuration de la base de données "ÉGOUT" de la ville A	E-27
Tableau 4.3	Influence de la note limite retenue entre défauts mineurs et défauts majeurs	E-28
Tableau 4.4	Analyse de la représentativité de la ville B	E-32
Tableau 4.5	Analyse de la représentativité de la ville A	E-36
Tableau 6.1	Données concernant l'état du réseau de la ville B	E-47
Tableau 6.2	Caractéristiques du réseau de la ville B	E-50
Tableau 6.3	Données concernant l'état du réseau de la ville A	E-53
Tableau 6.4	Caractéristiques du réseau de la ville A	E-55
Tableau 6.5	Données concernant l'état du réseau ausculté de la ville C	E-60
Tableau 6.6	Hypothèses faites sur les âges des conduites auscultées de la ville C	E-60
Tableau 7.1	Exemples de villes marginales quant au linéaire de réseau d'égout par habitant	E-67
Tableau 7.2	Définition de quatre classes de villes	E-68
Tableau 7.3	Résultats des simulations pour les 4 classes de villes définies	E-69
Tableau 7.4	Nombre de villes recensées pour chaque note d'infiltration	E-70
Tableau 7.5	Synthèse des résultats concernant l'infiltration	E-72
Tableau 7.6	Transposition des résultats à l'échelle de la province de Québec	E-74
Tableau 8.1	Différents scénarios de remplacement simulés pour la ville A	E-79
Tableau 8.2	Caractéristiques du réseau de la ville C	E-81
Tableau 8.3	Différents scénarios de remplacement simulés pour la ville C	E-81
Tableau 8.4	Différents scénarios de remplacement simulés pour les 133 villes retenues	E-83
Tableau 8.5	Pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état pour les 133 villes retenues selon les scénarios de vieillissement et de remplacement simulés	E-84
Tableau 8.6	Contexte des travaux de remplacement de conduites d'égout pendant le programme TICQ pour quelques villes du Québec	E-91
Tableau 8.7	Synthèse des résultats obtenus à l'échelle de la province de Québec (excluant Montréal)	E-92
Tableau 9.1	Coûts du remplacement d'un mètre linéaire de réseau d'égout selon son diamètre	E-94

Tableau 9.2	Estimation d'un coût moyen par mètre linéaire d'une intervention de remplacement de réseau d'égout	E-95
Tableau 9.3	Estimation des besoins en capitaux pour l'ensemble de la province (en excluant Montréal)	E-96

ANNEXES

Tableau X1.1	Covariables z , coefficients b , écart-types et ratio coefficient/écart-type pour le modèle de Cox des villes A et B	X-9
Tableau X1.2	Covariables z , coefficients b et écart-types pour le modèle des risques proportionnels; $h_0(t)$ estimée par le modèle de Cox	X-16
Tableau X1.3	Covariables z , coefficients b et écart-types pour le modèle des risques proportionnels; $h_0(t)$ estimée par le modèle de Weibull	X-17
Tableau X1.4	Paramètres du modèle de Weibull pour modéliser $h_0(t)$	X-18
Tableau X5.1	Calcul du coût moyen de remplacement pour la ville A	X-43
Tableau X5.2	Coût de remplacement de l'égout pour la ville C	X-44
Tableau X5.3	Calcul du coût moyen de remplacement à partir de la répartition moyenne du réseau québécois par diamètre	X-44

LISTE DES FIGURES

PARTIE 1 - AQUEDUC

Figure 2.1	Facteurs influençant la fragilisation d'une conduite [Adapté de O'Day <i>et al.</i> 1987]	A-9
Figure 2.2	Diagramme des forces agissant sur une conduite [Adapté de Moruzzi 1984] ...	A-10
Figure 3.1	Concept de tronçon	A-27
Figure 3.2	Exemple de stratification pour un tronçon fictif	A-33
Figure 3.3	Exemple d'historique tronqué pour un tronçon fictif	A-34
Figure 3.4	Exemple de remplacement de conduite pour un tronçon fictif	A-35
Figure 4.1	Croissance de la municipalité A en terme de tronçons	A-73
Figure 4.2	Historique de bris pour la municipalité A	A-73
Figure 4.3	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité A	A-75
Figure 4.4	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité A	A-75
Figure 4.5	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité A	A-77
Figure 4.6	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité A	A-77
Figure 4.7	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité A	A-79
Figure 4.8	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité A	A-81
Figure 4.9	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité A	A-81
Figure 4.10	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité A	A-83
Figure 4.11	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité A	A-83
Figure 4.12	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité A	A-85
Figure 4.13	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité A	A-85
Figure 4.14	Nombre et pourcentage de tronçons par type de rue pour la municipalité A	A-87
Figure 4.15	Taux de bris par type de rue pour la municipalité A	A-87
Figure 4.16	Croissance de la municipalité B en terme de tronçons	A-89
Figure 4.17	Historique de bris pour la municipalité B	A-89
Figure 4.18	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité B	A-91
Figure 4.19	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité B	A-91
Figure 4.20	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité B	A-93
Figure 4.21	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité B	A-93
Figure 4.22	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité B	A-95
Figure 4.23	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité B	A-95
Figure 4.24	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité B	A-97
Figure 4.25	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité B	A-97

Figure 4.26	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité B	A-99
Figure 4.27	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité B	A-99
Figure 4.28	Croissance de la municipalité C en terme de tronçons	A-101
Figure 4.29	Historique de bris pour la municipalité C	A-101
Figure 4.30	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité C	A-103
Figure 4.31	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité C	A-103
Figure 4.32	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité C	A-105
Figure 4.33	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité C	A-105
Figure 4.34	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité C	A-107
Figure 4.35	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité C	A-109
Figure 4.36	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité C	A-109
Figure 4.37	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité C	A-111
Figure 4.38	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité C	A-111
Figure 4.39	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité C	A-113
Figure 4.40	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité C	A-113
Figure 4.41	Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité C ...	A-115
Figure 4.42	Taux de bris par type de sol pour la municipalité C	A-115
Figure 4.43	Croissance de la municipalité D en terme de tronçons	A-117
Figure 4.44	Historique de bris pour la municipalité D	A-117
Figure 4.45	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité D	A-119
Figure 4.46	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité D	A-119
Figure 4.47	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité D	A-121
Figure 4.48	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité D	A-121
Figure 4.49	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité D	A-123
Figure 4.50	Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité D ...	A-123
Figure 4.51	Croissance de la municipalité E en terme de tronçons	A-125
Figure 4.52	Historique de bris pour la municipalité E	A-125
Figure 4.53	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité E	A-127
Figure 4.54	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité E	A-127
Figure 4.55	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité E	A-129
Figure 4.56	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité E	A-129
Figure 4.57	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité E	A-131
Figure 4.58	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité E	A-131

Figure 4.59	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité E	A-133
Figure 4.60	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité E	A-133
Figure 4.61	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité E	A-135
Figure 4.62	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité E	A-135
Figure 4.63	Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité E	A-137
Figure 4.64	Taux de bris par type de sol pour la municipalité E	A-137
Figure 4.65	Schéma-résumé pour la municipalité A	A-139
Figure 4.66	Schéma-résumé pour la municipalité B	A-141
Figure 4.67	Schéma-résumé pour la municipalité C	A-143
Figure 4.68	Schéma-résumé pour la municipalité D	A-145
Figure 4.69	Schéma-résumé pour la municipalité E	A-147
Figure 5.1	Modélisation de l'évolution des bris sur un réseau d'aqueduc	A-155
Figure 5.2	Densité de probabilité $f(t)$, fonction de risque $h(t)$ et fonction de survie $F(t)$...	A-157
Figure 6.1	Probabilité de bris en fonction du temps pour la municipalité A	A-173
Figure 6.2	Fonction de survie associée au premier bris pour les municipalités-témoins ...	A-175
Figure 6.3	Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité A	A-177
Figure 6.4	Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité B	A-179
Figure 6.5	Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité C	A-181
Figure 6.6	Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité D	A-183
Figure 6.7	Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité E	A-185
Figure 8.1	Linéaire de réseau d'aqueduc en fonction de la population pour les municipalités de l'étude	A-203

PARTIE 2 - ÉGOUT

Figure 2.1	Principe de modélisation retenu dans l'étude de Zimmerman et Martin [1993] ..	E-16
Figure 4.1	Exemple d'informations sur les défauts disponibles sur un tronçon ausculté ...	E-27
Figure 4.2	Analyse statistique de l'âge du réseau de la ville B	E-30
Figure 4.3	Analyse statistique des diamètres du réseau de la ville B	E-30
Figure 4.4	Analyse statistique du matériau du réseau de la ville B	E-31
Figure 4.5	Analyse statistique du type de réseau de la ville B	E-31
Figure 4.6	Analyse statistique de l'âge du réseau ausculté de la ville A	E-33
Figure 4.7	Analyse statistique des diamètres du réseau ausculté de la ville A	E-34
Figure 4.8	Analyse statistique du matériau du réseau ausculté de la ville A	E-34
Figure 4.9	Analyse statistique du type de réseau ausculté de la ville A	E-35
Figure 5.1	Principe de modélisation	E-40
Figure 5.2	Prise en compte de scénarios de croissance dans le modèle	E-41
Figure 5.3	Prise en compte de scénarios de remplacement	E-43
Figure 5.4	Conséquences de l'hypothèse $\lambda(t) = \text{constante}$	E-44
Figure 6.1	Relation du linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge pour la ville B	E-48
Figure 6.2	Hypothèse de vieillissement du réseau d'égout de la ville B	E-50
Figure 6.3	Résultats donnés par le modèle pour la ville B	E-51
Figure 6.4	Influence du matériau sur la relation du linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge pour la ville B	E-52

Figure 6.5	Comparaison des relations entre le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état et l'âge des tronçons obtenues pour les villes A et B	E-54
Figure 6.6	Amélioration du calage de λ dans le cas de la ville A	E-56
Figure 6.7	Résultats obtenus par modélisation pour la ville A	E-56
Figure 6.8	Influence du matériau sur la relation "linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge" dans le cas de la ville A	E-58
Figure 6.9	Comparaison des relations "pourcentage de linéaire en mauvais état en fonction de l'âge des conduites" pour les villes A, B et C	E-61
Figure 7.1	Relation entre le nombre d'habitants raccordés (considérant un taux de raccordement de 85 %) et le linéaire de réseau d'égout pour 133 villes du Québec	E-73
Figure 8.1	Résultats obtenus pour la ville A selon différents scénarios de remplacement ($\lambda = 0,0077 \text{ an}^{-1}$)	E-79
Figure 8.2	Résultats obtenus pour la ville C selon différents scénarios de remplacement ($\lambda = 0,0037 \text{ an}^{-1}$)	E-82
Figure 8.3	Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario "Borne inférieure" ($\lambda = 0,0037 \text{ an}^{-1}$)	E-85
Figure 8.4	Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario moyen ($\lambda = 0,0090 \text{ an}^{-1}$)	E-85
Figure 8.5	Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario "Borne supérieure" ($\lambda = 0,0140 \text{ an}^{-1}$)	E-86
Figure 8.6	Taux de remplacement annuel moyen	E-88
Figure 8.7	Taux de remplacement annuel moyen pendant le programme TICQ	E-90

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En 1986, la Fédération Canadienne de Municipalités (FCM) publiait les résultats d'une enquête sur **l'état des infrastructures urbaines** dans plusieurs municipalités canadiennes. Les sommes requises pour remettre en état l'ensemble des infrastructures urbaines existantes étaient estimées à 18 milliards de dollars [Desbiens 1997]. En 1996, les résultats obtenus lors d'une nouvelle enquête menée conjointement par l'Université McGill et la FCM estimaient que les besoins étaient maintenant de l'ordre de 44 milliards de dollars pour l'ensemble du Canada [Siddiqui et Mirza 1996]. Que ce soit les routes, les trottoirs, les immeubles publics, les ponts, les infrastructures d'eaux ou autres, les infrastructures urbaines vieillissent et leur état semble se détériorer de plus en plus rapidement. Généralement, les gestionnaires municipaux attribuent cette détérioration rapide au manque de moyens financiers pour établir de bons programmes de maintenance préventive. De plus, il est possible que nous assistions à la fin de la durée de vie utile d'infrastructures construites à la suite d'une période d'urbanisation rapide (*e.g.* après la Seconde Guerre Mondiale).

Souvent, la gestion des **infrastructures d'eaux** se limite à répondre aux situations de crise lorsque des citoyens mécontents rapportent l'inondation de leur rue à cause d'un bris d'une conduite d'aqueduc, l'inondation de leur sous-sol à cause d'un refoulement d'égout, ou même l'affaissement complet de la chaussée. Les dommages causés aux propriétés, les poursuites judiciaires qui s'en suivent ainsi que les interventions nécessaires entraînent des coûts énormes pour les municipalités déjà aux prises avec des problèmes de financement importants. La situation apparaît alarmante en raison du vieillissement des infrastructures, d'où l'importance d'établir des approches méthodologiques efficaces pour évaluer l'état présent des infrastructures urbaines et prédire leur état futur.

L'étude menée à l'INRS-Eau et à l'INRS-Urbanisation et mandatée par le Ministère des Affaires Municipales (MAM) a pour objectif d'évaluer les besoins en travaux de réfection et de construction pour les infrastructures d'eaux des municipalités du Québec et d'estimer les besoins

correspondants en capitaux à court, moyen et long termes (5, 10 et 20 ans). Les travaux menés à l'INRS-Eau se sont penchés plus particulièrement sur l'état structural des infrastructures souterraines en eau, c'est-à-dire les conduites des réseaux d'aqueduc et d'égout. Afin de répondre à la première partie du mandat (les besoins en travaux de réfection et de construction), l'INRS-Eau a développé, pour les conduites d'aqueduc, un modèle permettant de prédire l'évolution du nombre de bris annuel et d'estimer l'impact de divers scénarios de remplacement et, pour les conduites d'égout, un modèle de prédiction des longueurs de conduites d'égout à remplacer. Pour répondre à la seconde partie du mandat (les besoins correspondants en capitaux), nous avons couplé à ces modèles de prédiction un modèle simple de coûts. Ainsi, il est possible de comparer les besoins en capitaux ainsi estimés avec ceux contenus dans le rapport d'INRS-Urbanisation déposé en juillet 1997 auprès du MAM.

Ce rapport final INRS-Eau est divisé en deux parties : l'AQUEDUC et l'ÉGOUT. Bien qu'au départ la problématique semble similaire, la nature de l'indicateur de l'état structural diffère ainsi que la quantité et la qualité des données disponibles dans les municipalités québécoises. La première partie AQUEDUC présente en détail les efforts de modélisation de l'état structural des conduites des réseaux d'aqueduc. C'est plus spécifiquement le **nombre annuel de bris** qui est simulé parce que les bris sont l'indicateur le plus important disponible de l'état structural présent et futur des conduites d'aqueduc. L'indicateur le plus important disponible de l'état structural des conduites d'égout est la présence de **défauts majeurs observés visuellement ou télévisuellement**. La seconde partie ÉGOUT présente les efforts de modélisation en ce sens.

Puisque seulement quelques municipalités (5 pour l'aqueduc et 2 pour l'égout) possédaient les données nécessaires pour le développement d'un modèle, il a fallu prévoir un mécanisme de transposition du modèle à un plus grand nombre de municipalités possédant un minimum d'information afin de répondre au mandat. Cette information a été recueillie par les questionnaires d'INRS-Urbanisation. Il est donc possible de transposer le modèle à une centaine de municipalités. En ce qui a trait aux municipalités n'ayant pas fourni l'information nécessaire au modèle, une

généralisation des résultats obtenus pour la centaine de municipalités à l'ensemble du Québec est effectuée.

Chacune des deux parties de ce rapport est divisée en chapitres reprenant les points importants du calendrier de réalisation, c'est-à-dire :

Chapitre 1 - Introduction

Chapitre 2 - Revue de la littérature

Chapitre 3 - Acquisition de l'information de base

Chapitre 4 - Traitement de l'information

Chapitre 5 - Développement et adaptation du modèle

Chapitre 6 - Calage et application aux municipalités-témoins

Chapitre 7 - Transposition du modèle

Chapitre 8 - Scénarios de remplacement (ce chapitre est inclus dans le chapitre 7 pour la partie portant sur l'aqueduc)

Chapitre 9 - Estimation des coûts

Chapitre 10 - Conclusion

Chapitre 11 - Bibliographie

On retrouve à la suite de la partie ÉGOUT une **conclusion générale** qui reprend les estimations de coûts présentées dans chaque partie du rapport et une estimation combinée des coûts selon divers scénarios de remplacement de conduites. À la toute fin se retrouvent les annexes de chacune des parties du rapport.

AQUEDUC

1 INTRODUCTION

1.1 Le contexte

La modélisation des probabilités de bris des conduites d'aqueduc permet d'estimer la durée de vie utile pour des groupes de conduites de caractéristiques homogènes, afin d'assister le gestionnaire dans ses décisions de réparation/remplacement et ainsi améliorer la gestion des réseaux d'aqueduc. Bien que toutes les composantes des réseaux vieillissent et se détériorent, les inspections et interventions sur les équipements souterrains (*e.g.* conduites, joints, vannes, entrées de service, réservoirs), difficilement accessibles et hors de la vue, sont techniquement plus exigeantes et plus coûteuses. Les conduites sont de loin la plus importante composante des équipements souterrains. Elles représentent le plus gros investissement initial lors de la mise en place d'un réseau d'aqueduc.

Le vieillissement des conduites se traduit par une fragilisation de la structure attribuable à l'attaque de la corrosion sur les parois internes et/ou externes. La corrosion modifie l'épaisseur des parois et les rend ainsi vulnérables aux bris mécaniques résultant de la somme des forces agissant sur elles. Ainsi, un indicateur important de leur intégrité structurale est le nombre de bris qu'elles subissent sur une longueur donnée (*e.g.* par 100 m) pour une période de temps donnée (*e.g.* pour un an). Plusieurs facteurs influencent directement et indirectement le taux de corrosion. Ces facteurs de risque peuvent dépendre des caractéristiques des conduites (*e.g.* diamètre, matériau, année d'installation), de leur environnement (*e.g.* type de sol, occupation du sol) et des conditions d'opération du réseau (*e.g.* coup de bélier, pression). Les facteurs de risque significatifs peuvent être mis en lumière par différentes méthodes, dont des analyses statistiques ou encore simplement par des graphiques du nombre de bris versus chaque facteur.

La modélisation du nombre de bris annuel que subit un réseau permet d'aider aux décisions d'intervention sur le réseau. En effet, lorsqu'un bris est détecté, il doit y avoir intervention sur le réseau, *i.e.* soit réparer le bris ou remplacer la conduite. Le remplacement d'une conduite est plus coûteux mais permet de réduire le nombre de bris pour les années subséquentes. Un modèle

permet d'estimer la probabilité annuelle de bris dans des horizons futurs. Le développement de cet outil mathématique est certes moins coûteux que l'auscultation physique de tout un réseau et permet de mettre à profit et d'extraire le maximum d'information des données actuellement disponibles.

La modélisation des bris de conduites nécessite une bonne connaissance physique du réseau d'aqueduc et un long historique de bris. Plusieurs types de modélisation sont répertoriés dans la littérature (modèles déterministes, de type agrégé, de régression et probabilistes). Chaque type répond à une problématique différente et nécessite une quantité et une qualité de données différentes selon l'unité spatiale de modélisation utilisée (*i.e.* caractéristiques générales de la municipalité ou conduite par conduite). Lorsque la problématique est définie et qu'il est possible d'obtenir **des données** sur les caractéristiques physiques des conduites et de leur environnement, sur les conditions d'opération du réseau et sur l'historique des bris des conduites, alors un modèle mathématique prédictif du nombre de bris pour différents groupes de conduites homogènes peut être développé.

Une revue de littérature a permis d'identifier **les facteurs de risque les plus couramment utilisés** dans la modélisation des bris des conduites d'aqueduc. L'étude menée à l'INRS-Urbanisation (dans le cadre du même mandat) et des entretiens avec des gestionnaires de réseau ont permis d'identifier **les données disponibles dans les municipalités québécoises** les mieux structurées au niveau informatique. Ces données forment évidemment un sous-ensemble de tous les facteurs de risque pouvant être inclus dans la modélisation. Ces données sont : le diamètre, la longueur, l'année d'installation (ou la période d'installation), le type de matériau (fonte grise, fonte ductile, PVC ou amiante), le type de sol (argile, sable, limon ou roc) et l'occupation du sol (résidentiel, commercial ou industriel).

Le choix de modélisation et la qualité des résultats dépendent donc fortement de la question que l'on pose et de la quantité et de la qualité de l'information disponible dans les municipalités à

l'étude. Cependant, il est clair que la très grande majorité des municipalités québécoises ne possèdent pas un historique de bris sous support informatique remontant à plus d'une dizaine d'années. Après avoir communiqué avec une dizaine de municipalités qui, selon le questionnaire d'INRS-Urbanisation, sont bien pourvues en données sous support informatique, cinq municipalités dites "municipalités-témoins", possédaient les données nécessaires à l'étude et étaient intéressées à participer en fournissant les données et leur expertise pour les efforts de modélisation.

Puisqu'il est difficile de déterminer *a priori* si les données obtenues dans ces municipalités sont de qualité et quantité suffisante pour développer un certain type de modélisation, la stratégie de modélisation proposée dans le rapport préliminaire du 7 février 1997 reposait sur une approche de modélisation en "cascade". Premièrement, des statistiques de base sont calculées (*e.g.* nombre de bris par diamètre, par intervalle d'années d'installation, par type de matériau, etc.) afin de se familiariser avec les données et pour développer un modèle de type agrégé. Deuxièmement, une analyse de covariance et des régressions sont faites afin d'identifier les facteurs de risque indépendants et significatifs et pour développer un modèle de régression. Enfin, une analyse de survie (modèle des risques proportionnels de Cox) est utilisée pour déterminer les probabilités de bris de différents groupes de conduites aux caractéristiques homogènes. Cependant, suite aux premiers résultats obtenus par cette stratégie de modélisation, nous avons décidé de développer une nouvelle approche, basée à la fois sur le principe des modèles agrégés (dépendance sur le temps) et de l'analyse de survie (probabilités de bris différentes dans le temps). Quant à une analyse de type régression, les très courts historiques de bris à notre disposition ne nous ont pas permis d'obtenir de résultats probants. Le modèle développé est mieux adapté à la problématique et au type de données disponibles dans une municipalité québécoise, pour prédire l'évolution du nombre de bris annuel sur des horizons de 5, 10 et 20 ans.

En plus de répondre au mandat, les résultats de modélisation peuvent être utilisés pour aider à la programmation des interventions de réparation/remplacement sur un réseau. De plus, si un SIG

(Système d'Information Géographique) est utilisé pour gérer les données sur le réseau d'aqueduc et l'historique des bris, alors il est possible de prioriser les zones d'intervention puisque celles-ci peuvent être facilement identifiées. Ainsi, le modèle, comme outil de diagnostic, permet l'amélioration de la gestion de l'entretien et du remplacement des conduites de distribution d'eau potable. De plus, en prenant la probabilité de bris des conduites comme une mesure de fiabilité du réseau, le modèle peut servir d'outil de design car les résultats de la modélisation peuvent aider à faire un meilleur choix de diamètres et de matériaux lors de la conception de nouvelles parties d'un réseau.

Bien que les données nécessaires à la modélisation soient souvent de sources variées et non-informatisées (e.g. plan du réseau, fichiers AUTOCAD^{MD}, carte de sols, plan d'urbanisation, fiches de réparation), les ressources consacrées à ce travail exigeant permettront aux gestionnaires d'avoir une connaissance beaucoup plus précise de leur réseau et même de l'améliorer en se penchant sur les problèmes d'information conflictuelle. De plus, les ressources consacrées à la structuration des fichiers de données pour la modélisation peuvent être maximisées en établissant un programme de collecte de données systématique qui permettrait à une municipalité d'utiliser ses données dans plusieurs outils de gestion informatisés. En effet, les données sur le réseau d'aqueduc peuvent aussi servir à un modèle hydraulique et à un modèle de programmation du rinçage. Des données systématiques sur les coûts permettent de développer un modèle économique pour la conception et les opérations du réseau. Certaines données techniques permettent de développer des modèles d'aide à la décision, comme au choix de matériaux de construction, méthodes de réparation, etc.. Le but recherché est de gérer de façon efficiente le réseau d'aqueduc, *i.e.* améliorer la qualité du service et réduire les coûts.

1.2 L'approche de modélisation et de transposition

Le phénomène à modéliser est la détérioration des conduites d'un réseau d'aqueduc. L'indicateur principal de cette détérioration est le nombre de bris annuel sur le réseau. En identifiant les types de modélisation dans la littérature, il est possible de faire des choix quant au type de modèles le mieux adapté à la problématique et aux données disponibles dans les municipalités québécoises. Le modèle permet d'estimer et de prédire la tendance générale du nombre de bris annuel dans une municipalité. La connaissance de cette tendance permet d'aider aux décisions d'intervention sur le réseau (réparation/remplacement) dépendant des contraintes auxquelles fait face le gestionnaire de réseau (personnel, équipements, budget, etc.). Il est donc important que le modèle développé puisse prendre en compte différentes stratégies de remplacement. Une stratégie de remplacement s'exprime en pourcentage de réseau à remplacer par année sur une période de x années (*e.g.* 1.5% du linéaire de réseau sur 20 ans). L'efficacité des stratégies de remplacement est estimée en comparant leur impact sur le nombre de bris annuel dans des horizons futurs, tout en laissant au gestionnaire le pouvoir de prendre ses décisions par rapport aux contraintes de gestion. En effet, c'est aux gestionnaires de réseau et non aux modélisateurs de décider du nombre de bris "acceptable" dans leur municipalité. Aux décisions de réparation/remplacement, il est possible d'associer un modèle économique simple qui permet d'estimer les coûts. Ainsi, la démarche de modélisation permet d'estimer tant les besoins en travaux que les coûts correspondants sur 5, 10 et 20 ans pour les municipalités-témoins sélectionnées pour l'étude.

Le mandat nécessite l'estimation des besoins en travaux et des coûts correspondants à l'échelle de la province du Québec. Le modèle développé pour les cinq municipalités-témoins doit donc être transposable aux municipalités à faible historique de bris. Par contre, pour transposer le modèle, il faut connaître les caractéristiques physiques des municipalités (*e.g.* linéaire de réseau, type de matériau, années d'installation). Des données grossières sont disponibles pour environ 110 municipalités. Ces données proviennent des réponses aux questionnaires envoyés par INRS-Urbanisation dans le cadre du même mandat avec le Ministère des Affaires Municipales. Le modèle

a été développé en tenant compte du fait qu'il devait être transposé à partir de ces données. Pour ce qui est des municipalités qui n'ont pas répondu aux questionnaires et pour répondre au mandat, il faut pouvoir étendre les résultats de modélisation à toute la province en se basant sur le linéaire de réseau et la population desservie.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Une revue de littérature a été faite afin de connaître l'état de la connaissance sur la détérioration et la modélisation des bris de conduites. Trois aspects de la détérioration (Section 2.1) sont présentés : la corrosion, les forces sur les conduites et les facteurs de risque. Deux aspects de la modélisation sont abordés : les modèles prédictifs (Section 2.2) et le problème de transposition des modèles prédictifs aux municipalités à faible historique (Section 2.3). Quelques études de cas sont présentées brièvement à l'Annexe A1.

2.1 La détérioration des conduites d'aqueduc

Bien que la détérioration des conduites d'aqueduc résulte principalement de l'effet de la corrosion interne et/ou externe sur les parois des conduites, plusieurs autres phénomènes entrent en ligne de compte, tels l'érosion par l'eau et les matières en suspension, les imperfections des matériaux, les défauts attribuables aux techniques de manufacture et aux techniques de pose, etc.. On peut croire que l'occurrence de bris à une date rapprochée de la date de pose est plutôt attribuable à une mauvaise qualité d'installation alors que les bris plus tardifs sont attribuables à la corrosion. Le taux de corrosion dépend de plusieurs facteurs liés aux caractéristiques des conduites et de leur environnement. La Figure 2.1 montre les différents facteurs agissant sur la condition structurale d'une conduite.

Les bris, une réduction de la capacité hydraulique et une détérioration de la qualité de l'eau sont trois des principales conséquences de la détérioration des conduites d'aqueduc. Les bris se produisent lorsque la somme des forces exercées sur une conduite est supérieure à la résistance du matériau. Une erreur de conception (*e.g.* mauvaise estimation des charges menant au choix d'un matériau de résistance inadéquate), une mauvaise installation (*e.g.* accroissement des charges suite aux travaux) ou, plus fréquemment, la fragilisation de la conduite attribuable à la corrosion sont principalement responsables des bris. Les bris de conduites conduisent à des arrêts de service, des pertes de revenus attribuables aux pertes d'eau, à la baisse de la capacité de lutte contre les

incendies, à des dommages possibles aux propriétés, à des dangers de contamination de l'eau, à des coûts élevés des interventions (réparation/remplacement), etc..

La réduction de la capacité hydraulique est attribuable à l'entartrage des conduites par les produits de la rouille et de la corrosion et/ou par les dépôts calcaires. La réduction de l'aire d'écoulement et l'augmentation du coefficient de rugosité engendrent de plus grandes pertes de charges qui nécessitent de plus grands efforts de pompage et donc une augmentation des coûts d'énergie associés au pompage. De plus, la réduction de débit affecte la capacité de lutte contre les incendies et augmente la probabilité de prolifération bactérienne. La détérioration de la qualité de l'eau est attribuable autant à la présence de produits de la rouille et de la corrosion que de sites favorables à la prolifération de bactéries. Lorsque les qualités esthétiques de l'eau sont affectées (couleur, odeur, texture), les plaintes des consommateurs se multiplient et la confiance aux gestionnaires de réseau diminue.

2.1.1 La corrosion

La corrosion est définie comme la détérioration d'une substance ou de ses propriétés suite à une réaction avec son environnement. Pour une conduite d'aqueduc, la substance est le matériau de la conduite et son environnement est l'eau. Toutes les eaux sont corrosives jusqu'à un certain point. La corrosivité dépend des propriétés physiques et chimiques de l'eau mais aussi de la nature du matériau avec laquelle elle entre en contact. La corrosion se développe à partir d'actions physiques (*e.g.* l'érosion attribuable à des vitesses d'écoulement trop élevées) et chimiques (*e.g.* l'oxydation et la rouille) entre le matériau de la conduite et l'eau. La croissance d'organismes sur les parois d'une conduite favorise la corrosion en formant un endroit favorable aux réactions physiques et chimiques [Schock 1990].

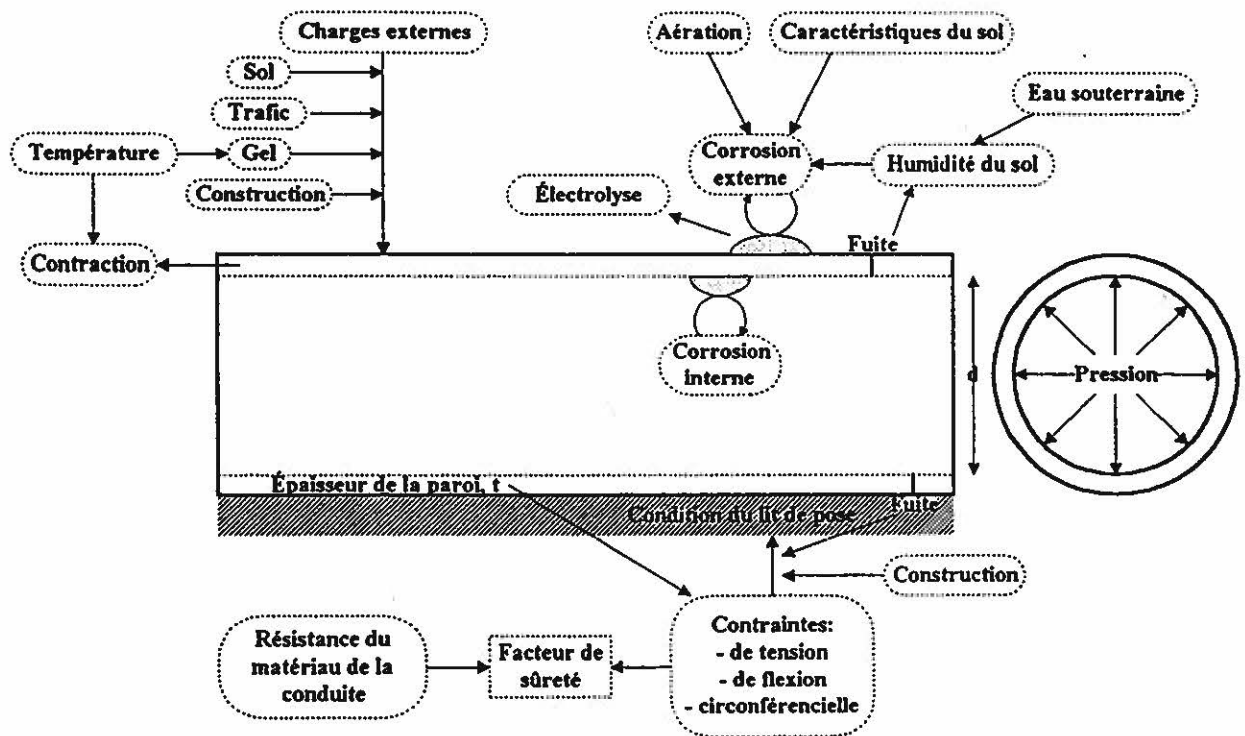


Figure 2.1 - Facteurs influençant la fragilisation d'une conduite [Adapté de O'Day *et al.* 1987]

Les sels minéraux se dissolvent dans l'eau sous forme d'anions et de cations et sont responsables de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. L'eau pure a une conductivité électrique très faible mais lorsque des sels minéraux s'y dissolvent, la conductivité augmente jusqu'à permettre à une cellule électrochimique de se former. Une cellule électrochimique est constituée d'une anode, d'une cathode, d'un lien entre les deux pour le transport des électrons et d'une solution d'électrolytes qui permettra aux ions de se déplacer de l'anode (oxydation et dissolution du métal) à la cathode (tuberculisation). La différence de potentiel entre l'anode et la cathode existe à cause de la non-homogénéité des métaux [Schock 1990].

2.1.2 Les forces sur la conduite

La Figure 2.2 montre le diagramme des forces agissant sur une conduite. Ces forces sont le moment de flexion (M_f), le moment de torsion (M_t), le cisaillement (T), la traction axiale (A), la compression axiale (C), la pression interne (P_i) et la pression externe (P_e). Plusieurs phénomènes

font varier ces forces : un mouvement violent du sol (M_f , M_t , T , A , C , P_c), un mouvement lent du sol (M_f , T , A), une transmission directe excessive de charges extérieures (M , T , P), des températures peu élevées (P_t , A), des coups de bélier (P_c , P_t , A) et des travaux de voirie (M_f , M_t , T , A , P_c) [Eisenbeis 1994]. Lorsque la résultante de ces forces est supérieure à la résistance du matériau, il y a fissure ou bris. Les bris les plus fréquents sont les bris circonférenciels sur les conduites de petits diamètres et les bris longitudinaux sur les plus grands diamètres. Les trous attribuables à la corrosion sont plus fréquents sur les grands diamètres [Clark *et al.* 1988]. L'hiver induit un stress supplémentaire sur les conduites car, dans les sols assez perméables, la pénétration du gel est plus importante et se traduit par de plus grands mouvements du sol et une meilleure transmission de la charge [Walski et Pelliccia 1982].

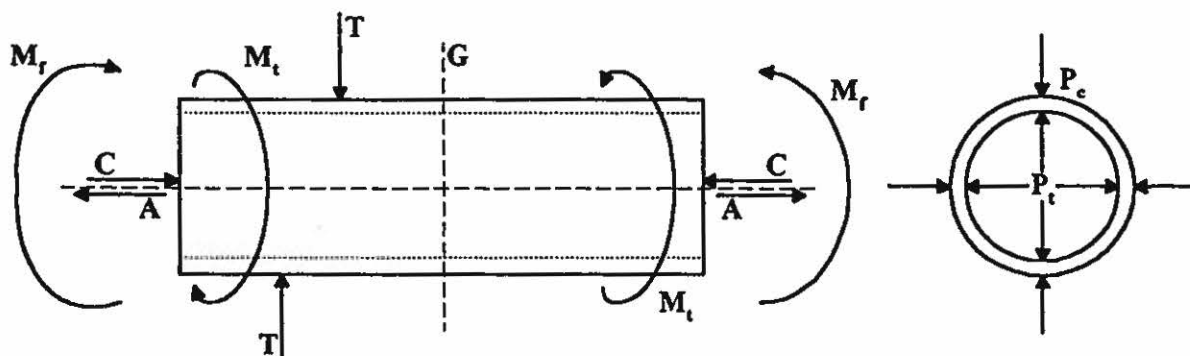


Figure 2.2 - Diagramme des forces agissant sur une conduite [Adapté de Moruzzi 1984]

2.1.3 Les facteurs de risque

Les facteurs de risque sont les facteurs pouvant être estimés directement et/ou indirectement de façon quantitative et/ou qualitative et ayant une influence sur la probabilité d'apparition de bris de conduites d'aqueduc. Les **caractéristiques des conduites** les plus souvent citées dans la littérature comme facteurs de risque sont : **le matériau, le diamètre, la longueur et l'âge**. Les **caractéristiques environnementales** les plus souvent citées sont : **le type de sol et l'occupation du sol**. Certaines caractéristiques liées à **l'opération du réseau d'aqueduc** peuvent aussi avoir une influence sur la probabilité de bris, telles : les variations des conditions d'opération, les coups de béliers, les propriétés de l'eau et la température de l'eau. Par contre, ces facteurs sont difficiles

à quantifier et sont donc difficile à intégrer dans un modèle.

En fait, la plupart des facteurs de risque sont des facteurs factices, c'est-à-dire qu'ils englobent plusieurs propriétés qui pourraient être prises individuellement comme facteurs de risque. Par exemple, le type de matériau est un facteur factice pour des propriétés telles sa nature, sa résistance, sa corrosivité, etc.. Le problème d'identification des facteurs de risque est compliqué par le fait qu'il faut choisir la propriété ou la variable factice qui permettra de mettre en lumière une relation avec le taux de bris. Plusieurs autres facteurs (factices ou non) ont une influence sur les bris mais sont aussi difficiles à quantifier, tels : les standards et techniques de construction durant la période d'installation, les fuites, les perturbations attribuables aux chantiers de construction à proximité des conduites, la hauteur de la nappe phréatique, la rigueur de l'hiver, l'épandage de sel sur les chaussées en saison hivernale, etc.. Un des facteurs les plus importants est, bien sûr, le temps, et il est pris en compte par l'âge de la conduite au moment de l'analyse.

2.2 Les modèles prédictifs

Plusieurs modèles ont été développés afin de prédire le nombre de bris des conduites d'aqueduc. Les modèles prédictifs permettent de mettre en lumière les tendances générales de l'évolution du nombre de bris dépendant des variables explicatives prises en compte. Deux grandes catégories de modèles existent: les modèles de **nature déterministe** et ceux de **nature statistique**. Les modèles de **nature déterministe** tentent de décrire des phénomènes physiques à l'aide d'équations mathématiques alors que les modèles de nature statistique tentent d'identifier des tendances dans les données historiques. Trois catégories de modèles de **nature statistique** ont été identifiées par Karaa et Marks [1990]: les modèles de type agrégé, de régression et probabilistes. Ces trois types de modèles ont fait l'objet d'une revue critique par Elnaboulsi et Alexandre [1996].

2.2.1 Les modèles de nature déterministe

Les modèles de nature déterministe sont basés sur l'évaluation de l'étendue et l'importance de la corrosion sur les parois internes et externes et des forces agissant sur les conduites. La condition structurale est donc estimée en comparant la résistance des matériaux de la conduite avec la somme des forces agissant sur celle-ci. Trois études ayant utilisé cette approche ont été présentées par O'Day *et al.* [1987]: (1) une étude de la ville de Vancouver; (2) une du "Corp of Engineers Construction Engineering Research Laboratory" (CERL); et (3) une de la ville de Philadelphie.

En 1978, la ville de Vancouver a développé un modèle pour estimer la durée de vie restante de ses conduites en fonte grise, basé sur l'équation générale de Rossum pour prédire la profondeur maximale des piqûres de corrosion externe. Un graphique de la profondeur de la piqûre de corrosion par rapport au temps permet d'estimer le taux de corrosion et le temps au bris. L'épaisseur minimale de la paroi de la conduite avant de briser est déterminé par un bilan des forces sur la conduite, sachant que la résistance de la fonte grise est proportionnelle à l'épaisseur de la paroi. Les données minimales requises pour le développement du modèle sont: le diamètre de la conduite, l'épaisseur initiale de la paroi, la profondeur de la piqûre due à la corrosion interne, la pression d'opération, l'année d'installation de la conduite, l'aération du sol, le pH du sol et la résistivité du sol. Ce type de données est habituellement obtenu à la suite d'une campagne de terrain conçue pour répondre aux besoins de la modélisation. Peu de municipalités possèdent ce type de données.

Le CERL a développé un modèle d'estimation de la profondeur de la piqûre de corrosion externe des conduites de gaz en fonte grise et du temps au bris. Le modèle consiste en un indice de corrosion (*CSI*, "Corrosion Status Index") qui caractérise l'état structural d'une conduite, présenté à l'Équation 2.1. L'indice de corrosion est 100 pour une nouvelle conduite et 1 pour une conduite complètement détériorée. Les chercheurs ont observé que les conduites de gaz commencent à avoir des fuites lorsque la piqûre de corrosion atteint 70% de l'épaisseur originale de la paroi, *i.e.* le *CSI* est égal à 30.

$$CSI = 100 - 100 \left(\frac{PAV}{T} \right) \quad (2.1)$$

où CSI est l'indice de corrosion;
 PAV est la profondeur moyenne de la piqure de corrosion (en pouces); et
 T est l'épaisseur de la paroi de la conduite (en pouces).

Cette approche pourrait être appliquée aux conduites d'aqueduc moyennant quelques modifications pour tenir compte des différences dans les conditions d'opération des réseaux de gaz par rapport à l'aqueduc (*e.g.* pressions plus élevées pour l'aqueduc). Pour utiliser cette approche, le CERL a préparé un tableau aidant à l'estimation préliminaire du CSI à partir des facteurs suivants: le taux de croissance de la piqure de corrosion dans le temps; la prédiction de la profondeur maximale à partir de la profondeur moyenne de la piqure de corrosion; le nombre moyen d'années précédant la première fuite; l'impact du pH et de la résistivité du sol sur le nombre d'années précédant la première fuite; l'impact du recouvrement sur la corrosivité du sol; l'impact des sulfites; et l'impact de l'humidité. Il est clair que pour développer un tel modèle, il faut avoir accès à des données sur les profondeurs des piqures de corrosion, sur l'historique des fuites et sur plusieurs caractéristiques du sol.

Le "Philadelphia Water Department" a, pour sa part, développé un modèle permettant d'évaluer le facteur de sûreté structural d'une conduite en fonte grise exposée à certains facteurs environnementaux. Ce modèle est formé de huit modules: les caractéristiques des conduites, les conditions environnementales, les pertes dues à la corrosion, l'estimation des charges, les charges maximales, les charges de design, les facteurs de sûreté, et la cote d'état structural. Le modèle estime les charges internes et externes et les pertes dues à la corrosion interne et externe. Ainsi,

il prédit l'épaisseur réelle de la paroi après les pertes et calcule le facteur de sûreté de la conduite, qui est un indicateur de l'état structural de la conduite. Ce modèle nécessite aussi une grande quantité de données difficiles à obtenir.

2.2.2 Les modèles de type agrégé

Ces modèles de **nature statistique** se basent sur l'hypothèse que le nombre de bris des conduites d'aqueduc ne dépend que du temps pour des conduites de caractéristiques homogènes. Les caractéristiques qui permettent d'agréger les conduites par groupe homogène sont, entre autres: le matériau et la période d'installation, les conditions pédologiques et thermiques autour de la conduite, les pressions et les conditions d'opération. Les études de Shamir et Howard [1979] et de Walski et Pelliccia [1982] sont les plus souvent citées comme exemples de ce type de modèles. Shamir et Howard [1979] ont proposé deux équations de régression, une exponentielle (Équ. 2.2) et une linéaire (Équ. 2.3), pour décrire le taux de bris par rapport au temps d'une conduite ou d'un groupe de conduites aux caractéristiques homogènes:

$$N(t) = N(t_0) e^{A(t-t_0)} \quad (2.2)$$

$$N(t) = N(t_0) + A(t-t_0) \quad (2.3)$$

- où
- $N(t)$ est le nombre de bris par 1000 pieds de conduite pour l'année t ;
 - $N(t_0)$ est le nombre de bris par 1000 pieds de conduite pour l'année de base t_0 ;
 - t_0 est l'année de base, *i.e.* l'année d'installation de la conduite ou l'année à partir de laquelle les données sont disponibles;
 - A est le coefficient d'augmentation du taux de bris (1/année).

Pour les données utilisées par ces deux chercheurs, le coefficient A de l'Équation 2.2 était dans l'intervalle 0.05-0.15, ce qui se traduit par un taux de bris qui double entre 4.6 et 13.8 années.

Walski et Pelliccia [1982] ont utilisé la même équation exponentielle mais en prenant $N(t_0)$ comme paramètre de calage. Les avantages majeurs de ce type de modèles sont qu'ils nécessitent peu de données (à comparer aux autres types de modèles) et qu'ils sont simples à utiliser. Intuitivement, il est clair que le temps est un facteur important, car il agit sur la détérioration des matériaux comme sur l'étendue de la corrosion et il est un indicateur des standards et des techniques de construction de la période d'installation. Pourtant, aucune relation significative entre l'âge de la conduite et le taux de bris n'a été mise en lumière dans la littérature [Andreou *et al.* 1987a].

Walski et Pelliccia [1982] présentent aussi une méthode classique d'analyse économique permettant de prendre des décisions de gestion sur la réparation et le remplacement de conduites. En connaissant les nombres de bris futurs, $N_1(t)$ et $N_2(t)$, au temps t pour une conduite non-remplacée, C_1 , et une nouvelle conduite, C_2 , les coûts de remplacement de C_1 par C_2 , les coûts de réparation des bris et le taux d'escompte pour ramener ces coûts à la valeur présente, il est possible de déterminer le temps optimal, t^* , de remplacement de la conduite C_1 par C_2 .

2.2.3 Les modèles de régression

Les modèles de régression tentent de prédire le nombre de bris des conduites d'aqueduc en établissant des relations avec des variables indépendantes ayant une influence sur les bris. Les variables identifiées par Clark *et al.* [1982] sont les caractéristiques des conduites et les facteurs environnementaux suivants: le diamètre, la longueur, le matériau et l'âge des conduites, le nombre total de bris antérieurs et l'historique de réparation, la corrosivité du sol autour de la conduite et la pression. Leur modèle, développé à l'EPA ("Environmental Protection Agency" aux États-Unis) et souvent cité dans la littérature, repose sur deux équations de régression. La première estime l'âge de la conduite lors du premier bris et la seconde estime le nombre potentiel de bris subséquents, qui croît de façon exponentielle avec le temps. Les Équations 2.4 ($R^2=0.34$) et 2.5 ($R^2=0.49$) donnent un exemple de ce type de modèles, développé pour une petite municipalité des États-Unis.

$$NY = 2.9 + 0.442 D + 0.017 P + 0.412 I + 0.32 RES \quad (2.4)$$

- où *NY* est le nombre d'années entre l'année d'installation et le premier bris;
D est le diamètre (en pouces);
P est la pression absolue (en livres/pouces²);
I est le pourcentage de linéaire en zone industrielle;
RES est le pourcentage de linéaire en zone résidentielle;

$$REP = 0.386 e^{0.139 PRD} e^{0.0602 A} e^{0.0208 DEV} SL^{-0.016} SH^{0.025} \quad (2.5)$$

- où *REP* est le nombre de bris;
PRD est la pression différentiel (en livres/pouces²);
A est temps depuis le premier bris (en années);
DEV est le pourcentage de linéaire en zone développée;
SL est la surface de linéaire en contact avec un sol faiblement corrosif; et
SH est la surface de linéaire en contact avec un sol hautement corrosif.

Une étude menée par le "Des Moines Water Works" [O'Day *et al.* 1987] a conclu que la corrosion était responsable de plus de 75% des bris de conduites en fonte grise dans cette municipalité. Après un échantillonnage intensif des sols de la ville et une corrélation avec le nombre de bris, l'analyse a permis de mettre en lumière qu'environ 94% des bris a lieu dans un sol de résistivité à saturation inférieure à 2 000 ohm-cm. Le meilleur modèle de régression obtenu est celui présenté à l'Équation 2.6 pour estimer l'âge de la conduite au premier bris ($R^2 = 0.3747$). L'âge probable d'une conduite au premier bris augmente de 28 ans pour chaque incrément de 1 000 ohm-cm de la résistivité à saturation des sols.

$$\hat{Age} = 65.78 + 0.028 SR - 6.338 pH - 0.049 r \quad (2.6)$$

où $\hat{Age}$ est l'âge de la conduite au premier bris (en années);
 SR est la résistivité à saturation du sol (en ohm-cm);
 pH est le pH du sol; et
 r est le potentiel redox (en millivolts).

Les régressions permettent d'établir l'importance de l'influence de certaines variables ("cause à effet") sur les bris de conduites et sont ainsi une amélioration par rapport aux modèles agrégés (pour lesquelles le lien quantitatif entre la fréquence des bris et les variables explicatives n'existe pas). Toutefois elles nécessitent un plus grand nombre de données souvent difficiles à obtenir sur les conduites ayant subi un bris et les corrélations sont souvent faibles.

2.2.4 Les modèles probabilistes

Les modèles probabilistes les plus souvent cités dans la littérature sont basés sur l'analyse de survie. Les modèles pouvant être utilisés pour étudier la dépendance du phénomène de survie par rapport à certaines variables explicatives sont: (1) les modèles exponentiels et de Weibull; (2) le modèle des risques proportionnels de Cox ("Proportional Hazards Model"); et (3) le modèle de temps accéléré ("Accelerated Failure Time Model"). Ces modèles peuvent servir à prédire le taux de défaillance d'une conduite dans des horizons futurs en fonction de variables caractérisant la conduite et son environnement. L'avantage majeur de ce type d'analyse est qu'il tient compte de l'absence autant que de l'occurrence des bris, contrairement aux modèles agrégés et de régression qui ne tiennent compte que de l'occurrence des bris. Les désavantages majeurs sont que ce type de modèles nécessite une caractérisation détaillée du réseau d'aqueduc et que l'analyse est plus complexe et l'interprétation des données plus délicate. De plus, il est d'une grande importance d'inclure toutes les variables explicatives pertinentes car le succès de l'analyse en dépend. Toutefois, en pratique, la disponibilité des données sur tout le réseau limite considérablement le nombre de variables explicatives qui peuvent être incluses dans l'analyse.

Clark *et al.* [1982] ont appliqué l'analyse de survie aux données des villes de Cincinnati (Ohio) et New Haven (Connecticut). Les courbes de survie obtenues démontrent qu'après 40 ans, 52% des conduites n'ont subi aucun bris alors que 48% en ont subi un (30% du nombre total de conduites en a subi un deuxième). Les problèmes sont donc concentrés sur un certain pourcentage des conduites. L'analyse de survie a aussi servi à déterminer le temps entre la pose et le premier bris des conduites selon leur âge. De plus, lorsqu'une conduite subit un bris, la probabilité qu'elle en subisse un autre augmente à chaque nouveau bris. Le temps entre deux bris diminue à chaque fois, ce qui peut être modélisé par une exponentielle.

L'étude des probabilités de bris a permis de faire ressortir deux tendances dans les données: la première est que le temps entre la pose et le premier bris est habituellement assez long alors que le temps entre les bris subséquents devient de plus en plus court (la probabilité de bris augmente exponentiellement). Ces observations ont mené au développement du modèle de régression présenté précédemment, dont les Équations 2.3 et 2.4 sont deux exemples.

Dans des travaux subséquents [Clark *et al.* 1988], un modèle des risques proportionnels de Cox a été utilisé pour connaître le temps jusqu'au premier bris d'une conduite et pour identifier les facteurs de risque ayant une influence significative sur la probabilité de bris des conduites d'aqueduc de la ville de Cincinnati. Le réseau d'aqueduc a été divisé en 4079 tronçons dont 88% n'avait jamais subi de bris. Les facteurs de risque inclus dans le modèle étaient les suivants: la pression, la longueur, le diamètre, l'entrepreneur, le type de remblais, le type de matériau, la période de croissance et le type de joint. Les conduites ayant la plus forte probabilité de bris sont celles dont le diamètre est plus grand que 8" et installées dans la période de croissance 1944-1953.

Andreou *et al.* [1987a] ont développé davantage l'analyse de survie, habituellement utilisée dans le domaine biomédical, aux problèmes de bris de conduites dans le domaine du génie municipal. L'analyse des données sur l'historique des bris de conduites d'aqueduc dans deux municipalités non-identifiées du Nord-Est des États-Unis a permis de dégager deux stades de détérioration. En

effet, ces chercheurs ont observé que la séparation des données en deux jeux selon leur historique de bris, permettait d'obtenir un modèle prédictif pour chacun des stades plus proche des tendances observées qu'un seul modèle obtenu à partir de toutes les données regroupées. Le premier stade de détérioration est une période où les bris sont peu fréquents et le temps entre les bris est relativement long, bien que ce temps soit de plus en plus court à mesure que le nombre de bris antérieurs augmente. Le second stade de détérioration est une période de bris fréquents, sans qu'aucun patron d'augmentation ou diminution du taux de bris ne soit observé. Seulement une fraction des conduites entreront dans ce stade.

Andreou *et al.* [1987a] ont modélisé le premier stade (bris non-fréquents) par le modèle de risques proportionnels de Cox qui permet de lier le temps d'occurrence du bris à des variables explicatives. Ces variables explicatives peuvent être de trois types: (1) l'historique des bris et d'entretien des conduites; (2) les propriétés intrinsèques aux conduites, telles le matériau, le diamètre, la longueur, etc.; et (3) les propriétés extrinsèques associées à l'environnement des conduites, telles le type de sol et l'occupation du sol, etc.. Le modèle de Cox prend la forme présentée à l'Équation 2.7.

$$h(t; z) = h_0(t) e^{z\beta} \quad (2.7)$$

où $h(t; z)$ est la fonction de risque dépendant du temps t et des covariables z ;
 $h_0(t)$ est une fonction de risque de base arbitraire;
 z est un vecteur de covariables explicatives; et
 β est un vecteur de coefficients de calage associés aux covariables z et peuvent être obtenus par maximum de vraisemblance.

Quelques exemples typiques de covariables explicatives sont: la longueur des conduites, la pression, le diamètre, le matériau, la période d'installation, la corrosivité du sol et l'occupation du sol. Ces facteurs ont un effet multiplicatif sur le risque de bris d'une conduite.

Le second stade de détérioration (bris fréquents) est modélisé par un modèle de type distribution de Poisson, dont la forme est présentée à l'Équation 2.8. Le taux de bris, λ , doit être estimé par régression. Andreou [1985] a proposé une équation exponentielle dépendante des vecteurs z et β ($\lambda = e^{\beta z} + \varepsilon$; où ε est le terme d'erreur associé au modèle).

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

où $P(x)$ est la probabilité d'avoir x bris durant la période t ;
 x est le nombre de bris;
 λ est le taux de bris annuel; et
 t est la période de temps pour laquelle nous voulons obtenir la probabilité.

Andreou *et al.* [1987b] présentent en détail deux cas d'application de la méthodologie présentée ci-haut avec les données des deux grandes municipalités non-identifiées dans ces articles, mais vraisemblablement Cincinnati et New Haven. Les résultats de ces travaux sont présentés à la Sous-section 2.3.2.

Brémond [1996] et Eisenbeis [1994] ont aussi utilisé un modèle de risques proportionnels de Cox pour prédire les probabilités de bris de conduites d'aqueduc sur deux réseaux urbains et deux syndicats ruraux du Bas-Rhin, en France. Les résultats de leurs travaux sont présentés à la Sous-section 2.3.5. Ces exemples d'application de l'analyse de survie démontrent que cette approche est valable et ces études confirment qu'elle est plus performante que les autres types de modèle lorsque les données sont disponibles en qualité et en quantité.

2.3 La transposition des modèles prédictifs à des municipalités à faible historique

À notre connaissance, les seuls essais de transposition d'un modèle prédictif à des municipalités à faible historique sont présentés dans Eisenbeis [1994]. Le problème est présenté pour un service "A" possédant un historique de bris remontant à 5 ans (de 1988 à 1993) et dont la conduite la plus ancienne a été posée en 1945. Deux méthodes sont possibles pour créer un modèle particulier pour le service "A" à partir d'un modèle général bâti sur un plus long historique de bris. La première méthode consiste à développer un modèle à partir des données du service "A" et du modèle général, en éliminant toutes les conduites du service "A" posées avant 1988 puisque leur historique des bris est inconnu. Cette approche ne semble pas intéressante puisqu'elle donne trop de poids aux données du modèle général. La seconde méthode consiste à créer à partir du modèle général un échantillon de bris pour les conduites du service "A" posées avant 1988. Cet échantillon serait ajouté à l'historique réel des bris de 1988 à 1993. Cette approche semble la plus intéressante mais encore faut-il développer une méthode d'échantillonnage représentative.

Deux approches sont suggérées pour créer l'échantillon des bris. La première approche est de calculer une probabilité de bris annuelle depuis la date de pose jusqu'en 1988 pour chacune des conduites afin d'établir des dates d'occurrence de bris. La seconde approche est de tirer au hasard des dates d'occurrence de bris tout en respectant la forme de la fonction de survie du modèle général. Cette approche est appelée "anamorphose". Les deux approches ont été testées.

Une fois que les dates d'occurrence de bris de chacune des conduites sont établies selon la première approche, ces dates sont ajoutées à l'historique réel et le modèle de Weibull est utilisé. Les résultats obtenus démontrent que les valeurs des paramètres de calage du modèle développé s'éloignent considérablement des valeurs obtenues pour le modèle général et donc que l'influence

de certains facteurs de risque est trop fortement accentuée. De plus, la forme de la fonction de survie diffère considérablement de celle du modèle général. Cette approche est donc jugée insatisfaisante.

Pour la seconde approche, l'anamorphose, les conduites sont regroupées par classes de facteurs de risque identiques. L'hypothèse est faite que les fonctions de risque obtenues à partir des données du modèle général pour chaque classe de facteurs de risque sont aussi valables pour le service "A". Le calcul d'une longueur moyenne de conduites dans une classe permet d'approximer la fonction de risque sur toute la classe plutôt que de l'estimer par la somme sur chaque conduite (Équ. 2.9).

$$\sum_{i=1}^{N_k} h_{GENE}^k(t, l_i^k) = N_k * h_{GENE}^k(t, l_{moy}^k) \quad (2.9)$$

où N_k est le nombre de conduites dans la classe k ,
 $h_{GENE}^k(t)$ est la fonction de risque du modèle général pour la classe k ou temps t ,
 l_i^k est la longueur de la conduite i dans la classe k , et
 l_{moy}^k est la longueur moyenne des conduites de la classe k .

Puis on reconstitue des dates probables d'occurrence de bris dans chaque classe pour le premier bris, en évaluant le nombre probable de bris à chaque année depuis la date de pose (Équ. 2.10). Lorsque le nombre de bris atteint une unité, alors l'année a est prise comme date d'occurrence du bris.

$$n_{ka} = N_k(a) * h_{GENE}^k(a, l_{moy}^k) \quad (2.10)$$

où n_{ka} est le nombre de bris dans la classe k pour l'année a , et
 $N_k(a)$ est le nombre de conduites dans la classe k au temps a .

De l'échantillon des premiers bris, on procède de la même manière pour les dates d'occurrence du deuxième bris, ainsi de suite... Lorsque l'échantillonnage est terminé, les bris "reconstitués" sont ajoutés aux bris réels et le modèle statistique peut être développé. Cette fois, les résultats obtenus démontrent que les valeurs des paramètres de calage du modèle développé sont semblables aux valeurs obtenues pour le modèle général et que la forme de la fonction de survie s'approche de celle du modèle général. Cette approche est donc jugée satisfaisante par ces chercheurs.

3 ACQUISITION DE L'INFORMATION DE BASE

La revue de littérature a permis d'identifier les différents types de modélisation et les types de données qu'il est nécessaire de recueillir dans les municipalités québécoises pour appliquer des modèles. Le choix de modélisation s'est arrêté sur les modèles de nature statistique puisque les données nécessaires aux modèles de nature déterministe ne sont pas disponibles dans les municipalités québécoises. Des travaux sont en cours à l'IRC (Institut de Recherche en Construction) du CNRC (Conseil National de la Recherche du Canada) pour recueillir ce type de données. De plus, une fois le lien déterministe établi, il faudra utiliser un modèle de type probabiliste vu la nature du problème. Les modèles de nature statistique permettent d'exploiter les tendances observées dans les données afin de les projeter dans le futur. Puisque les bris sont l'indicateur principal choisi du phénomène de détérioration des conduites, les données d'intérêt pour cette étude sont celles ayant une influence sur le nombre annuel moyen de bris des conduites d'aqueduc dans une municipalité. Tel que mentionné auparavant, les données disponibles ne sont qu'un sous-ensemble de tous les facteurs de risque qui devraient être pris en compte.

Un bris est défini, pour les besoins de cette étude, comme toute fuite (perte d'eau) nécessitant une intervention sur le réseau. Dans certaines municipalités, cela veut dire qu'il y a présence d'eau à la surface (et peut-être même d'un geyser!) alors que dans d'autres, un programme de détection des fuites permet de les localiser avant que l'eau n'atteigne la surface. Il est à noter que dans les municipalités où le réseau d'égout est détérioré, les fuites d'eau pourront ne jamais atteindre la surface puisque l'eau risque de s'infiltrer dans les fissures et d'atteindre le réseau d'égout. Bien sûr les municipalités qui commencent un programme de détection de fuites auront tendance à en répertorier beaucoup plus pendant une certaine période de temps, que les municipalités qui n'en font pas, sans que cela n'implique que leurs conduites brisent plus souvent mais plutôt que les fuites sont localisées plus rapidement. Un programme de détection de fuites est un excellent moyen de passer d'une gestion en situation de crise à une gestion préventive.

De même que l'on observe les différences de méthodes de gestion entre les municipalités, les

interventions sur les réseaux ne sont pas notées de la même manière dans toutes les municipalités. Certaines notent le minimum d'informations lors d'un bris (*i.e.* l'adresse civique, le nom de la rue et la date de l'intervention) alors que d'autres peuvent noter en plus, la localisation exacte du bris, sa nature, le type d'intervention, la cause probable du bris, etc. (*e.g.* fissure circonférencielle à un mètre du joint sur une conduite de 150 mm, réparation à l'aide d'un manchon). De plus, puisque la cause probable du bris est rarement répertoriée, il est difficile d'identifier les bris qui ont lieu principalement à la suite de la fragilisation de la conduite par la corrosion et non pas à cause de techniques de pose inappropriées, d'une charge excessive accidentelle en surface, ou encore de conditions d'opérations non-favorables. Il est important de déterminer à quelle échelle spatiale il est possible de localiser un bris et de connaître les différentes caractéristiques du réseau.

3.1 Concept de tronçon

L'unité spatiale utilisée pour la modélisation des bris sur les conduites d'aqueduc est le **tronçon**. Un tronçon est un regroupement d'une ou plusieurs conduites (une à la suite de l'autre) ayant des caractéristiques homogènes, tant au niveau des caractéristiques physiques des conduites que de leur environnement et des conditions d'opération. En général, les conduites d'un réseau d'aqueduc au Québec se trouve plus ou moins sous le centre de la rue. Par analogie avec les systèmes d'information géographique (SIG), le réseau d'aqueduc peut être perçu comme une couche d'information sous-jacente à la couche d'information "voirie", la ligne d'aqueduc se trouvant généralement plus ou moins au centre de la rue. Un tronçon est donc localisé par le **nom de la rue** au-dessus de la conduite, **du nom de la rue** à l'intersection définissant le début du tronçon jusqu'**au nom de la rue** à l'intersection définissant la fin du tronçon. Il peut y avoir plusieurs rues qui croisent un tronçon sans pourtant en définir le début ou la fin. Par exemple, à la Figure 3.1, la rue St-Gérard pourrait être divisée en deux tronçons. Cependant plusieurs exceptions à cette règle existent. L'exception majeure vient du fait qu'un changement de caractéristiques se traduit par un changement de tronçons, ce qui n'a pas nécessairement lieu à une intersection. De plus, d'autres exceptions sont par exemple, les culs-de-sac et les tronçons qui ne sont pas sous une rue.

Dans ces cas d'exception, la localisation se fait par rapport à des points de repère (*e.g.* tronçon traversant le parc X).

Il est à noter que le tronçon est la plus petite unité spatiale de modélisation qu'il est possible d'utiliser avec les données actuellement disponibles pour les municipalités québécoises bien pourvues en données. En effet, il est très difficile de connaître, conduite par conduite, les caractéristiques physiques des conduites et de leur environnement, les conduites ayant une longueur moyenne de 6 mètres (cette échelle est trop fine), tandis que la longueur moyenne d'un tronçon est plutôt autour de 150 mètres (ce qui est plus réaliste). De plus, il n'est pas possible de connaître la localisation du bris à une échelle de 6 mètres, puisque les bris ne sont pas répertoriés avec assez de précision.

Bien que les bris puissent être répertoriés par le jour, le mois et l'année, le **pas de temps** (échelle temporelle) utilisé pour la modélisation est l'année. Il n'est pas logique de travailler à une échelle de temps plus raffinée puisque le jour et le mois notés par les Travaux Publics réfèrent au jour et au mois d'intervention sur le réseau plutôt qu'au jour et au mois d'occurrence du bris (sachant toutefois que les bris apparaissent de façon progressive).

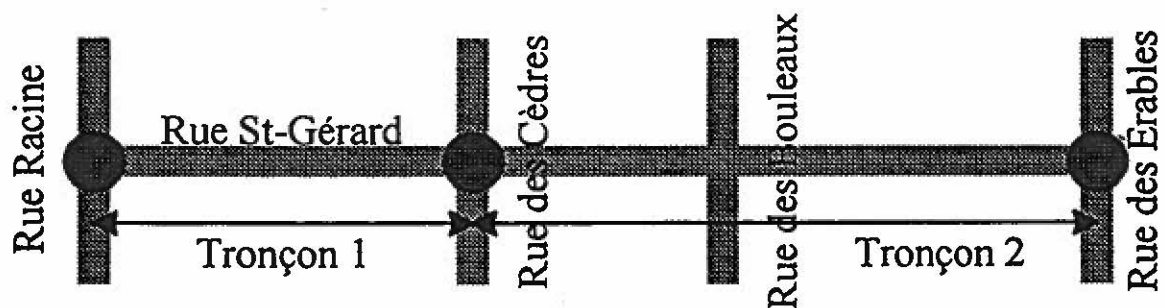


Figure 3.1 - Concept de tronçon

3.2 Structure des bases de données

Dans les municipalités québécoises qui participent à cette étude, des différences marquées existent quant à la définition donnée à un bris, à la quantité et à la qualité des informations répertoriées, à la façon dont ces informations sont compilées et au type de gestion pratiqué. Par contre, toutes possèdent les informations minimales nécessaires, en grande partie sous support informatique. Entrevue au départ sans grande difficulté, la structuration des fichiers de données s'est avérée un véritable casse-tête, dans chaque municipalité pour des raisons différentes. Le problème le plus important est la difficulté d'établir un lien entre les fichiers "AQUEDUC" et "BRIS".

En effet, pour développer un modèle de prédiction du nombre de bris annuel sur les conduites d'aqueduc, il faut posséder deux fichiers de données et la possibilité de faire un lien entre les deux. Le premier fichier (dit "AQUEDUC") contient toute l'information sur les caractéristiques physiques du réseau et les autres facteurs de risque quantifiés tronçon par tronçon. Quant aux données à inclure dans ce fichier, il est préférable d'inclure le plus grand nombre de facteurs de risque possible dans la mesure où les données sont disponibles sur tout le réseau et qu'elles soient de bonne qualité. Par exemple, sachant que la pression joue un rôle dans le phénomène des bris, il peut être intéressant d'inclure ce facteur dans la modélisation si les données sont disponibles. Pour ce faire, il faut associer à chacun des tronçons une valeur de pression significative quant à l'impact sur le taux de bris, ce qui peut être difficile à réaliser puisque la relation entre la pression et le taux de bris n'est pas bien connue. En effet, il n'est pas clair si c'est la valeur moyenne journalière, la valeur maximale journalière ou plutôt le différentiel de pression maximal qui a une influence sur le taux de bris. Ce problème d'identification de la "meilleure" façon de quantifier ou qualifier un facteur de risque se pose pour chaque nouveau facteur à introduire dans l'analyse.

Le Tableau 3.1 présente les informations telles qu'elles apparaissent dans le fichier "AQUEDUC". Le numéro de tronçon doit être unique et tous les tronçons formant le réseau d'aqueduc doivent être inclus dans la table. La somme des longueurs de tous les tronçons dans le fichier AQUEDUC

doit être égal au linéaire total du réseau. Un numéro de secteur permet de repérer plus rapidement le tronçon et permet de différencier d'anciennes divisions politiques fusionnées en une municipalité unique (e.g. d'anciens villages). Les noms de rue "au-dessus", "De" et "À" permettent de localiser précisément le tronçon. Ces noms doivent apparaître dans le fichier conformément à la toponymie établie par la ville. Certains facteurs de risque sont des données numériques tels, le diamètre, la longueur et l'année d'installation, alors que d'autres sont plutôt de type "caractère" tels, le type de matériau, le type de sol, d'occupation du sol. Pour simplifier l'analyse, les données de type "caractère" doivent être transformées en données numériques selon un code défini (e.g. le type de matériau: 1=fonte grise; 2=fonte ductile; 3=PVC; 4=amiante; 5=autres).

Tableau 3.1 - Structure et informations contenues dans le fichier AQUEDUC

Numéro de tronçon	Numéro de secteur	Nom de la rue au-dessus	De	À	Diamètre (m)	Longueur (m)	Type de matériau	Âge	Type de sol	Occupation du sol	Autres données disponibles
Numéro unique		Pour la localisation									

Le second fichier (dit "BRIS") contient l'historique des bris. Le Tableau 3.2 présente les informations telles qu'elles apparaissent dans le fichier "BRIS".

Tableau 3.2 - Structure et informations contenues dans le fichier BRIS

Date du bris	Numéro civique	Nom de la rue	Nom de la rue à l'intersection	Numéro unique du tronçon
JJ/MM/AAAA	Dépendant des cas			doit être dans la table d'aqueduc

Pour établir un lien entre le fichier AQUEDUC et le fichier BRIS, il faut que le fichier BRIS contienne l'information pertinente pour localiser précisément les bris sur un tronçon unique du réseau d'aqueduc. En effet, lors du recensement des données disponibles dans les municipalités québécoises, il a été constaté que les bris sont localisés en référence à la voirie (*e.g.* numéro civique et nom de la rue : 315 St-Gérard) par des équipes des Travaux Publics. Dans les fichiers "AQUEDUC", les conduites sont localisées avec seulement le nom de la rue au-dessus du tronçon dans le pire des cas et dans le meilleur des cas, avec le nom de la rue au-dessus et les deux noms des rues transversales qui limitent le tronçon d'aqueduc (*e.g.*, à la Figure 3.1, sous St-Gérard, entre des Cèdres et des Bouleaux). Il n'y a aucune référence aux numéros civiques. Par exemple, il n'est pas possible avec les informations disponibles de savoir si le 315 St-Gérard est situé entre les rues des Cèdres et des Bouleaux. Le but recherché est de lier le bris du 315 St-Gérard au tronçon unique (identifié par un numéro unique) situé sous St-Gérard entre les deux rues où se trouvent le 315. En faisant ce lien, il est possible d'associer à chacun des bris les caractéristiques physiques uniques et autres facteurs de risque uniques correspondant au tronçon ayant subi le bris. Ainsi, pour faire ce lien, il faut connaître les numéros civiques pairs et impairs au début et à la fin de chaque tronçon d'aqueduc. Ces données ne sont pratiquement jamais facilement accessibles dans les municipalités québécoises. Le Tableau 3.3 présente la structure d'un fichier "AQUEDUC"

incluant les numéros civiques pour chaque tronçon. Les deux fichiers de données (AQUEDUC et BRIS) sont utilisables lorsque tous les tronçons ont pu être caractérisés et que tous les bris sont identifiés par numéro unique de tronçon.

Tableau 3.3 - Inclusion des numéros civiques dans le fichier AQUEDUC

Numéro de tronçon	Numéro de secteur	Nom de la rue au- dessus	De	À	Numéros pairs		Numéros impairs	
					De	À	De	À
30002	3	St- Gérald	des Érables	des Cèdres	1176	1320	1177	1323

3.3 Acquisition de l'information de base

L'acquisition de l'information de base dans les municipalités s'est déroulée en plusieurs étapes. La première a été d'identifier les municipalités possédant des données sous support informatique sur les caractéristiques de leur réseau d'aqueduc et sur l'historique des bris de conduites. Nous avons d'abord envoyé à 7 municipalités, suggérées par nos collègues d'INRS-Urbanisation, une télécopie avec un aperçu du projet et un questionnaire comportant quatre questions portant sur le niveau d'informatisation de la municipalité. Ceux-ci ont été adressés aux directeurs des Travaux Publics. Le questionnaire devait nous être retourné dans les plus brefs délais par télécopieur. Nous avons ensuite téléphoné aux responsables des réseaux d'aqueduc ayant retourné le questionnaire pour discuter des résultats et prendre rendez-vous lorsque la municipalité était en mesure de nous fournir les données nécessaires dans un format utilisable. Nous avons aussi téléphoné aux responsables des réseaux d'aqueduc n'ayant pas retourné le questionnaire afin d'obtenir les réponses et prendre rendez-vous le cas échéant.

Des rencontres d'une demi-journée ont eu lieu afin de présenter le projet et de discuter des possibilités de collaboration. Nous avons été accueillis avec beaucoup d'enthousiasme et avons perçu un intérêt à nous fournir les données nécessaires. Les responsables se sont dits très intéressés par l'étude et nous avons été à même de constater l'importance de la question de la détérioration des infrastructures à leurs yeux. Une collaboration étroite s'est rapidement établie avec ces personnes-ressources et leur expertise nous a été essentielle tout au long du projet.

Chaque municipalité répertorie les bris de façon différente et fait un plan directeur de son réseau avec ses attributs propres. Souvent les bris relèvent du service des Travaux Publics alors que les plans relèvent du service du Génie ou de l'Environnement. Les municipalités A et C ont pu nous fournir une bonne partie des données sur place lors des rencontres. La municipalité B a demandé un temps de réflexion puisqu'elle devait effectuer un certain travail de structuration afin de compiler ses données dans un format utilisable. Les gestionnaires du réseau de cette municipalité ont obtenu le soutien de leur conseil municipal afin d'accorder un contrat à une firme locale pour la structuration des données sur les caractéristiques du réseau d'aqueduc tronçon par tronçon et l'historique des bris. Les données sous support informatique nous ont été livrées à la fin du mois de mai 1997. La municipalité D s'était engagée à nous envoyer ses données au début février 1997, ce qui a été fait. La municipalité E, par ailleurs, possédait l'information nécessaire mais un travail de structuration a été effectué afin d'obtenir les données dans un format utilisable. À mesure que notre connaissance de la problématique se précisait, nous avons dû communiquer maintes fois avec les personnes-ressources afin d'obtenir des données supplémentaires ou demander des précisions sur les données déjà obtenues.

3.4 Concepts de stratification, d'historique tronqué et de remplacement

3.4.1 Stratification

Le concept de stratification est illustré à la Figure 3.2 par un exemple fictif d'un tronçon installé en 1950, qui subit son premier bris en 1970, puis son deuxième et troisième en 1985 et 1990. La stratification consiste à regrouper l'historique selon l'ordre des bris (*e.g.* premier, deuxième, troisième, etc.). Pour ce faire, il faut connaître l'historique du tronçon depuis son année d'installation. La stratification est importante puisqu'il a été observé dans la littérature que le temps entre le premier et le second bris est généralement beaucoup plus long qu'entre les bris subséquents. Le temps de survie est donc modélisé de façon différente selon l'ordre du bris. Il est à noter que, dans cet exemple, le temps de survie entre le troisième et le quatrième bris est inconnu, puisqu'à l'année d'analyse, ce quatrième bris n'a pas encore eu lieu. Dans un tel cas, le temps de survie du troisième bris à l'année d'analyse subit une "césure à droite", afin d'indiquer pour l'analyse que cette période de temps ne contient pas une information finale. Comme variable de codage, une césure à droite égale à "0" indique une information complète, alors qu'une valeur égale à "1" indique une information incomplète.

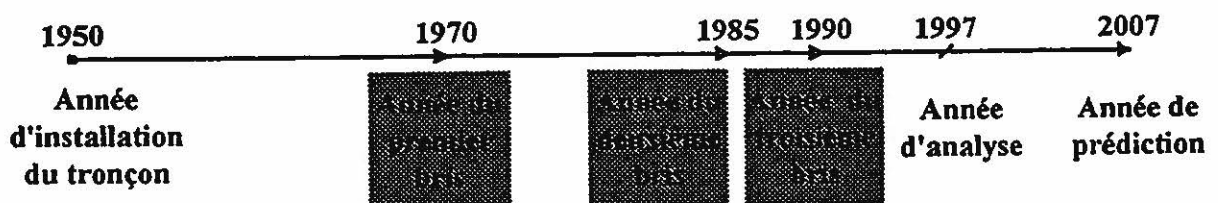


Figure 3.2 - Exemple de stratification pour un tronçon fictif

3.4.2 Historique tronqué

Dans les cinq municipalités-témoins sélectionnées pour l'étude, le plus long historique de bris est de 21 ans (depuis 1976). En prenant le même exemple qu'à la figure précédente et tel qu'illustré à la Figure 3.3, l'historique d'intervention sur le tronçon est inconnu avant 1976. Le bris enregistré

en 1985 sera donc le premier bris enregistré mais son ordre réel est inconnu. Il est important de constater que pour tous les tronçons installés avant le début de l'historique enregistré, l'ordre réel des bris est inconnu. En ne prenant que les tronçons installés à partir de 1976, l'échantillon de bris et de tronçons est restreint et il est alors plus difficile de mener une analyse. Le modèle développé doit tenir compte de cette réalité, sachant que l'ordre réel des bris a une grande influence sur le temps de survie probable entre deux bris. Sachant que dans les municipalités-témoins sélectionnées pour cette étude les premiers tronçons ont été posés aussi tôt qu'en 1891, il est à noter que la fenêtre de temps où l'historique de bris est connu est très restreinte par rapport à l'historique total de la municipalité.

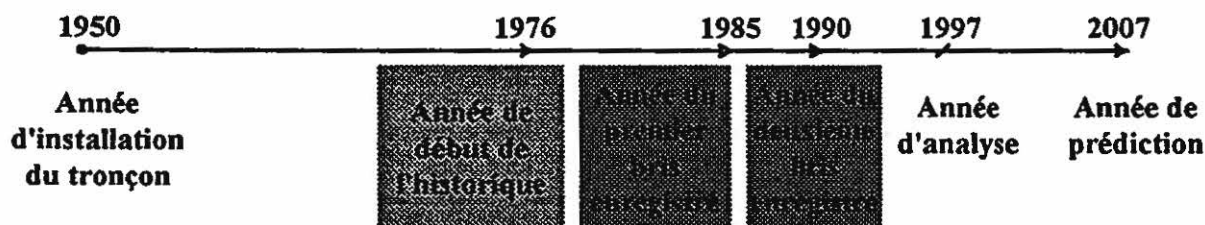


Figure 3.3 - Exemple d'historique tronqué pour un tronçon fictif

3.4.3 Remplacement versus installation

Chaque bris répertorié nécessite une intervention sur le réseau, *i.e.* réparer ou remplacer le tronçon. De plus, à n'importe quel moment, le gestionnaire de réseau peut choisir de remplacer un tronçon afin de diminuer la fréquence de bris sur ce tronçon et ainsi "rajeunir" l'âge moyen de son réseau. Ainsi, dans l'exemple illustré à la Figure 3.4, le gestionnaire de réseau décidait en 1975 de remplacer un tronçon installé en 1950 et ayant subi deux bris. Le nouveau tronçon, bien qu'au même endroit géographique, change d'année d'installation et peut changer de caractéristiques (*e.g.* diamètre plus grand, type de matériau différent) par rapport au tronçon précédent sauf, bien sûr, de longueur. Le temps de survie entre l'année du deuxième bris et l'année de remplacement du tronçon original posé en 1950 subira une césure à droite afin d'indiquer que cette information est incomplète. Le premier bris suite au remplacement sera réellement un premier bris (et non un

troisième) puisqu'il aura lieu sur le nouveau tronçon. Le remplacement de tronçons a une grande influence sur le nombre de bris annuel dans une municipalité. Il est donc important que les cinq municipalités-témoins avec lesquelles nous travaillons nous fournissent une liste des tronçons qui ont été remplacés ainsi que les nouvelles caractéristiques de ces tronçons. Il est à noter qu'il y a eu très peu de suivi sur les remplacements et que ces remplacements ne sont pas nécessairement répertoriés depuis la même date que l'historique des bris. De plus, cette étude a mis en lumière le fait que les efforts de remplacement étaient presque inexistants jusqu'à tout récemment (dernière décennie) et qu'ils sont encore limités.

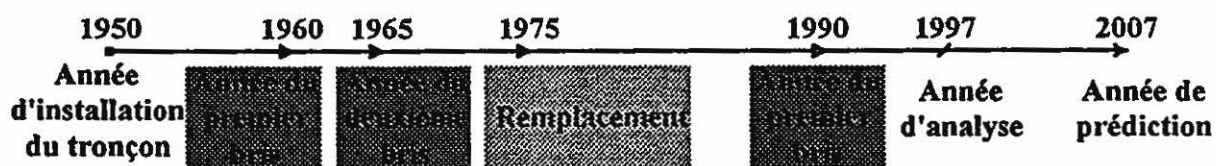


Figure 3.4 - Exemple de remplacement de conduite pour un tronçon fictif

4 TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Ce chapitre présente dans la première section une description des données disponibles dans chacune des cinq municipalités-témoins et nos efforts pour structurer ces données dans un format utile pour la modélisation. La seconde partie présente les statistiques de base calculées sur les caractéristiques et les bris des réseaux d'aqueduc des municipalités-témoins. La troisième partie présente des schémas-résumés pour chacune des municipalités-témoins et des tableaux comparatifs.

Les six caractéristiques et facteurs de risque communs aux cinq municipalités-témoins sont : (1) l'année d'installation; (2) le type de matériau; (3) le diamètre; (4) la longueur; (5) le type de sol; et (6) l'occupation du sol. Ces caractéristiques doivent être connues tronçon par tronçon. Il est à noter que l'année d'installation des tronçons est généralement bien connue pour les tronçons posés après 1950 mais qu'avant, il a souvent fallu se fier aux périodes d'urbanisation des municipalités. Ainsi, dans plusieurs cas, les années d'installation des tronçons posés avant 1950 sont entachées d'incertitude. Par chance, le linéaire de réseau posé avant 1950 est assez limité. Le type de matériau est déduit à partir des années d'installation bien que l'année de passage de la fonte grise à la fonte ductile et celle de la fonte ductile au PVC soient estimées par le gestionnaire de réseau et cela, à deux ou trois ans près. Par exemple, si le gestionnaire estime que le passage de la fonte grise à la fonte ductile s'est fait autour de l'année 1970, il est quand même possible que la municipalité est écoulée son stock de fonte grise dans les années suivantes. Par contre, dans le fichier AQUEDUC de la municipalité, le type de matériau associé aux années d'installation postérieures à 1970 est la fonte ductile dans tous les cas. Les diamètres sont généralement connus. Les plus utilisés sont les 6 et 8 pouces (0.150 et 0.200 m) qui peuvent représenter près de 70% des réseaux. La longueur des tronçons est souvent estimée à partir des plans et il est difficile de savoir si ceux-ci sont conformes à la réalité. Il faut vérifier que la somme des longueurs des tronçons est bien égale au linéaire total des réseaux, tel que perçu par les gestionnaires. Le type de sol et l'occupation du sol nous ont été donnés de façon assez grossière, il est donc difficile de connaître l'impact de ces facteurs de risque sur l'analyse. Quant aux historiques de bris, il est à

noter qu'au mieux il est de 21 ans et plutôt autour d'une dizaine d'années pour les autres municipalités-témoins, ce qui pour les besoins d'une étude comme la nôtre, est très court.

4.1 Structuration des fichiers AQUEDUC et BRIS

Cette section présente les sources de données, la structure des fichiers, le codage des variables, les modifications apportées et les problèmes encourus lors de la structuration des fichiers AQUEDUC et BRIS pour chacune des cinq municipalités-témoins.

4.1.1 Municipalité A

Le fichier original du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de la municipalité A contenait les informations suivantes pour 2459 tronçons: (1) numéro d'identification du tronçon; (2) nom de la rue au-dessus du tronçon; (3) nom de la rue "De"; (4) nom de la rue "À"; (5) longueur du tronçon d'aqueduc; (6) date d'ouverture de rue; et (7) une donnée nommée "Type_S" (numéro caractérisant le type de rue; 1=boulevard; de 2 à 6, gradation des rues par rapport au trafic; 7=rang; 8=autoroute/échangeur; et 9=pont). Ce fichier a été structuré pour les besoins du réseau de voirie, donc la définition de "tronçon" n'avait pas la même signification dans ce fichier que pour les besoins de notre étude. Puisque les tronçons de rue se trouvent à découper le réseau d'aqueduc en tronçons généralement homogènes, la structure de base du fichier a été respectée. Par contre, le fichier a dû être modifié pour inclure de nouveaux tronçons et en enlever d'autres. Deux cas nécessitant des ajouts ont été identifiés: lorsqu'il y avait deux tronçons d'aqueduc parallèles sous une même rue et lorsqu'il y avait changement de diamètre le long d'un tronçon (notre étude nécessite que les caractéristiques de l'aqueduc et non de la voirie soient homogènes le long d'un tronçon). Deux cas nécessitant l'élimination de tronçons ont été identifiés: lorsqu'il n'y a pas de conduite sous le tronçon de rue et lorsqu'un boulevard double était entré comme deux rues séparées malgré qu'il n'y ait qu'un seul aqueduc. Seuls les noms de rue dans la colonne "nom de la rue au dessus du tronçon" ont été rendus conformes à la toponymie utilisée par la ville. Le fichier final contient 2096 tronçons, avant remplacement.

Pour compléter ce fichier original modifié afin qu'il contienne toutes les données nécessaires à notre étude, nous avons dû utiliser plusieurs sources de données. Les principales sources sont des fichiers du logiciel MapInfo^{MD} et des données recueillies pour le logiciel établissant le programme de rinçage de la municipalité, RinCad^{MD}. La municipalité A utilise le logiciel MapInfo pour visualiser des cartes de leurs réseaux de voirie et d'aqueduc. Ces cartes permettent aussi de visualiser certaines informations associées à chacun des tronçons ou à des zones. Aux tronçons sont associés des noms de rue, des diamètres, des longueurs, des dates d'ouverture de rue, et des numéros civiques pairs et impairs au début et à la fin d'un tronçon sur différentes couches d'informations. Les différentes zones illustrées sont les secteurs, au nombre de cinq (N=nord, E=est, O=ouest, G=gravitaire, R=rangs) et les types d'occupation du sol, au nombre de sept (R=résidentiel; C=commercial; I=industriel; S=services; L=récréatif; P=communautaire; A=agricole). Puisque les données de la municipalité A ne sont pas géoréférencées mais plutôt de type graphique, ce logiciel permettait de visualiser l'information sans toutefois pouvoir faire un lien avec le fichier de données sur les tronçons. Cet inconvénient majeur a généré beaucoup de travail manuel.

Les diamètres de tous les tronçons d'aqueduc ont été notés à partir de cartes MapInfo. Environ 97% des longueurs étaient déjà dans le fichier original mais les modifications apportées à ce fichier ont nécessité que le 3% complémentaire de longueurs soit mesurées à partir des cartes MapInfo. La date d'ouverture de rue (synonyme d'âge ou encore d'année d'installation) était aussi dans le fichier original mais plusieurs données étaient manquantes. Le gestionnaire de réseau de la ville nous a donc fourni une carte MapInfo avec des intervalles d'âge (e.g. 1940-1950, 1950-1960, etc.) obtenus à partir des données du service d'urbanisme et une carte papier indiquant grossièrement deux périodes de développement dans le vieux quartier de la ville. Les numéros de secteur (ou plutôt les noms de secteur dans ce cas-ci) et les types d'occupation du sol ont été notés à 100% à partir des cartes MapInfo. Souvent plusieurs occupations du sol étaient associées à un même tronçon. Nous avons décidé de regrouper tous les types d'occupation du sol en quatre catégories selon l'occupation la plus contraignante (1=R, L, P, RL, LP; 2=C, S, RC, PS, RS, CS; 3=I; 4=A,

AL). Le type de sol a été identifié grossièrement comme de l'argile pour toute la municipalité. Finalement le type de matériau a été noté autant que possible à partir d'une carte papier (identifiant surtout le PVC), le reste a été complété en faisant une relation directe avec la date d'ouverture de rue (<1970=fonte grise; 1970-1982=fonte ductile; >1982 et diamètre>12"=fonte ductile; >1982 et diamètre<12"=PVC).

Le fichier original des 2298 bris contenaient les données suivantes: (1) numéro civique; (2) nom de la rue (ou deux noms de rue dans le cas d'une intersection); (3) date du bris, AA/MM/JJ; et (4) un code représentant le type de bris (121=rupture; 122=fissure; 123=oxydation; 124=joint; 125=autre; codes valides seulement depuis 1989). L'historique des bris remonte à 1976 jusqu'en 1996. Puisque les numéros civiques pairs et impairs au début et à la fin de la majorité des tronçons pouvaient être visualisés à l'aide de MapInfo, ces informations ont été notées et ajoutées au fichier d'aqueduc. Ainsi, des requêtes informatiques ont permis de créer un lien automatisé entre le fichier de bris et celui d'aqueduc pour les bris identifiés par un numéro civique et un nom de rue ou deux noms de rue. Dans le cas d'une intersection, le premier tronçon apparaissant suite à une requête était lié au bris (règle établie dans le cas d'une intersection). Puisque les numéros civiques pairs et impairs au début et à la fin de la plupart des tronçons ont été ajoutés au fichier aqueduc, il sera possible d'utiliser une requête informatique pour associer un numéro unique de tronçon à un bris futur.

Les cas à problème étaient les suivants: un nom de rue sans numéro civique, une intersection inexistante, un nom de rue inexistant, une localisation par rapport à une industrie ou un commerce. Dans quelques cas, le nom de rue sans numéro civique renvoyait à un tronçon unique (ce qui réglait le problème) ou encore à un nombre limité de tronçons où une règle pouvait être établie. Il est à noter qu'établir une règle induit un biais dans l'analyse mais ce biais était parfois jugé moins important que la perte d'information associée à l'élimination d'une donnée. Les autres cas problèmes ont été soumis au gestionnaire de réseau, certains ont pu être réglés, d'autres ont dû être éliminés. Finalement, 1719 bris sont utilisables pour l'analyse.

4.1.2 Municipalité B

Le fichier original du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de réseau de la municipalité B contenait les informations suivantes pour 2046 tronçons: (1) numéro d'identification du tronçon; (2) diamètre du tronçon; (3) longueur du tronçon; (4) année d'installation du tronçon; (5) type de matériau du tronçon; (6) adresse 1; (7) adresse 2; (8) numéro de la rue au dessus du tronçon d'aqueduc. Les champs "adresse 1" et "adresse 2" contiennent les numéros civiques au début et à la fin de chaque tronçon.

Pour compléter le fichier original, un autre fichier contenant la correspondance entre les numéros de rues et les noms de rues a été utilisé. De plus, une carte des types d'occupation du sol a été fournie, indiquant les secteurs industriels et les secteurs commerciaux. Les autres secteurs de la municipalité sont considérés résidentiels par défaut. Le type de sol a été identifié grossièrement comme de l'argile pour toute la municipalité. Après correction de certaines erreurs (*e.g.* répétitions d'un même tronçon dans le fichier du réseau d'aqueduc), il reste 2038 tronçons utilisables pour l'analyse.

Le fichier original des 1392 bris contenait les données suivantes: (1) nom de la rue; (2) numéro civique; (3) date du bris, AAAA/MM/JJ. Après la constatation que plusieurs bris étaient répétés dans ce fichier, une nouvelle liste a été fournie par le gestionnaire de réseau de la municipalité B. Le nombre de bris est passé à 671. L'historique des bris remonte de 1990 à 1997. Avec le numéro civique et le nom de rue connus pour chaque bris, il a été possible de faire le lien avec le fichier du réseau d'aqueduc avec une requête informatique. Un numéro de tronçon unique a été associé avec environ la moitié des bris.

Pour l'autre moitié des bris, les différents cas à problème étaient les suivants: (1) un bris pouvait être associé à plus d'un tronçon; (2) aucun tronçon ne correspondait au numéro civique du bris; (3) le code "9999", "9998" ou "9997" apparaissait à la place du numéro civique du bris. Ces cas ont été soumis au gestionnaire de réseau qui a associé manuellement la majorité de ces cas

problématiques à un numéro unique de tronçon d'aqueduc. Finalement, 536 bris sont utilisables pour l'analyse.

4.1.3 Municipalité C

Le fichier original du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de réseau de la municipalité C contenait les informations suivantes pour environ 1579 tronçons: (1) nom de la rue au-dessus du tronçon; (2) nom de la rue "De"; (3) nom de la rue "À"; (4) numéro du secteur de bornes-fontaines; (5) diamètre; et (6) longueur. Toutefois, quelques diamètres et la majorité des longueurs étaient manquants. Pour compléter ces informations, nous nous sommes servis des feuillets 1:2000 de la municipalité (AutoCad^{MD}). Le fichier final contient 1554 tronçons.

En gros, la municipalité C est divisée en quatre sections qui suivent les anciennes limites des quatre villages formant la municipalité actuelle. Chaque section est divisée en secteurs de bornes-fontaines (utilisés par les Travaux Publics), au total il y a 71 secteurs. Pour la localisation de ces secteurs sur les feuillets de la municipalité, nous devons regarder les similitudes de géométrie entre les cartes des secteurs individuels et les feuillets. Tous les diamètres sont notés sur ces feuillets et puisqu'ils sont à l'échelle (1:2000), les longueurs ont pu être mesurées directement.

De plus, pour compléter le fichier, nous avons dû ajouter un numéro de tronçon, l'âge, le type de matériau, de sol et d'occupation du sol. Le numéro de tronçon est composé du numéro de secteur et d'un identifiant de deux chiffres (*e.g.* 101-02). Pour connaître les âges (années d'installation), nous nous sommes fiés à trois cartes papier datant de 1989 qui contenaient environ 50% des âges. L'autre 50% a été complété à partir de l'expertise du gestionnaire de réseau pour les nouveaux quartiers et celle de ses contremaîtres pour les quartiers plus vieux. Pour le type de matériau, le gestionnaire de réseau a établi la règle suivante avec les âges: <1970=fonte grise; de 1970 à 1990=fonte ductile; et >1990=PVC. Le sol dominant dans la municipalité est l'argile, sauf dans quelques secteurs grossièrement identifiés (111, 302, 303, 308, 310, 311 et 312) où le sable domine. L'occupation du sol a été déterminée à partir d'un plan d'urbanisme. Ce plan divise le

territoire selon sept types: faible densité d'habitation; moyenne densité; forte densité; commerce, bureau et services; industrie et services; commerce récréatif; et parcs et espaces verts. Ces types ont été regroupés en trois catégories: 1=faible densité et parcs et espaces verts; 2=moyenne et forte densités d'habitation; et 3=commerce, bureau et services et industrie et services. Commerce et industrie ont été regroupés car les nuances de couleur utilisées ne permettaient de les distinguer assez clairement.

Le fichier original de 1700 bris contenaient les informations suivantes: (1) numéro civique; (2) nom de la rue; (3) nom de la rue à l'angle (*i.e.* à l'intersection); (4) numéro du quartier électoral; (5) année du bris, AA; (6) mois du bris, MM; (7) jour du bris, JJ; et (8) numéro du secteur de borne-fontaines. L'historique des bris remonte à 1981 jusqu'en 1995. La colonne "numéro du quartier électoral" a été éliminée puisqu'elle n'est pas utile à cette étude. La façon graphique de noter les numéros civiques sur les feuillets de la municipalité ne permettait pas d'établir clairement les numéros civiques pairs et impairs au début et à la fin d'un tronçon. Mais la répartition des numéros civiques le long des rues sur les feuillets permet d'associer un numéro de tronçon unique à une grande partie des bris. Ce travail a donc été fait de façon manuelle pour chacun des bris. Il a été possible de faire cette association pour 1511 bris. Les cas à problème sont: les intersections multiples de rues (boucles), les rues introuvables, les informations trop imprécises, les conduites parallèles, etc.. Certains cas ont été soumis au gestionnaire de réseau mais d'autres ont dû être abandonnés. Finalement, 1426 bris sont utilisables pour l'analyse.

4.1.4 Municipalité D

Le fichier original du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de réseau de la municipalité D contenait les informations suivantes pour 23799 tronçons: (1) noeud initial du tronçon; (2) noeud final du tronçon; (3) diamètre du tronçon; (4) longueur du tronçon; (5) code de matériau du tronçon et (6) nom de la rue au dessus du tronçon. Ce fichier a été structuré pour les besoins du modèle de balancement du réseau d'aqueduc de la municipalité. Chaque tronçon est délimité par un noeud situé aux deux extrémités du tronçon. Un fichier qui contient la liste des noeuds avec

leurs coordonnées (x,y,z) a aussi été fourni.

Pour compléter ce fichier original afin qu'il contienne toutes les données nécessaires à notre étude, nous avons dû utiliser plusieurs sources de données. Pour l'uniformisation des noms de rues, un fichier contenant la bonne toponymie des noms de rues a été fourni. Les types de sol et les types d'occupation du sol ont été obtenus à partir de cartes informatiques conçues avec le logiciel AutoCad^{MD}. En effectuant une recherche géométrique avec les coordonnées des noeuds de chaque tronçon, il a été possible d'associer un type de sol et un type d'occupation du sol à la majorité des tronçons. Il y a sept types de sol sur la carte qui ont été regroupés en trois types de sol pour l'analyse (1= zones 3 et 3A de la carte (argile); 2=zones 4,5 et 6 (sable); 3=zones 2 (till)). Les types d'occupation du sol sont au nombre de quatre (résidentiel, commercial, industriel et mixte (industriel et commercial)). Le type de matériau et l'année d'installation d'un tronçon sont obtenus à partir du code de matériau contenu dans le fichier aqueduc. Les types de matériau sont au nombre de six (FG=fonte grise; FD=fonte ductile; HYP=Hyprescon (béton-acier); PVC; CU=cuivre; AC=acier). Par exemple, si le code de matériau est "FG70", alors le type de matériau est "FG" (fonte grise) et l'année d'installation est 1970. Pour l'année d'installation, certains codes de matériau donnaient un intervalle de temps. L'année centrale de cet intervalle a été choisi arbitrairement. Par exemple, si le code de matériau est "PVC9095", le type de matériau est "PVC" et l'année d'installation est 1993. Il est à noter que nous ne connaissons aucune année d'installation avant 1950.

Le fichier original des 7235 bris contenait les données suivantes: (1) la date du bris; (2) le type de bris (e.g. conduite principale, entrée de service, borne fontaine); (3) le numéro civique; (4) le nom de la rue, (5) la nature du bris (e.g. circonférenciel, longitudinal, éclatement), (6) le diamètre, (7) le numéro de feuillet correspondant au plan de la ville, (8) les numéros des deux vannes fermées lors de l'intervention. Seuls les bris survenus sur des conduites principales sont conservés. Il reste donc 5247 bris pour l'analyse. Le lien avec le fichier aqueduc se fait par les numéros de vannes. Un fichier contenant les numéros de vannes avec les tronçons correspondants a aussi été fourni. On

associe donc un bris à un tronçon d'aqueduc en passant par les numéros de vannes. Seulement 3132 bris ont pu être liés.

La création d'un lien entre les bris et le réseau d'aqueduc pour la municipalité D a soulevé plusieurs problèmes importants. Premièrement, la méthode utilisée pour faire le lien n'était pas la même que pour les autres municipalités-témoins. En effet, il n'était pas possible de localiser un bris par son adresse car il n'y a aucune référence aux numéros civiques dans le fichier AQUEDUC. Pour la majorité des bris, nous connaissons le nom de la rue au-dessus ainsi que les numéros d'identification de deux vannes qui ont été fermées lors de l'intervention par les employés de la ville. Puisque nous connaissons les numéros de tronçons sur lesquelles sont les vannes (A et B), nous connaissons les deux tronçons A et B qui délimitent la portion du réseau "isolée" pendant l'intervention. Tous les tronçons qui se situent alors entre les tronçons A et B et sur la même rue que le bris, forment un groupe de tronçons probables où a lieu le bris. Nous avons eu beaucoup de difficultés à identifier les tronçons probables sur lesquels ont lieu les bris parce que les vannes associées à un bris n'isolent pas toujours une partie du réseau (réseau maillé). Il était donc très difficile d'identifier le chemin le plus probable entre deux vannes. Nous avons réussi à localiser 3578 bris avec cette méthode. À ce point, il n'est pas possible de connaître plus précisément lequel de ces tronçons probables a réellement subi le bris. Pour les besoins de l'analyse, il est essentiel que les bris soient associés à un tronçon **unique** du réseau d'aqueduc. Nous avons donc choisi de créer de nouveaux tronçons normalisés à partir des groupes de tronçons probables, selon certaines règles statistiques. Cette opération a permis de lier 3131 bris avec un tronçon unique normalisé. Par contre, l'ajout de ces nouveaux tronçons rend l'analyse plus difficile à cause de la disparité entre les tronçons originaux et les nouveaux tronçons (prenons par exemple la longueur des nouveaux tronçons qui est beaucoup plus grande que les tronçons d'origine). C'est pourquoi il n'a pas été possible d'uniformiser les données au même niveau que les autres municipalités-témoins. Les données nécessaires au calcul des statistiques de base ne sont pas complètes et celles utiles à la modélisation (*e.g.* les années d'installation, le nombre de bris antérieurs) sont grossières.

4.1.5 Municipalité E

La municipalité E possède une base de données sur ACCESS utilisée pour son programme de rinçage RinCad^{MD}. Les informations suivantes se trouvent dans la base et sont utiles à l'étude: (1) numéro de tronçon; (2) numéro de secteur; (3) noeuds; (4) diamètre; (5) longueur; (6) type de matériau; (7) âge; et (8) coefficient Hazen-Williams. Les noeuds font partie de la description du réseau utile au modèle de rinçage. Un tronçon est localisé par deux noeuds, et un noeud par des coordonnées (x, y, z). La localisation du tronçon a été déduite à partir de la localisation des deux noeuds le définissant, car ces noeuds sont localisés par rapport à la voirie (e.g. si le tronçon est défini par les noeuds #164 et #176 et que le noeud #164 est sous la 120^{ième} rue et le noeud #176 est à l'intersection de la 120^{ième} rue et la 8^{ième} avenue, alors le tronçon est sous la 120^{ième} rue). La municipalité est divisée en deux secteurs, est et ouest, qui étaient jusqu'à tout récemment deux municipalités distinctes. Tous les diamètres, longueurs et types de matériau étaient présents dans la base. Il manquait quelques âges que le gestionnaire de réseau a pu compléter. Le coefficient Hazen-Williams est utile au modèle de rinçage et nous avons décidé de le garder comme "autres données disponibles" pour cette municipalité. Les seuls éléments à ajouter à la base sont les types de sol et d'occupation du sol que le gestionnaire de réseau nous a fourni à partir de ces connaissances sur la municipalité.

La base de données des bris telle que fournie par le gestionnaire de réseau contient: (1) numéro de fuite; (2) noeuds; (3) secteur; (4) date; (5) tronçon; (6) numéro civique; et (7) nom de la rue.

4.2 Analyses statistiques de base

Cette section présente les statistiques de base concernant les caractéristiques du réseau et l'historique des bris pour les cinq municipalités-témoins. Il est à noter que les statistiques de base sur les caractéristiques des réseaux sont présentées par tronçon et que le nombre total de tronçons est celui du réseau original en 1996, c'est-à-dire sans prendre en compte les remplacements de tronçons. D'ailleurs les efforts de remplacement sont très limités en terme de nombre de

kilomètres. Les taux de bris présentés sont le rapport du nombre de bris observés durant la période d'observation (historique de bris à notre disposition) par le nombre de tronçons compris dans une catégorie. Par exemple, le taux de bris par type de matériau pour la municipalité A fait le rapport entre le nombre de bris observés entre 1976 et 1996 sur des tronçons en fonte grise par rapport au nombre total de tronçons en fonte grise en 1996. Il est important de constater que les comportements observés en terme de caractéristiques de réseau sont intimement reliés à l'image de la municipalité en 1996 et que les comportements observés en terme de taux de bris sont intimement liés à la fenêtre d'observation. De plus, les caractéristiques ne peuvent être comptabilisées dans les statistiques de base que si le bris a pu être associé à un tronçon unique. Les bris qui n'ont pu être liés n'apparaissent donc pas dans ces analyses.

4.2.1 Municipalité A

La municipalité A dessert une population d'environ 64 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 352 km, incluant les rangs agricoles. Le fichier AQUEDUC utilisé pour le calcul des statistiques de base contient 2096 tronçons et le fichier BRIS, 1719 bris pour la durée de l'historique de 21 ans. La Figure 4.1 présente le nombre total de tronçons dans la municipalité A depuis la pose du premier tronçon en 1891. La municipalité a connu une grande croissance en 1949 puis une croissance assez stable du milieu de la décennie 1950 jusqu'en 1990. Depuis 1990, la croissance est moins importante. La Figure 4.2 présente l'historique de bris à notre disposition pour l'étude. Il est clair que la tendance du nombre de bris est à la hausse. Le réseau est composé de tronçons de diamètre variant de 0.025 m (1 pouce) à 0.500 m (20 pouces). Le diamètre le plus utilisé est de 0.150 m (6 pouces), dans une proportion de 72.4% des tronçons. La Figure 4.3 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une grande majorité de tronçons (84.8%) a un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m. La Figure 4.4 présente les taux de bris par intervalles de diamètres. Le taux de bris décroît avec un accroissement du diamètre. Les petits diamètres (inférieurs à 0.1 m) ont le taux de bris le plus élevé, près de 1 bris/tronçon, ce qui signifie qu'en moyenne presque chaque tronçon a subi un bris pendant la période d'observation. Les tronçons de diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m ont un taux un peu

moins élevé (0.86) tandis que les plus grands diamètres ont un taux nettement inférieur (0.18). Ces résultats sont en accord avec les observations relevées dans la littérature, comme quoi les plus petits diamètres subissent plus de bris, probablement à cause de la plus petite épaisseur des parois. Les proportions de bris sont semblables à la représentativité des différents intervalles de diamètres sur le réseau : 3.0% des bris ont lieu sur des diamètres inférieurs à 0.1 m qui représentent 2.5% des tronçons du réseau; 88.8% des bris sur des diamètres de 0.1 à 0.2 m pour 84.8% des tronçons; 6.9% des bris sur des diamètres de 0.2 à 0.3 m pour 9.3% des tronçons; 1.1% des bris sur des diamètres de 0.3 à 0.4 m pour 3.1% des tronçons; et 0.2% des bris sur des diamètres de 0.4 à 0.5 m pour 0.8% des tronçons.

La longueur moyenne des tronçons dans la municipalité A est de 168 m. La Figure 4.5 présente la répartition des longueurs. La très grande majorité des tronçons a une longueur inférieure à 500 m (95%). Les très longs tronçons (> 1000 m) sont généralement situés en périphérie et dans les rangs agricoles. Les tronçons de longueur inférieure à 500 m se répartissent comme illustré à la Figure 4.6. La Figure 4.7 présente le taux de bris par intervalles de longueurs. On remarque que le taux de bris augmente avec la longueur. Les plus longs tronçons subissent donc plus de bris, en moyenne près de 4 bris/tronçon, à comparer à 0.2 bris/tronçon en moyenne pour les tronçons les plus courts. Il est à noter que 73.5% des bris se produisent sur les tronçons de longueur < 500 m alors que ces tronçons représentent 95% des tronçons du réseau. 24.8% des bris se produisent sur les tronçons de 500 à 1000 m alors qu'ils ne représentent que 4.5% des tronçons et 1.7% des bris se produisent sur les tronçons > 1000 m alors que ceux-ci ne représentent que 0.5% des tronçons du réseau. Il est clair que plus un tronçon est long, plus il est probable d'observer un taux de bris élevé et plus la proportion des bris sera grande par rapport au pourcentage de tronçons dans cet intervalle.

La Figure 4.8 présente la répartition des tronçons selon leurs périodes d'installation. Les années d'installation ont été regroupées en quatre périodes, représentant les différentes périodes d'urbanisation au Québec [cf. INRS-Urbanisation]. Les périodes 1945-1960 et 1961-1975 ont été

les plus productives en terme d'installation de tronçons (35.5% et 32.5%). La période récente montre une certaine perte de vitesse par rapport aux deux périodes précédentes (24.3%). La Figure 4.9 montre le taux de bris par périodes d'urbanisation. Le taux de bris est le plus élevé pour la période 1961-1975, avec une valeur de 1.40 bris/tronçon. En effet, bien que 32.5% des tronçons ait été posés durant cette période, ils présentent une plus forte proportion des bris (55.3%). La proportion des bris durant les trois autres périodes est inférieure à la proportion de tronçons installés durant ces périodes (4.5% de bris pour 7.7% des tronçons avant 1945; 27.2% de bris pour 35.5% des tronçons en 1945-1960; 13.0% de bris pour 24.3% des tronçons en 1976-1996). Cette figure semble suggérer que les tronçons les plus âgés ne sont pas ceux qui brisent le plus et que la période d'installation (matériau, technique de manufacture, technique de pose, etc.) a une grande influence sur le taux de bris.

La Figure 4.10 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. La majorité des tronçons est en fonte grise (55.9%), suivie de la fonte ductile (32.1%) puis du PVC (12.1%). Tel que mentionné auparavant, la fonte grise a été utilisée jusqu'au début des années 70 puis elle a été remplacée par la fonte ductile. Vers le début des années 80, le PVC a remplacé la fonte ductile pour les tronçons de moins de 0.3 m. La Figure 4.11 montre le taux de bris par type de matériau. La fonte grise a le plus haut taux de bris avec, en moyenne, 1.06 bris/tronçon. 72.2% de tous les bris ont eu lieu sur des tronçons en fonte grise alors que leur proportion par rapport au réseau est de 55.9%. La fonte ductile et le PVC ont une plus faible proportion de bris par rapport à leur représentation sur le réseau (27.0% de bris sur la fonte ductile par rapport à 32.1% du réseau et 0.8% de bris sur le PVC par rapport à 12.1% du réseau). Bien qu'il appert que la fonte ductile et le PVC vieillissent "mieux" que la fonte grise, il ne faut pas oublier que la fonte grise est plus âgée et donc qu'elle a une plus grande probabilité d'avoir atteint une phase de vieillissement où les bris sont plus fréquents.

La Figure 4.12 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La grande majorité des tronçons (85.3%) se trouve en zone de faible densité ou résidentielle.

Seulement, une très faible proportion du réseau se trouve en zone agricole (3.3%) ou industrielle (0.8%). La Figure 4.13 présente le taux de bris par type d'occupation du sol. Le taux de bris le plus élevé est en zone agricole avec une valeur de 4.95 bris/tronçon. Il est à noter qu'une forte proportion des tronçons les plus longs est dans cette zone. Bien que 85.3% des tronçons sont en zone résidentielle, seulement 66.7% de bris y ont lieu. La proportion de bris en zones commerciale (12.7%) et industrielle (0.9%) sont semblables à leur représentativité sur le réseau (10.6% et 0.8% respectivement). Les zones agricoles, quant à elles, ont une proportion beaucoup plus élevée de bris que l'indiquerait leur proportion de réseau (19.6% des bris sur 3.3% du réseau). Le gestionnaire du réseau nous avait par ailleurs indiqué que la municipalité devait souvent intervenir en secteur agricole.

La Figure 4.14 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de rue. La plus grande proportion de tronçons (59.3%) se retrouve sous une rue de type résidentiel avec la plus faible gradation de trafic. 2.8% des tronçons sont sous une rue de type rang agricole et 8.4% sous un boulevard. La Figure 4.15 montre le taux de bris par type de rue. Le taux de bris le plus élevé est dans les rangs, avec 4.05 bris/tronçon en moyenne, suivi des boulevards avec 1.81 bris/tronçon. La proportion de bris dans les rues de type résidentiel (2 à 6) est de 67.4% de tous les bris, bien que ce type de rue représente 88.5% des tronçons. Ce sont les boulevards et les rangs qui ont une proportion plus forte de bris que leur représentativité du réseau (18.7% des bris sous des boulevards pour 8.4% de réseau; et 13.9% des bris sous des rangs pour 2.8% du réseau). Plusieurs explications sont possibles : les perturbations à cause du trafic sur les boulevards, le passage de poids lourds, la perméabilité de la chaussée dans les rangs, etc..

4.2.2 Municipalité B

La municipalité B dessert une population d'environ 58 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 305 km. Le fichier AQUEDUC contient 2038 tronçons et le fichier BRIS, 536 bris durant la période d'observation de 7 ans. La Figure 4.16 présente le nombre total de tronçons dans la municipalité B depuis la pose du premier tronçon vers 1911. Cette municipalité a connu une

croissance assez stable du début des années '40 jusqu'en 1990. Depuis 1990, la croissance est moins importante. La Figure 4.17 présente l'historique de bris à notre disposition pour l'étude. L'historique de bris est très court et aucune tendance n'est observée. Le réseau est composé de tronçons de diamètre variant de 0.025 m (1 pouce) à 0.600 m (24 pouces). Le diamètre le plus utilisé est de 0.150 m (6 pouces), avec 53.1% des tronçons du réseau. La Figure 4.18 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (69.2%) a un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m et une proportion non-négligeable (23.2%) a un diamètre compris entre 0.2 et 0.3 m. La Figure 4.19 présente les taux de bris par intervalles de diamètres. Le taux de bris décroît avec un accroissement du diamètre, sauf pour l'intervalle 0.4 à 0.5 m. Les petits diamètres (inférieurs à 0.1 m) ont le taux de bris le plus élevé, avec 0.40 bris/tronçon. La proportion de bris sur les diamètres de 0.1 à 0.2 m (81.6%) est supérieure à la représentativité de cet intervalle sur le réseau (69.2%). La proportion de bris sur les diamètres 0.2 à 0.3 m (11.6%) est inférieure à leur représentativité sur le réseau (23.2%)

La longueur moyenne des tronçons dans la municipalité B est de 150 m. La Figure 4.20 présente la répartition des longueurs. La presque totalité des tronçons a une longueur inférieure à 500 m (97.8%). Une grande partie des tronçons a même une longueur inférieure à 200 m (79%). La Figure 4.21 présente le taux de bris par intervalles de longueurs. On remarque encore que le taux de bris augmente généralement avec la longueur, sauf pour les deux derniers intervalles (> 500 m). Le plus haut taux de bris est pour l'intervalle 400 à 500 m, avec une valeur de 0.60 bris/tronçon en moyenne. La proportion de bris des tronçons de longueur inférieure à 100 m (23%) est inférieure à la représentativité de ceux-ci sur le réseau (50.1%), tandis que la proportion de bris des tronçons de longueur 100 à 200 m (33.1%) est semblable à la représentativité de ceux-ci sur le réseau (28.9%). Les proportions de bris des tronçons de 200 à 300 m (29%), de 300 à 400 m (7.8%) et de 400 à 500 m (4%) sont inférieures à leur représentativité sur le réseau (13.3%, 3.8% et 1.7%).

La Figure 4.22 présente la répartition des tronçons selon leurs périodes d'installation. La pose de

tronçons a été semblable durant les périodes 1945-1960, 1961-1975 et 1976-1996 (autour de 26%), avec un maximum dans la période 1945-1960. La Figure 4.23 montre le taux de bris par périodes d'urbanisation. Le taux de bris est le plus élevé pour la période 1945-1960, avec une valeur de 0.43 bris/tronçon. Le taux de bris est semblable pour les périodes avant 1945 et 1961-1975. La proportion de bris durant la période 1945-1960 (44.7%) est supérieure à la représentativité de ces tronçons sur le réseau (27.3%). La proportion de bris durant la période récente (10.1%) est inférieure à la proportion de tronçons installés durant cette période (26.2%).

La Figure 4.24 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. La fonte grise et le PVC dominant sur le réseau. Il y a très peu de fonte ductile. On remarque l'utilisation du matériau "Hyprescon". La Figure 4.25 montre le taux de bris par type de matériau. La fonte ductile a le plus haut taux de bris avec, en moyenne, 0.50 bris/tronçon. 65.7% de tous les bris ont eu lieu sur des tronçons en fonte grise alors que leur proportion par rapport au réseau est de 49%. La fonte ductile représente 12.5% des bris pour 6.6% du réseau. Le PVC a une plus faible proportion de bris (21.2%) par rapport à sa représentativité sur le réseau (43%).

La Figure 4.26 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La grande majorité des tronçons (89.7%) se trouve en zone résidentielle. La Figure 4.27 présente le taux de bris par type d'occupation du sol. Le taux de bris est plus élevé en zone résidentielle, avec une valeur de 0.28 bris/tronçon. Les proportions de bris sont semblables pour toutes les zones par rapport à leur représentativité sur le réseau (93.8% de bris par rapport à 89.7% de tronçons en zone résidentielle; 6.2% de bris par rapport 9.1% en zone commerciale; et un pourcentage négligeable de bris par rapport à 1.2% de tronçons en zone industrielle).

4.2.3 Municipalité C

La municipalité C dessert une population d'environ 93 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 407 km. Le fichier AQUEDUC contient 1554 tronçons et le fichier BRIS, 1426 bris durant la période d'observation de 16 ans. La Figure 4.28 présente le nombre total de tronçons

dans la municipalité C depuis la pose du premier tronçon vers 1945. Cette municipalité a connu une croissance importante au début des années '70 et au milieu des années '80. Depuis 1990, la croissance se poursuit. La Figure 4.29 présente l'historique de bris à notre disposition pour l'étude. Il est clair que la tendance du nombre de bris est à la hausse. Le réseau est composé de tronçons de diamètre variant de 0.050 m (2 pouces) à 0.9 m (36 pouces). Les diamètres les plus utilisés sont des 0.150 m (6 pouces) et 0.2 m (8 pouces), avec 33.1% et 38.7% des tronçons respectivement. La Figure 4.30 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (71.8%) a un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m et une proportion non-négligeable (20.8%) a un diamètre compris entre 0.2 et 0.3 m. La Figure 4.31 présente les taux de bris par intervalles de diamètres. Le taux de bris décroît avec un accroissement du diamètre jusqu'à 0.4 m. Il est à noter que l'échantillon pour les deux derniers intervalles est restreint (26 et 8 tronçons), ce qui rend leur taux de bris autour de 0.75 peu représentatif. Les petits diamètres (inférieurs à 0.1 m) ont le taux de bris le plus élevé, avec 1.51 bris/tronçon et le taux le plus bas (0.19) est observé sur les diamètres de 0.3 à 0.4 m. En négligeant les taux de bris des deux derniers intervalles qui sont peu représentatifs, ces résultats sont toujours en accord avec les observations relevées dans la littérature. Les proportions de bris sont supérieures à la représentativité des intervalles de diamètres pour les petits diamètres : 57% des bris ont lieu sur des diamètres inférieurs à 0.1 m qui représentent 3.5% des tronçons du réseau; et 80.5% des bris ont lieu sur des diamètres de 0.1 à 0.2 m alors que ceux-ci représentent 71.8% des tronçons. Les proportions de bris sont inférieures à la représentativité des intervalles de diamètres 0.2 à 0.3 m et 0.3 à 0.4 m : 11.7% des bris sur 20.8% des tronçons de 0.2 à 0.3 m et 0.3% des bris pour 1.7% des tronçons de 0.3 à 0.4 m. Les deux derniers intervalles ont des proportions de bris semblables à leur représentativité sur le réseau (1.4% de bris pour 1.7% des tronçons et 0.4% de bris pour 0.5% des tronçons, respectivement).

La longueur moyenne des tronçons dans la municipalité C est de 262 m. La Figure 4.32 présente la répartition des longueurs. La très grande majorité des tronçons a une longueur inférieure à 500 m (92.7%). Il y a peu (0.7%) de très longs tronçons (> 1000 m). Les tronçons de longueur

inférieure à 500 m se répartissent comme illustré à la Figure 4.33. La Figure 4.34 présente le taux de bris par intervalles de longueurs. On remarque que le taux de bris augmente avec la longueur pour les deux premiers intervalles, le dernier intervalle (> 1000 m) représentant un échantillon très faible (11 tronçons). Les longs tronçons subissent donc plus de bris, en moyenne près de 1.36 bris/tronçon, à comparer à 0.88 bris/tronçon en moyenne pour les tronçons les plus courts. La proportion de bris des tronçons de longueur < 500 m (88.9) est inférieure à la représentativité de ceux-ci sur le réseau (92.7%). Les proportions de bris des longs tronçons sont supérieures à leur représentativité sur le réseau (9.7% de bris pour 6.6% des tronçons pour les longueurs 500 à 1000 m; et 1.4% de bris pour 0.7% des tronçons pour les longueurs > 1000 m). Tel que mentionné pour la municipalité A, il est clair que plus un tronçon est long, plus il est probable d'observer un taux de bris élevé et une plus grande proportion de bris.

La Figure 4.35 présente la répartition des tronçons selon leurs périodes d'installation. La période 1961-1975 a été la plus productive en terme d'installation de tronçons (43.8%). La période récente montre une certaine perte de vitesse par rapport à la période précédente (32.8%). La Figure 4.36 montre le taux de bris par périodes d'urbanisation. Les taux de bris sont les plus élevés pour les périodes 1945-1960 et 1961-1975, avec des valeurs de 1.4 et 1.27 bris/tronçon. Les proportions de bris durant ces deux périodes (35.6% et 60.8%) sont supérieures à leur représentativité sur le réseau (23.3% et 43.8%). La proportion de bris durant la période récente (3.6%) est inférieure à la proportion de tronçons installés durant cette période (32.8%). Cette figure suggère que les tronçons installés entre 1945 et 1975 (une période de 30 ans) ont le même comportement en terme de taux de bris (autour de 1.3) malgré le fait qu'ils n'ont pas du tout le même âge.

La Figure 4.37 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. Il y a environ la même proportion de tronçons en fonte grise qu'en fonte ductile. La Figure 4.38 montre le taux de bris par type de matériau. La fonte grise a le plus haut taux de bris avec, en moyenne, 1.64 bris/tronçon. 72.2% de tous les bris ont eu lieu sur des tronçons en fonte grise alors que leur

proportion par rapport au réseau est de 40.2%. La fonte ductile et le PVC ont une plus faible proportion de bris par rapport à leur représentativité sur le réseau (26.3% de bris sur la fonte ductile par rapport à 38.9% du réseau et 1.5% de bris sur le PVC par rapport à 20.9% du réseau). Tel que mentionné pour la municipalité A, même si la fonte ductile et le PVC semblent vieillir “mieux” que la fonte grise, il ne faut pas oublier que la fonte grise est plus âgée et donc qu’elle a une plus grande probabilité d’avoir atteint une phase de vieillissement où les bris sont plus fréquents.

La Figure 4.39 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d’occupation du sol. La majorité des tronçons (72.5%) se trouve en zone de faible densité ou résidentiel. La Figure 4.40 présente le taux de bris par type d’occupation du sol. Les taux de bris sont assez semblables bien que le plus élevé est en zone de moyenne et forte densité d’habitation avec une valeur de 1.02 bris/tronçon. Les proportions de bris sont semblables pour toutes les zones par rapport à leur représentativité sur le réseau (72.7% de bris par rapport à 72.5% en zone de faible densité; 18.8% de bris par rapport 16.9% en zone de moyenne et forte densité; et 8.5% de bris par rapport à 10.6% en zone de forte densité).

La Figure 4.41 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de sol. La grande majorité des tronçons (90.6%) se retrouve dans un sol de type argileux. La Figure 4.42 montre le taux de bris par type de sol. Les taux de bris sont semblables pour l’argile et le sable, avec environ 1 bris/tronçon en moyenne. Les proportions de bris sont aussi semblables par rapport à la représentativité sur le réseau (88.9% de bris dans l’argile par rapport à 90.6% des tronçons et 11.1% de bris dans le sable par rapport à 9.4% des tronçons).

4.2.4 Municipalité D

Puisque qu’il est très difficile dans la municipalité D d’associer les bris et les tronçons, et que lorsque cela est possible, le problème de regrouper les caractéristiques de multiples tronçons en un tronçon unique vient compliquer l’analyse, il a été décidé de ne présenter que les statistiques

de base sur les caractéristiques du réseau et non celles sur les taux de bris. La municipalité D dessert une population d'environ 350 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 1424 km. Le fichier AQUEDUC contient 23799 tronçons et le fichier BRIS, 3131 bris liés à des tronçons durant la période d'observation de 11 ans. La Figure 4.43 présente le nombre total de tronçons dans la municipalité D depuis l'année 1950 puisqu'aucune information n'est connue avant cette date. De plus, les années d'installation sont connues à la décennie et plus, c'est pourquoi les points sur le graphique sont si espacés. La Figure 4.44 présente l'historique de bris à notre disposition pour l'étude. L'historique de bris est très court et aucune tendance n'est observée. Le réseau est composé de tronçons de diamètre variant de 0.020 m (environ 1 pouce) à 1.2 m (48 pouces). Le diamètre le plus utilisé est de 0.150 m (6 pouces), avec 47.5% des tronçons du réseau, et de 0.200 m (8 pouces), avec 24.3% du réseau. La Figure 4.45 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (71.8%) a un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m et une proportion non-négligeable (17.1%) a un diamètre compris entre 0.2 et 0.3 m.

La longueur moyenne des tronçons auxquels des bris ont pu être liés est d'environ 60 m. La Figure 4.46 présente la répartition des longueurs. La presque totalité des tronçons a une longueur inférieure à 500 m (99.8%). Une très grande partie des tronçons a même une longueur inférieure à 200 m (95.4%). La Figure 4.47 présente la répartition des tronçons selon leurs périodes d'installation. La pose de tronçons avant 1950 est inconnue. Elle a toujours augmenté durant les périodes 1945-1960, 1961-1975 et 1976-1996. De façon assez surprenante, une grande partie des tronçons a été posée durant la période récente. La Figure 4.48 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. La fonte grise et la fonte ductile dominent sur le réseau. Il y a très peu de PVC, d'"Hyprescon" et d'acier. La Figure 4.49 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La grande majorité des tronçons (90.7%) se trouve en zone résidentielle. La Figure 4.50 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de sol. Une bonne partie des tronçons (65.5%) se retrouve dans un sol de type "till".

4.2.5 Municipalité E

La municipalité E dessert une population d'environ 20 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 155 km. Le fichier AQUEDUC contient 1806 tronçons et le fichier BRIS, 279 bris durant la période d'observation de 10 ans. La Figure 4.51 présente le nombre total de tronçons dans la municipalité E depuis l'année de pose du premier tronçon en 1949. La municipalité a connu une forte croissance en 1978. La Figure 4.52 présente l'historique de bris à notre disposition pour l'étude. L'historique de bris est très court et une faible tendance à la hausse est observée. Le réseau est composé de tronçons de diamètre variant de 0.050 m (2 pouces) à 0.350 m (14 pouces). Le diamètre le plus utilisé est de 0.150 m (6 pouces), avec 62.7% des tronçons du réseau. La Figure 4.53 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (75.6%) a un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m et une proportion non-négligeable (16.7%) a un diamètre compris entre 0.2 et 0.3 m. La Figure 4.54 présente les taux de bris par intervalles de diamètres. Le taux de bris décroît avec un accroissement du diamètre. Les petits diamètres (inférieurs à 0.1 m) ont le taux de bris le plus élevé, avec 0.25 bris/tronçon et le taux le plus bas (environ 0.04) est observé sur les diamètres supérieurs à 0.2 m. La proportion de bris sur les diamètres de 0.1 à 0.2 m (89.2%) est supérieure à la représentativité de cet intervalle sur le réseau (75.6%). Les proportions de bris sur les diamètres 0.2 à 0.3 m (4.3%) et 0.3 à 0.4 m (1.5%) sont inférieures à leur représentativité sur le réseau (16.7% et 4.6%)

La longueur moyenne des tronçons dans la municipalité E est de 86 m. La Figure 4.55 présente la répartition des longueurs. La presque totalité des tronçons a une longueur inférieure à 500 m (99.8%). La très grande majorité des tronçons a même une longueur inférieure à 200 m (96.7%). La Figure 4.56 présente le taux de bris par intervalles de longueurs. On remarque encore que le taux de bris augmente avec la longueur, surtout en négligeant les trois derniers intervalles (> 300 m) qui représentent un échantillon très faible (4 et 5 tronçons). Le plus haut taux de bris (en négligeant les trois derniers intervalles) est de 0.31 bris/tronçon en moyenne. La proportion de bris des tronçons de longueur inférieure à 50 m (19.3%) est inférieure à la représentativité de ceux-ci sur le réseau (37.1%), tandis que la proportion de bris des tronçons de longueur 100 à 200 m

(46.5%) est supérieure à la représentativité de ceux-ci sur le réseau (26.6%).

La Figure 4.57 présente la répartition des tronçons selon leurs périodes d'installation. La période récente (1976-1996) a été la plus productive en terme d'installation de tronçons (59.3%). D'ailleurs, la pose de tronçons a doublé de 1945-1960 à 1961-1975 et puis de 1961-1975 à la période récente. La Figure 4.58 montre le taux de bris par périodes d'urbanisation. Les taux de bris sont les plus élevés pour les périodes 1945-1960 et 1961-1975, avec des valeurs de 0.23 et 0.28 bris/tronçon. Les proportions de bris durant ces deux périodes (20.6% et 48.7%) sont supérieures à leur représentativité sur le réseau (13.8% et 26.8%). La proportion de bris durant la période récente (30.7%) est inférieure à la proportion de tronçons installés durant cette période (59.3%). Cette figure suggère que les tronçons installés entre 1945 et 1975 (une période de 30 ans) ont le même comportement en terme de taux de bris (autour de 0.25) malgré le fait qu'ils n'ont pas du tout le même âge.

La Figure 4.59 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. Il y a plus de tronçons en fonte grise qu'en fonte ductile et très peu d'amiante. La municipalité E est la seule dans cette étude a utilisé des tuyaux d'amiante. La Figure 4.60 montre le taux de bris par type de matériau. La fonte grise a le plus haut taux de bris avec, en moyenne, 0.21 bris/tronçon. 89.1% de tous les bris ont eu lieu sur des tronçons en fonte grise alors que leur proportion par rapport au réseau est de 65.7%. La fonte ductile et l'amiante ont une plus faible proportion de bris par rapport à leur représentation sur le réseau (10.5% de bris sur la fonte ductile par rapport à 32.8% du réseau et 0.4% de bris sur l'amiante par rapport à 1.5% du réseau).

La Figure 4.61 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La majorité des tronçons (82.2%) se trouve en zone de faible densité ou résidentielle. La Figure 4.62 présente le taux de bris par type d'occupation du sol. Les taux de bris sont assez semblables pour les zones résidentielle et commerciale, bien qu'un peu plus élevé en zone commerciale avec une valeur de 0.18 bris/tronçon. Les proportions de bris sont semblables pour toutes les zones par

rapport à leur représentativité sur le réseau (81.3% de bris par rapport à 82.2% de tronçons en zone résidentielle; 16.6% de bris par rapport 14.3% en zone commerciale; et 2.1% de bris par rapport à 3.5% en zone industrielle).

La Figure 4.63 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de sol. La majorité des tronçons (73.3%) est posé sur le roc. La Figure 4.64 montre le taux de bris par type de sol. Les taux de bris sont semblables pour l'argile et le roc, avec environ 0.15 bris/tronçon en moyenne. Les proportions de bris sont aussi semblables par rapport à la représentativité sur le réseau (24.2% de bris dans l'argile par rapport à 26.7% des tronçons et 75.8% de bris dans le sable par rapport à 73.3% des tronçons).

4.3 Schémas-résumés et tableaux comparatifs

Cette section présente des schémas-résumés pour chacune des municipalités-témoins et des tableaux comparatifs afin de mettre en lumière les ressemblances et les différences qui peuvent avoir un impact sur les résultats de modélisation.

4.3.1 Schémas-résumés

La Figure 4.65 présente le schéma-résumé pour la municipalité A. Nous remarquons que la fonte grise fut le premier matériau à être utilisé. Ce matériau n'est pas utilisé dans la période récente, au profit de la fonte ductile et du PVC. Il y a beaucoup plus de tronçons de petits diamètres ($\leq 8"$) que de grands diamètres ($> 8"$). Le plus grand nombre de tronçons a été posé dans la période 1945-1960, suivie de près par la période 1961-1975. La plus grande proportion de bris a lieu sur des tronçons installés durant la période 1961-1975.

La Figure 4.66 présente le schéma-résumé pour la municipalité B. La fonte grise fut le premier matériau à être utilisé pour les petits diamètres et les grands diamètres alors que quelques-uns des tronçons de grands diamètres étaient en Hyperscon. Les seuls tronçons en fonte ductile ont été

installés durant la période 1961-1975. Le PVC est utilisé depuis la période 1961-1975. La fonte grise n'est plus utilisée dans la période récente (1976-1996) alors que l'Hyperscon l'est toujours pour certains tronçons de grands diamètres. Il y a toujours beaucoup plus de tronçons de petits diamètres que de grands diamètres. La pose de tronçons a été semblable durant les quatre périodes d'urbanisation. La plus grande proportion de bris a lieu sur des tronçons installés durant la période 1945-1960.

La Figure 4.67 présente le schéma-résumé pour la municipalité C. Nous remarquons que la fonte grise fut aussi le premier matériau à être utilisé. Ce matériau n'est pas utilisé dans la période récente, au profit de la fonte ductile et du PVC. Il y a beaucoup plus de tronçons de petits diamètres ($\leq 8''$) que de grands diamètres ($> 8''$). Le plus grand nombre de tronçons a été posé dans la période 1961-1975. La plus grande proportion de bris a lieu sur des tronçons installés durant cette même période.

La Figure 4.68 présente le schéma-résumé pour la municipalité D. Les données ne sont pas connues pour les tronçons posés avant 1950. La fonte grise et l'acier sont les premiers matériaux à être répertoriés (période 1945-1960). L'acier est le seul matériau à être utilisé durant les trois périodes répertoriées. La fonte ductile a été installée durant les périodes 1961-1975 et 1976-1996. Le PVC est utilisé depuis la période récente. La fonte grise n'est plus utilisée dans la période récente. Il y a toujours beaucoup plus de tronçons de petits diamètres que de grands diamètres. La pose de tronçons a été la plus forte durant la période récente.

La Figure 4.69 présente le schéma-résumé pour la municipalité E. La fonte grise fut le premier matériau à être utilisé. La fonte ductile est utilisée depuis la période 1961-1975. Le PVC n'est pas utilisé dans la municipalité E au profit de l'amiante (1976-1996). La fonte grise est toujours utilisée dans la période récente (1976-1996). Il y a toujours plus de tronçons de petits diamètres mais avec une tendance dans la période récente à utiliser plus de tronçons de grands diamètres. La pose de tronçons a été la plus forte durant la période récente. La plus grande proportion de bris

a lieu sur des tronçons installés durant la période 1961-1975.

4.3.2 Tableaux comparatifs

Le Tableau 4.1 présente les caractéristiques générales des cinq municipalités-témoins. Le linéaire de réseau varie de 155 km pour la municipalité E à 1424 km pour la municipalité D. La longueur moyenne des tronçons varie de 60 m pour la municipalité D jusqu'à 262 m pour la municipalité C, donc les tronçons dans la municipalité C sont en moyenne 4.4 fois plus longs que dans la municipalité D. Le nombre de bris aux 100 km en 1996 est beaucoup plus élevé dans la municipalité A, suivie de la municipalité D. Il est semblable pour les municipalités B et C et est beaucoup plus bas pour la municipalité E. Le nombre d'années de l'historique de bris pour l'étude est, au mieux, 21 ans pour la municipalité A et au pire, de 7 ans pour la municipalité B. Bien que la municipalité D possède un important échantillon de bris, seulement 3131 bris ont pu être liés, non pas à un tronçon unique mais à une série probable de tronçons, souvent de caractéristiques différentes. Les municipalités B et E ont de très faibles échantillons de bris à comparer aux municipalités A et C, qui sont bien pourvues en données.

Le Tableau 4.2 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par intervalles de diamètres pour les cinq municipalités-témoins. Les pourcentages de tronçons et de bris totaux pour les diamètres inférieurs à 0.1 m sont semblables pour toutes les municipalités-témoins. L'ordre de grandeur des pourcentages de tronçons est le même que les pourcentages de bris. Le pourcentage de tronçons des diamètres 0.1 à 0.2 m est un peu plus élevé dans la municipalité A que dans les autres municipalités. Les pourcentages de bris dans cette catégorie de diamètres sont systématiquement plus élevés que les pourcentages de tronçons pour toutes les municipalités. Cette catégorie de diamètres peut donc être identifiée comme "à risque". Le pourcentage de tronçons de diamètres 0.2 à 0.3 m est plus bas dans la municipalité A que dans les autres municipalités. Les pourcentages de bris sont systématiquement plus bas que les pourcentages de tronçons pour toutes les municipalités. Le pourcentage de tronçons de diamètres 0.3 à 0.4 m est un peu plus élevé dans la municipalité D que dans les autres municipalités. Les

pourcentages de bris dans cette catégorie sont similaires aux pourcentages de tronçons pour toutes les municipalités. Les comportements pour les diamètres supérieurs à 0.4 m sont semblables dans toutes les municipalités-témoins, à l'exception de la municipalité E qui ne possède aucun tronçon dans ces catégories.

Le Tableau 4.3 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par intervalles de longueurs pour les cinq municipalités-témoins. Les pourcentages de tronçons de longueur inférieure à 500 m sont semblables pour toutes les municipalités-témoins. Les pourcentage de bris sont semblables aux pourcentages de tronçons sauf pour la municipalité A où le pourcentage de bris est plus bas, ce qui suggère, qu'en moyenne, les courts tronçons subissent moins de bris dans la municipalité A. Les proportions de tronçons dans la catégorie 500 à 1000 m sont légèrement plus élevées dans les municipalités A et C. Le pourcentage de bris est beaucoup plus élevé par rapport au pourcentage de tronçons dans cette catégorie dans la municipalité A.

Le Tableau 4.4 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par périodes d'urbanisation pour les cinq municipalités-témoins. La municipalité B possède le plus grand pourcentage de tronçons posés avant 1945. Les proportions de bris sont semblables aux proportions de tronçons dans cette catégorie dans les municipalités A et B. Le pourcentage de tronçons installés entre 1945 et 1960 est plus élevé dans la municipalité A et moins élevé dans la municipalité E que dans les autres municipalités-témoins. Les proportions de bris sont toujours plus élevées que les proportions de tronçons, excepté pour la municipalité A. Cette période d'installation peut donc être considérée "à risque". Le pourcentage de tronçons installés entre 1961 et 1975 est plus élevé dans la municipalité C que dans les autres municipalités-témoins. Les proportions de bris sont toujours plus élevées que les proportions de tronçons, excepté pour la municipalité B. Cette période d'installation peut aussi être considérée "à risque". Le pourcentage de tronçons installés entre 1976 et 1996 est plus élevé dans les municipalités D et E que dans les autres municipalités-témoins. Les proportions de bris sont toujours plus basses que les proportions de tronçons, spécialement pour la municipalité C.

Le Tableau 4.5 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par type de matériau pour les cinq municipalités-témoins. Le pourcentage de tronçons en fonte grise est le plus élevé dans la municipalité E. Les proportions de bris sont toujours plus élevées que les pourcentages de tronçons, et ce, pour toutes les municipalités-témoins. Les tronçons en fonte grise sont donc "à risque". Le pourcentage de tronçons en fonte ductile est le plus bas dans la municipalité B. On ne remarque aucune tendance quant à la proportion de bris par rapport aux pourcentages de tronçons. La proportion de PVC est très élevée dans la municipalité B, très basse dans la municipalité D et inexistante dans la municipalité E. Les proportions de bris sont toujours inférieures aux proportions de tronçons dans cette catégorie. La municipalité D est la seule municipalité à utiliser une bonne proportion d'Hyprescon.

Le Tableau 4.6 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par type d'occupation du sol pour les cinq municipalités-témoins. Toutes les municipalités-témoins ont un fort pourcentage de tronçons en zone résidentielle. Le pourcentage est un peu moins fort dans la municipalité C. Les proportions de bris sont semblables aux proportions de tronçons, sauf dans la municipalité A où le pourcentage de bris est plus faible. Les pourcentages de tronçons en zone commerciale sont, en général, semblables, excepté pour la municipalité D où le pourcentage est très faible. Les proportions de bris sont similaires aux proportions de tronçons dans tous les cas. Les pourcentages de tronçons en zone industrielle sont semblables, excepté pour la municipalité C où le pourcentage est élevé. Les proportions de bris sont similaires aux proportions de tronçons dans tous les cas. La municipalité A se distingue par la présence d'une zone agricole avec un pourcentage de tronçons assez bas mais une proportion de bris assez élevé. À part cette zone agricole dans la municipalité A, l'occupation du sol ne semble pas avoir une influence déterminante sur le phénomène de bris.

Le Tableau 4.7 présente les pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentage de bris par type de sol pour les cinq municipalités-témoins. Les municipalités A, B et C ont la très grande majorité de leurs tronçons dans un sol argileux, tandis que les tronçons dans la municipalité D sont plutôt

dans un till et dans la municipalité E, sur le roc. Une partie des tronçons de la municipalité D se retrouve aussi dans un sol sablonneux. Les proportions de bris sont semblables aux proportions de tronçons dans tous les cas.

Tableau 4.1 - Caractéristiques générales des cinq municipalités-témoins

Données	A	B	C	D*	E
Linéaire de réseau en 1996 (km)	352	305	407	1424	155
Nombre de tronçons en 1996	2096	2038	1554	23799	1806
Longueur moyenne d'un tronçon (m)	168	150	262	60	86
Nombre de bris en 1996	159	89	121	517	29
Nombre de bris aux 100 km en 1996	45	29	30	36	19
Nombre d'années de l'historique de bris	21	7	16	11	10
Nombre de bris total pour l'étude	1719	536	1426	5247	279

*Le linéaire de réseau, le nombre de tronçons en 1996 et le nombre de bris en 1996 pour la municipalité D sont tirés du fichier original. La longueur moyenne d'un tronçon est estimée par le rapport entre le linéaire et le nombre de tronçons. Pour la modélisation, elle est estimée à partir des tronçons liés à des bris. Le nombre de bris total pour l'étude est estimé à partir du fichier original auquel sont retranchés les bris sur des équipements autres que les conduites principales.

Tableau 4.2 - Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par intervalles de diamètres

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons $\phi < 0.1$ m	2.5%	3.4%	3.5%	1.9%	3.1%
Taux de bris $\phi < 0.1$ m	0.98	0.40	1.51	n/d	0.25
Pourcentage des bris totaux $\phi < 0.1$ m	3.0%	5.3%	5.7%	n/d	5%
Pourcentage de tronçons $0.1 < \phi < 0.2$ m	84.8%	69.2%	71.8%	71.8%	75.6%
Taux de bris $0.1 < \phi < 0.2$ m	0.86	0.31	1.03	n/d	0.18
Pourcentage des bris totaux $0.1 < \phi < 0.2$ m	88.8%	81.6%	80.5%	n/d	89.2%
Pourcentage de tronçons $0.2 < \phi < 0.3$ m	9.3%	23.2%	20.8%	17.1%	16.7%
Taux de bris $0.2 < \phi < 0.3$ m	0.61	0.13	0.52	n/d	0.04
Pourcentage des bris totaux $0.2 < \phi < 0.3$ m	6.9%	11.6%	11.7%	n/d	4.3%
Pourcentage de tronçons $0.3 < \phi < 0.4$ m	3.1%	2.9%	1.7%	6.2%	4.6%
Taux de bris $0.3 < \phi < 0.4$ m	0.30	0.07	0.19	n/d	0.05
Pourcentage des bris totaux $0.3 < \phi < 0.4$ m	1.1%	0.8%	0.3%	n/d	1.5%
Pourcentage de tronçons $0.4 < \phi < 0.5$ m	0.8%	1.1%	1.7%	0.7%	nég.
Taux de bris $0.4 < \phi < 0.5$ m	0.18	0.17	0.77	n/d	nég.
Pourcentage des bris totaux $0.4 < \phi < 0.5$ m	0.2%	0.7%	1.4%	n/d	nég.
Pourcentage de tronçons $\phi > 0.5$ m	nég.	0.15%	0.5%	2.3%	nég.
Taux de bris $\phi > 0.5$ m	nég.	nég.	0.75	n/d	nég.
Pourcentage des bris totaux $\phi > 0.5$ m	nég.	nég.	0.4%	n/d	nég.

Tableau 4.3 - Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par intervalles de longueurs

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons de longueurs < 500 m	95%	97.8%	92.7%	99.8%	99.8%
Taux de bris L < 500 m	0.64	0.26	0.88	n/d	1.39
Pourcentage des bris totaux L < 500 m	73.5%	96.9%	88.9%	n/d	100%
Pourcentage de tronçons L = 500 à 1000 m	4.5%	1.5%	6.6%	0.2%	0.2%
Taux de bris L = 500 à 1000 m	4.48	0.42	1.36	n/d	nég.
Pourcentage des bris totaux L = 500 à 1000 m	24.8%	2.5%	9.7%	n/d	nég.
Pourcentage de tronçons de longueurs > 1000 m	0.5%	0.7%	0.7%	nég.	nég.
Taux de bris longueurs > 1000 m	2.07	0.21	1.36	nég.	nég.
Pourcentage des bris totaux > 1000 m	1.7%	0.6%	1.4%	nég.	nég.

Tableau 4.4 - Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par périodes d'urbanisation

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons installés avant 1945	7.7%	20%	nég.	inconnu	nég.
Taux de bris A<1945	0.48	0.25	nég.	n/d	nég.
Pourcentage des bris totaux A<1945	4.5%	19.1%	nég.	n/d	nég.
Pourcentage de tronçons installés 1945<A<1960	35.5%	27.3%	23.3%	18.1%	13.8%
Taux de bris 1945<A<1960	0.63	0.43	1.4	n/d	0.23
Pourcentage des bris totaux 1945<A<1960	27.2%	44.7%	35.6%	n/d	20.6%
Pourcentage de tronçons installés 1961<A<1975	32.5%	26.5%	43.8%	36.7%	26.8%
Taux de bris 1961<A<1975	1.40	0.26	1.27	n/d	0.28
Pourcentage des bris totaux 1961<A<1975	55.3%	26.1%	60.8%	n/d	48.7%
Pourcentage de tronçons installés 1976<A<1996	24.3%	26.2%	32.8%	45.2%	59.3%
Taux de bris 1976<A<1996	0.44	0.1	0.1	n/d	0.08
Pourcentage des bris totaux 1976<A<1996	13.0%	10.1%	3.6%	n/d	30.7%

Tableau 4.5 -Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type de matériau

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons en fonte grise	55.9%	49%	40.2%	50%	65.7%
Taux de bris pour la fonte grise	1.06	0.36	1.64	n/d	0.21
Pourcentage des bris totaux en fonte grise	72.2%	65.7%	72.2%	n/d	89.1%
Pourcentage de tronçons en fonte ductile	32.1%	6.6%	38.9%	37.3%	32.8%
Taux de bris pour la fonte ductile	0.69	0.5	0.63	n/d	0.05
Pourcentage des bris totaux en fonte ductile	27.0%	12.5%	26.3%	n/d	10.5%
Pourcentage de tronçons en PVC	12.1%	43%	20.9%	4.4%	-
Taux de bris pour le PVC	0.05	0.13	0.07	n/d	-
Pourcentage des bris totaux en PVC	0.8%	21.2%	1.5%	n/d	-
Pourcentage de tronçons en acier ¹ ou amiante ²	-	-	-	1.2% ¹	1.5% ²
Taux de bris pour l'acier ou l'amiante	-	-	-	n/d	0.04
Pourcentage des bris totaux en acier ou amiante	-	-	-	n/d	0.4%
Pourcentage de tronçons en Hyprescon	-	1.3%	-	7.1%	-
Taux de bris pour l'Hyprescon	-	0.11	-	n/d	-
Pourcentage des bris totaux en Hyprescon	-	0.6%	-	n/d	-

Tableau 4.6 -Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type d'occupation du sol

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons - résidentiel	85.3%	89.7%	72.5%	90.7%	82.2%
Taux de bris - résidentiel	0.65	0.28	0.92	n/d	0.15
Pourcentage des bris totaux - résidentiel	66.7%	93.8%	72.7%	n/d	81.3%
Pourcentage de tronçons - commercial	10.6%	9.1%	16.9%	3.3%	14.3%
Taux de bris - commercial	0.99	0.18	1.02	n/d	0.18
Pourcentage des bris totaux - commercial	12.7%	6.2%	18.8%	n/d	16.6%
Pourcentage de tronçons - industriel	0.8%	1.2%	10.6%	3.1%	3.5%
Taux de bris - industriel	0.94	nég.	0.74	n/d	0.09
Pourcentage des bris totaux - industriel	0.9%	nég.	8.5%	n/d	2.1%
Pourcentage de tronçons - agricole ¹ ou mixte ²	3.3% ¹	-	-	3% ²	-
Taux de bris - agricole	4.95	-	-	n/d	-
Pourcentage des bris totaux - agricole	19.6%	-	-	n/d	-

Tableau 4.7 -Comparaison des pourcentages de tronçons, taux de bris et pourcentages de bris par type de sol

Données	A	B	C	D	E
Pourcentage de tronçons dans un sol argileux	100%	100%	90.6%	10.9%	26.7%
Taux de bris - argile	0.82	0.26	0.9	n/d	0.14
Pourcentage des bris totaux - argile	100%	100%	88.9%	n/d	24.2%
Pourcentage de tronçons dans un sol sablonneux	-	-	9.4%	23.6%	-
Taux de bris - sable	-	-	1.08	n/d	-
Pourcentage des bris totaux - sable	-	-	11.1%	n/d	-
Pourcentage de tronçons sur le till ¹ ou le roc ²	-	-	-	65.5% ¹	73.3% ²
Taux de bris - roc	-	-	-	n/d	0.16
Pourcentage des bris totaux - roc	-	-	-	n/d	75.8%

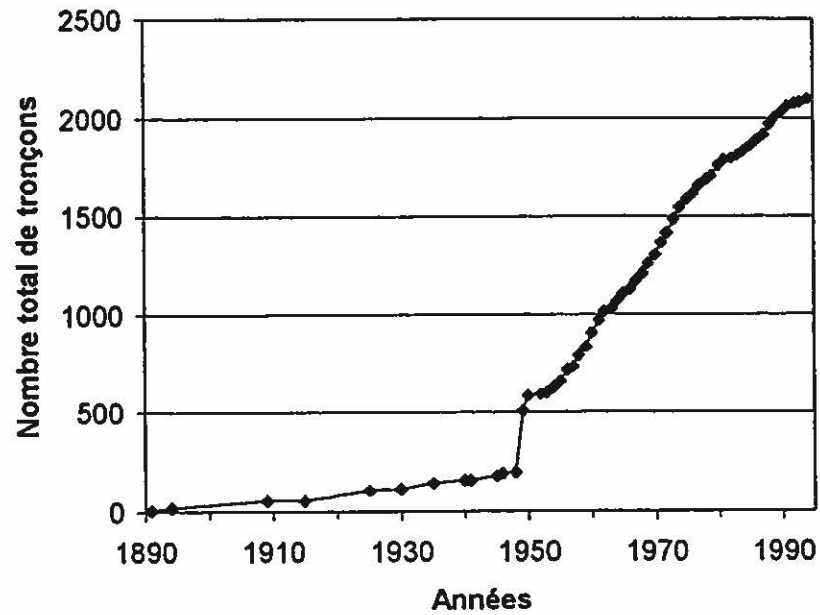


Figure 4.1 Croissance de la municipalité A en terme de tronçons

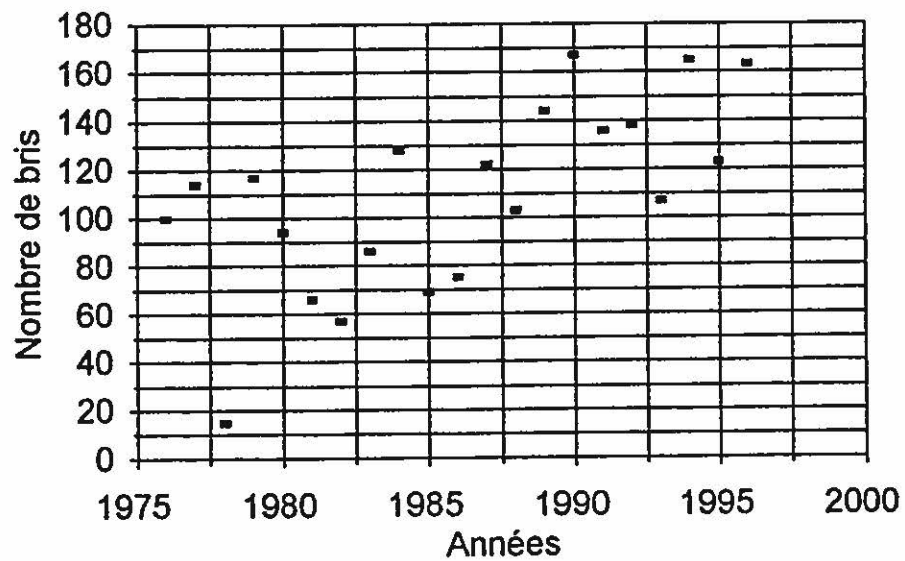


Figure 4.2 Historique de bris pour la municipalité A

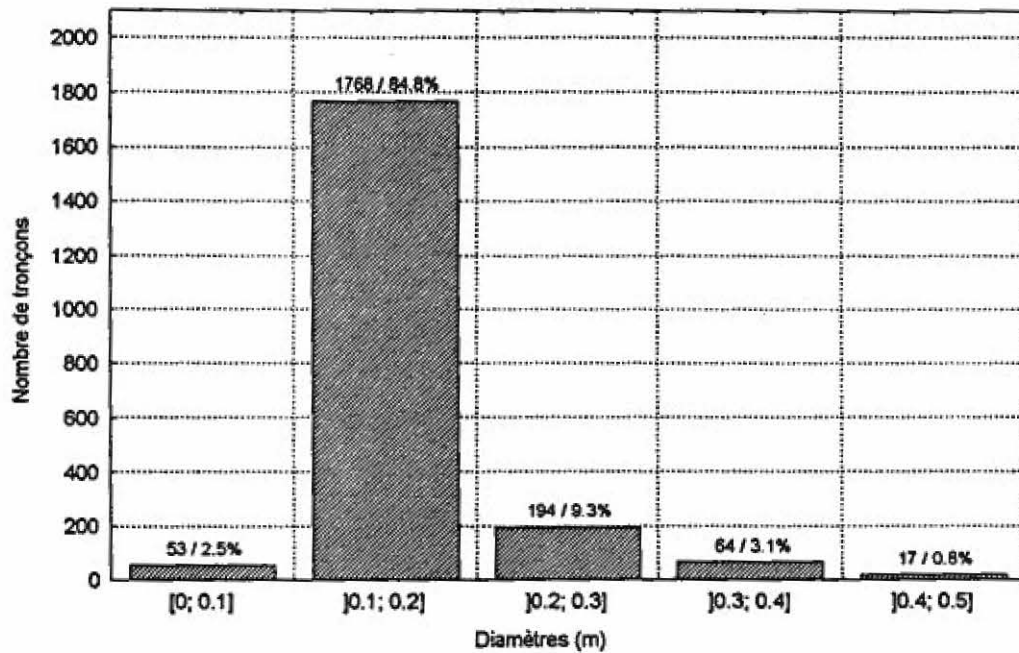


Figure 4.3 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité A

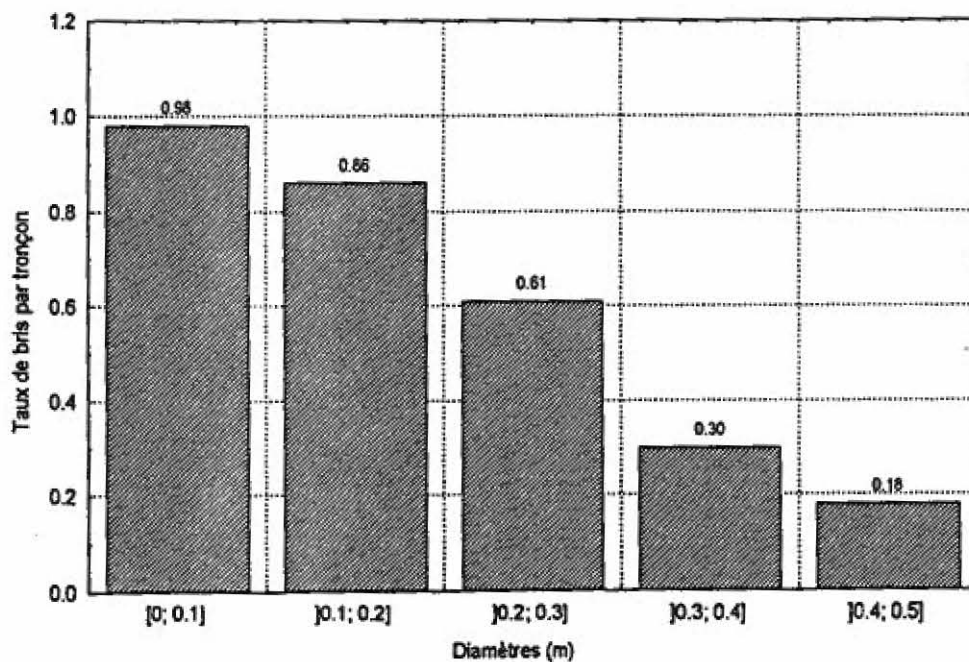


Figure 4.4 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité A

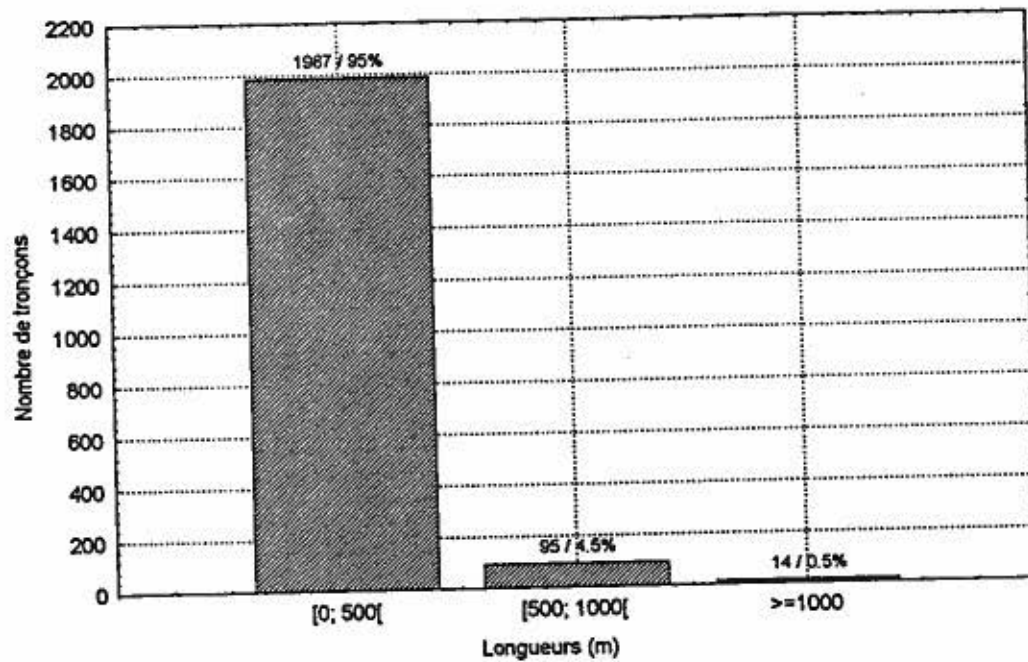


Figure 4.5 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité A

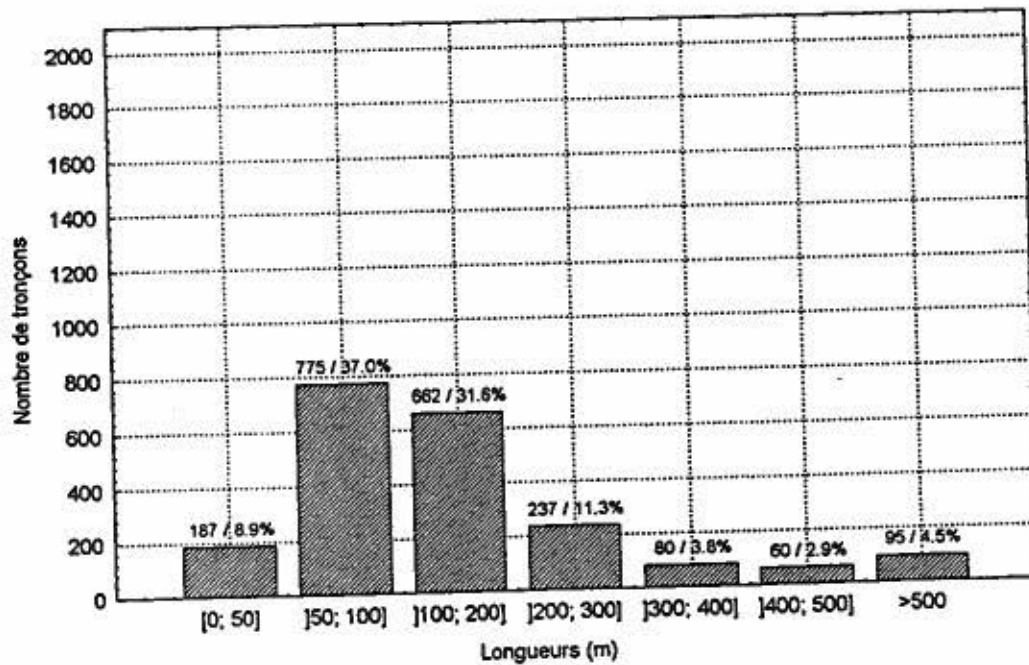


Figure 4.6 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité A

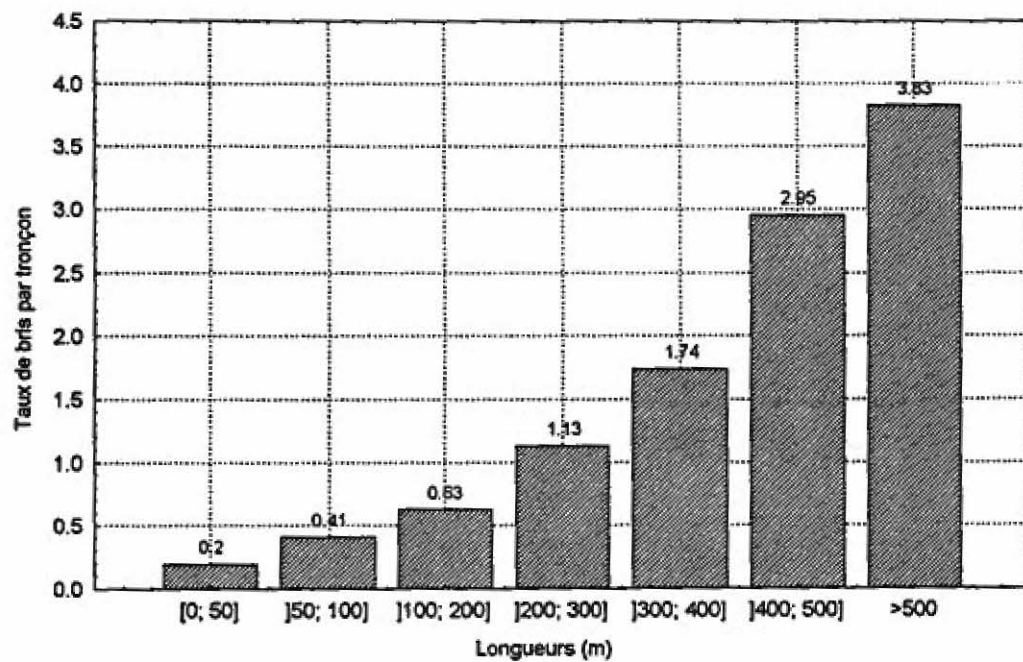


Figure 4.7 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité A

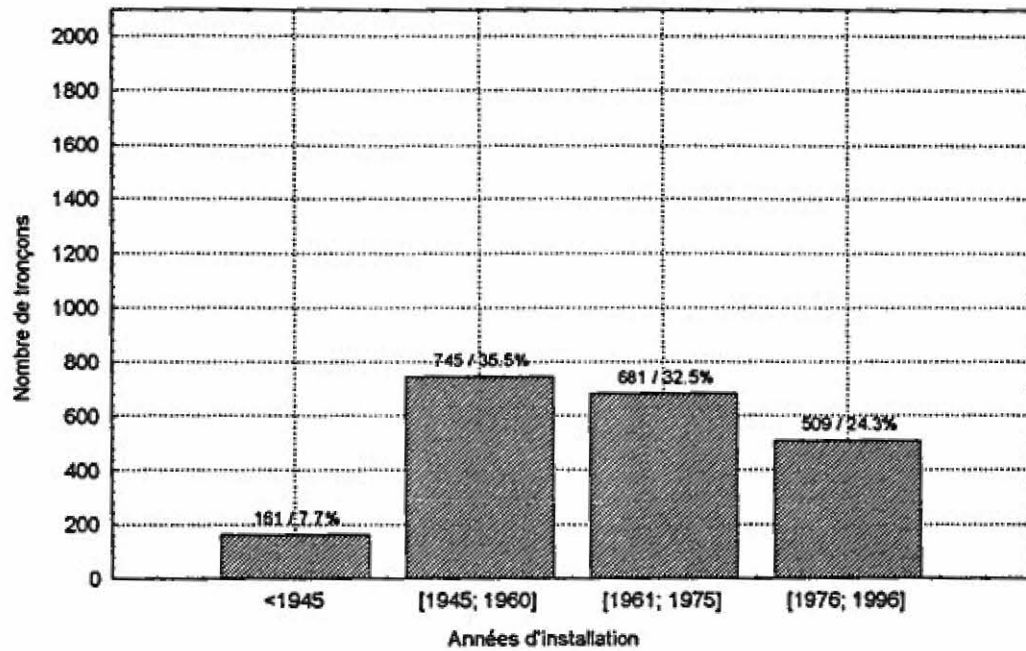


Figure 4.8 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité A

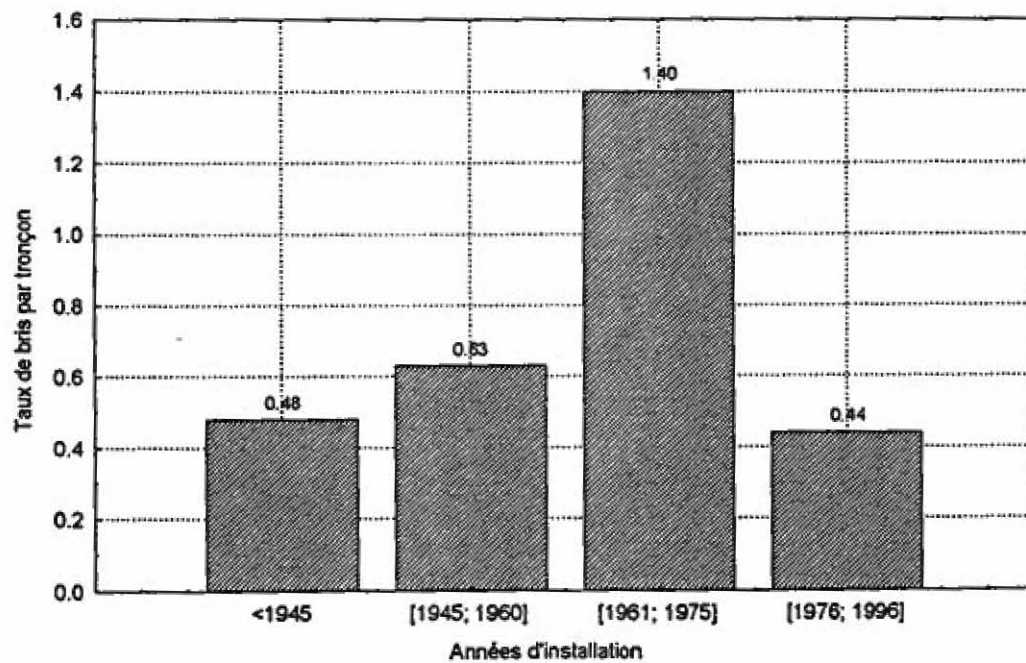


Figure 4.9 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité A

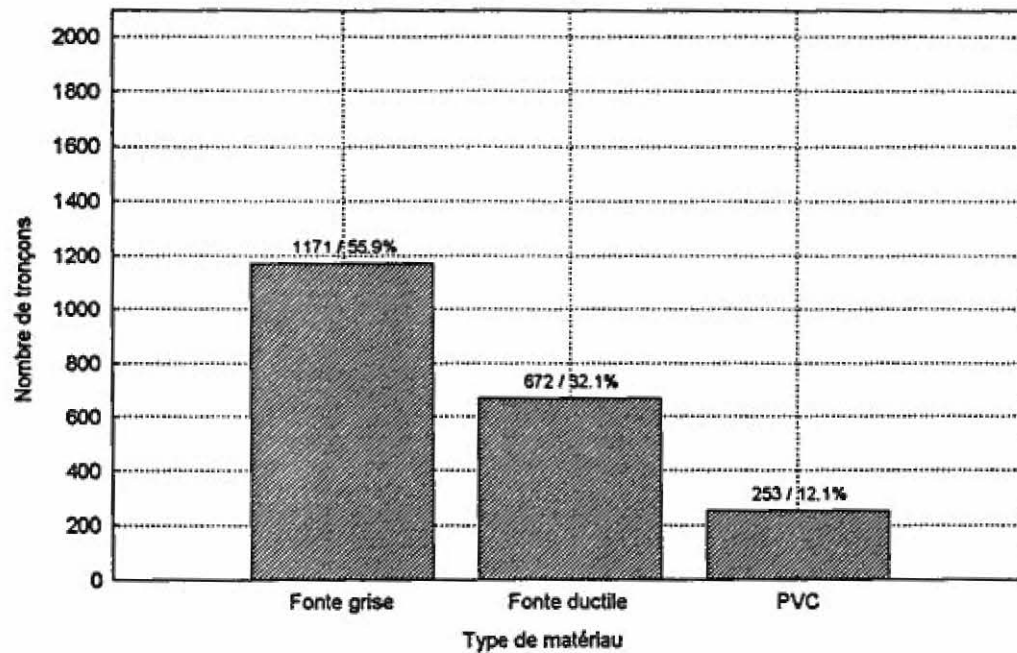


Figure 4.10 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité A

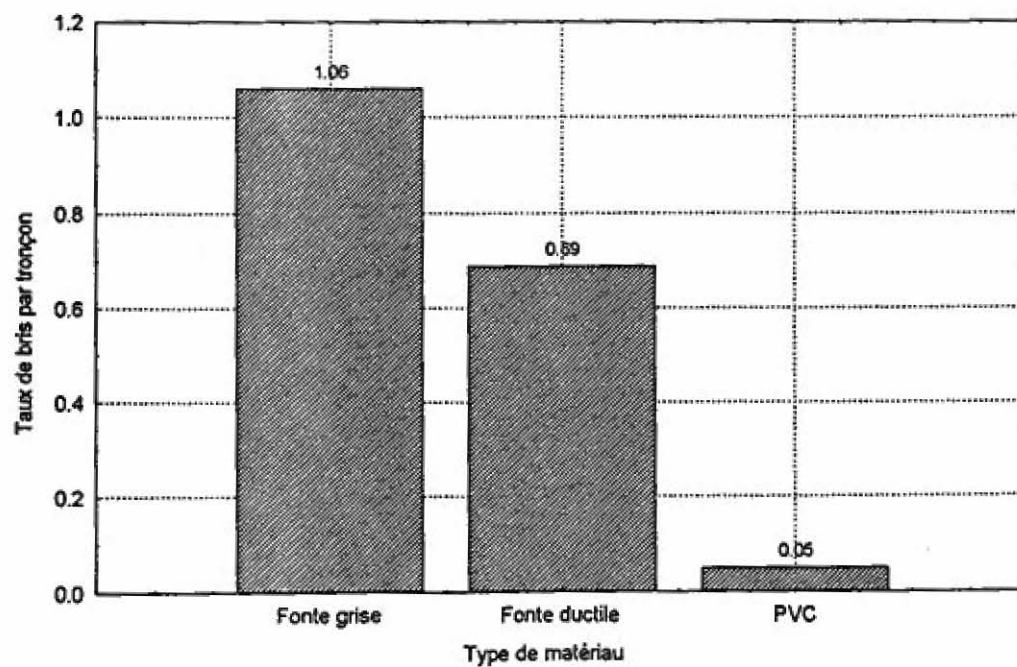


Figure 4.11 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité A

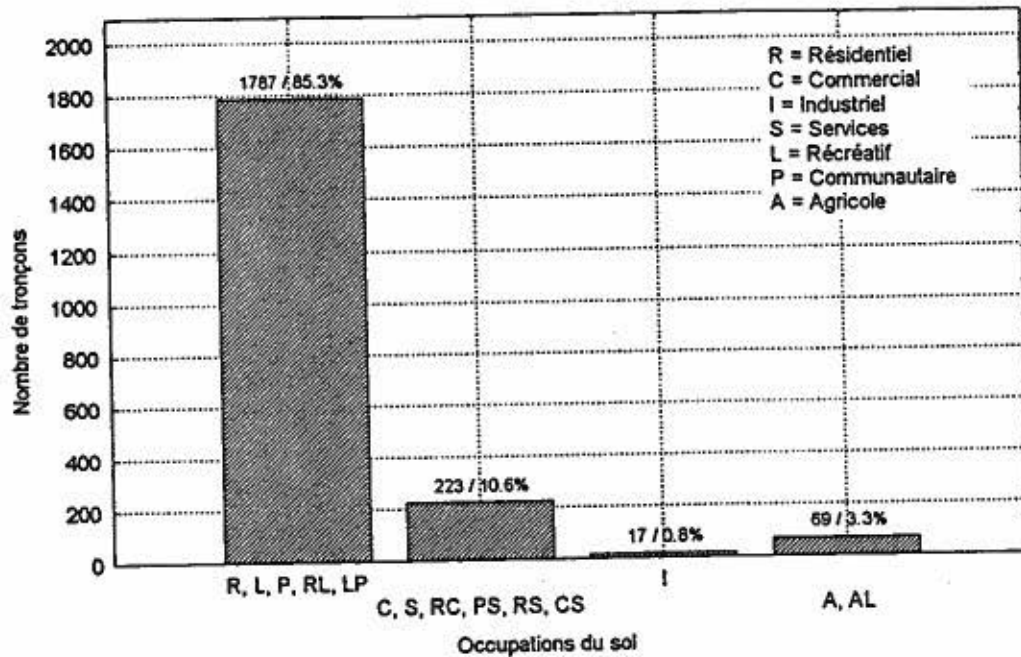


Figure 4.12 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité A

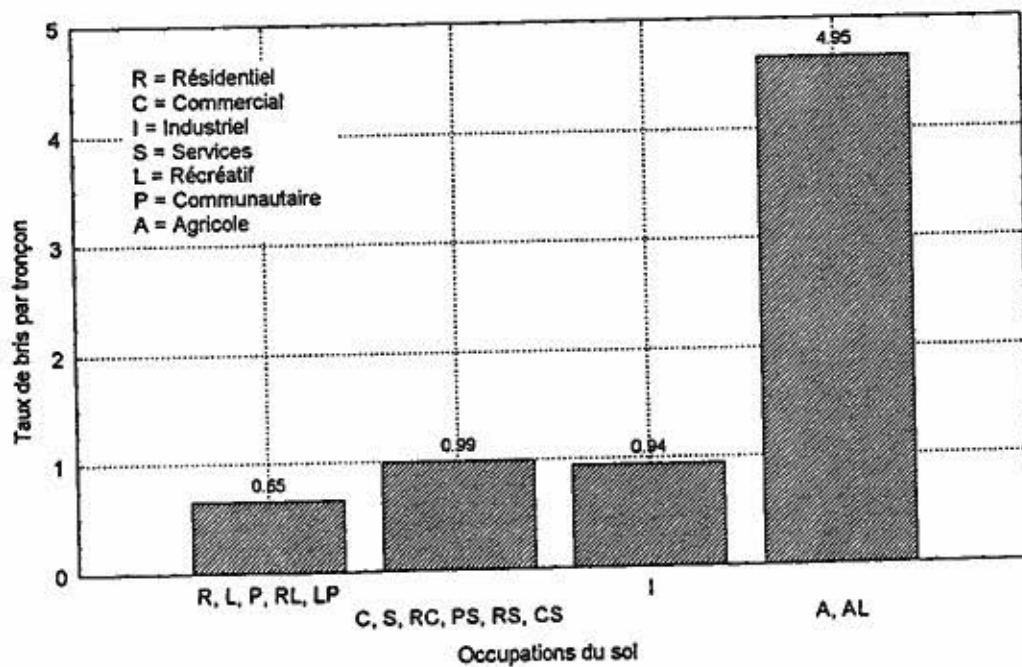


Figure 4.13 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité A

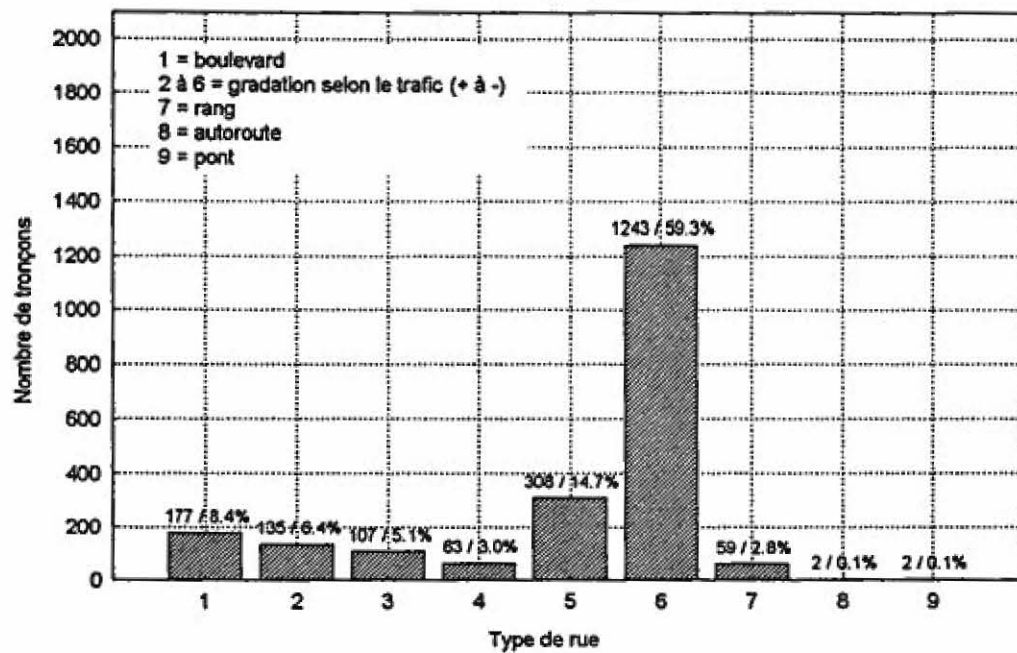


Figure 4.14 Nombre et pourcentage de tronçons par type de rue pour la municipalité A

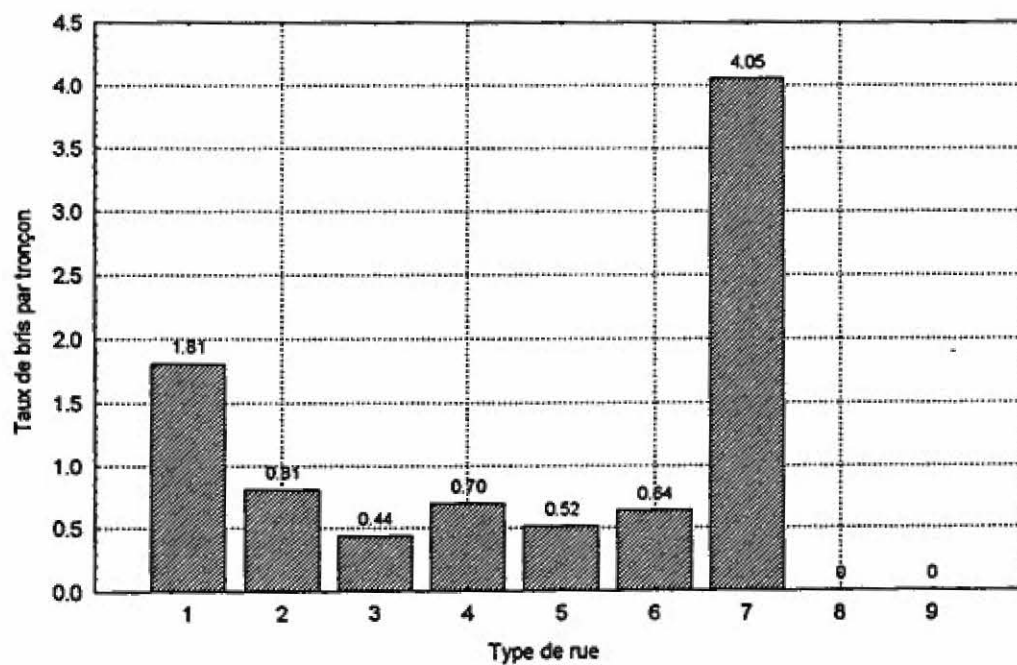


Figure 4.15 Taux de bris par type de rue pour la municipalité A

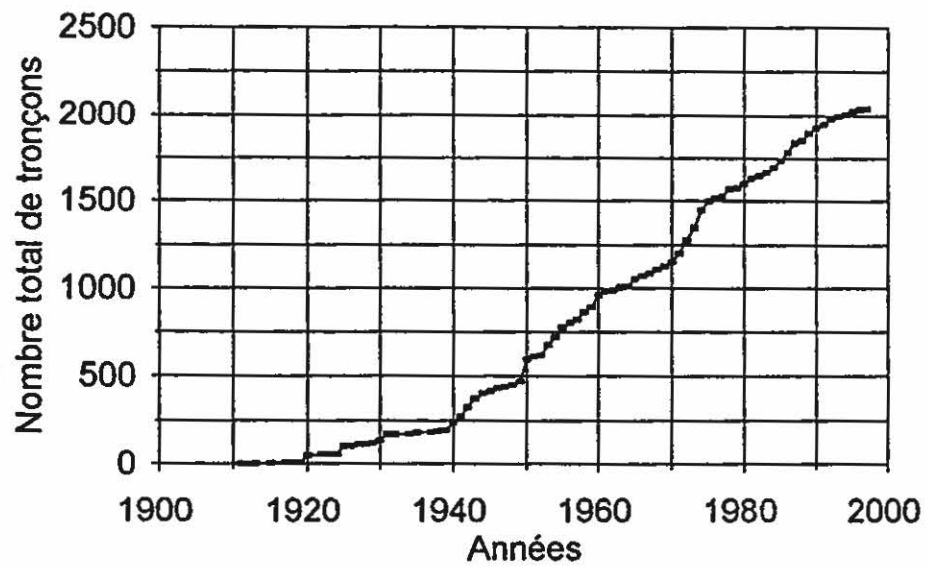


Figure 4.16 Croissance de la municipalité B en terme de tronçons

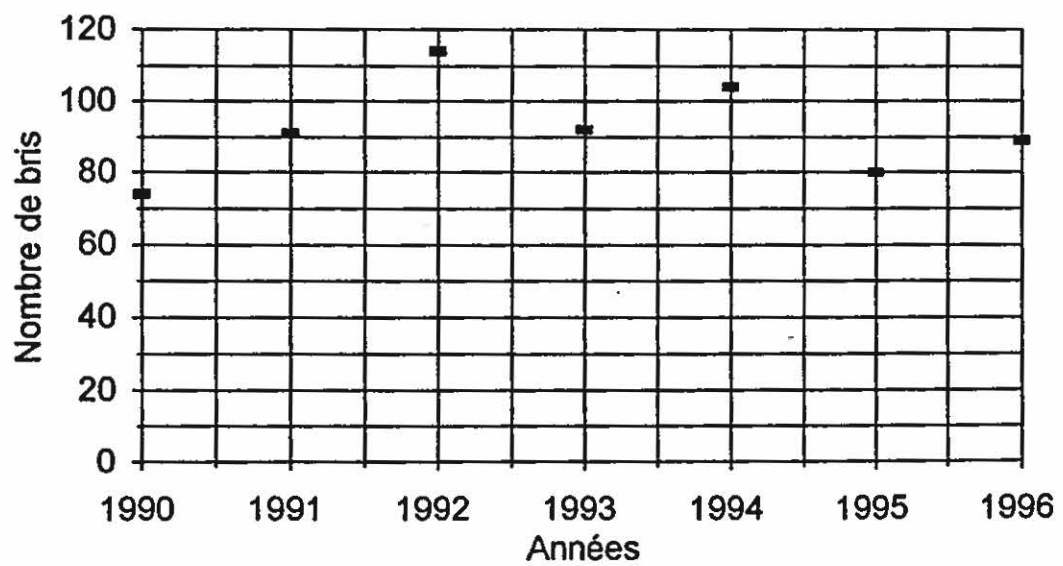


Figure 4.17 Historique de bris pour la municipalité B

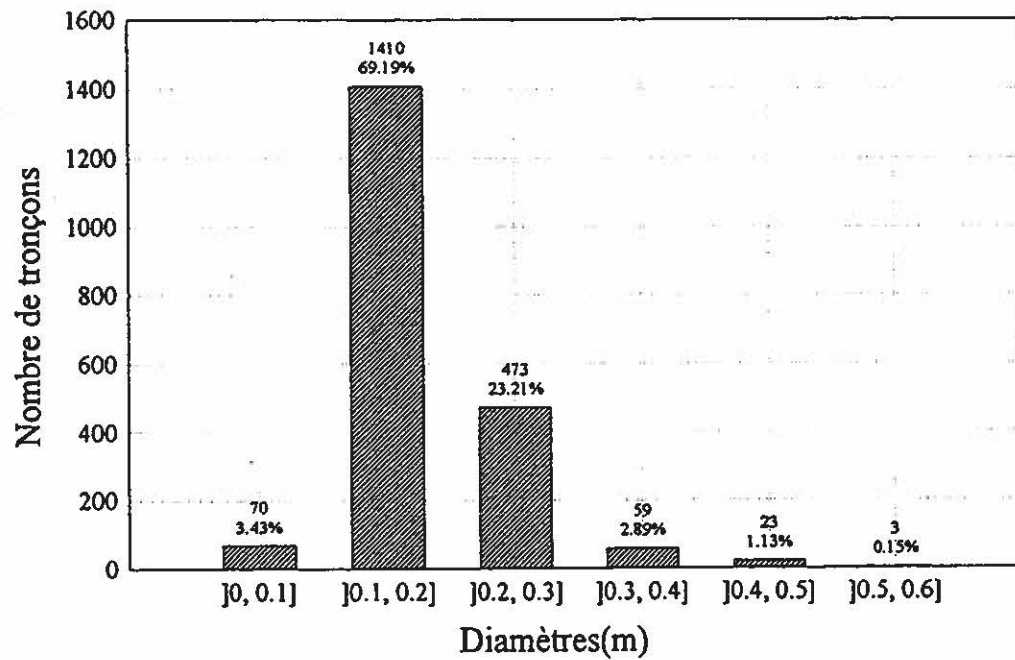


Figure 4.18 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité B

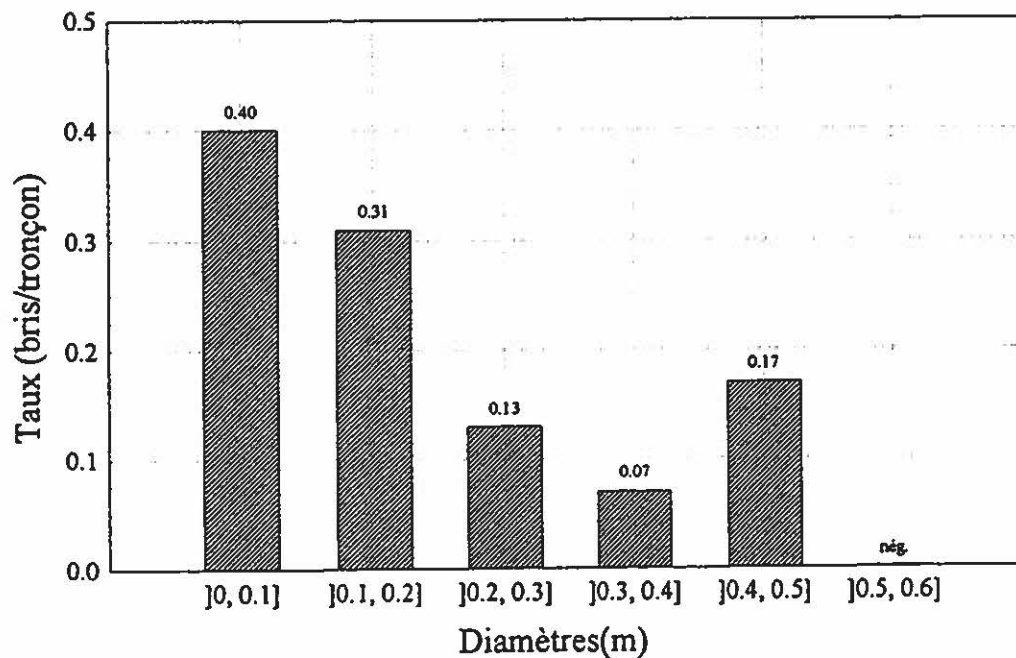


Figure 4.19 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité B

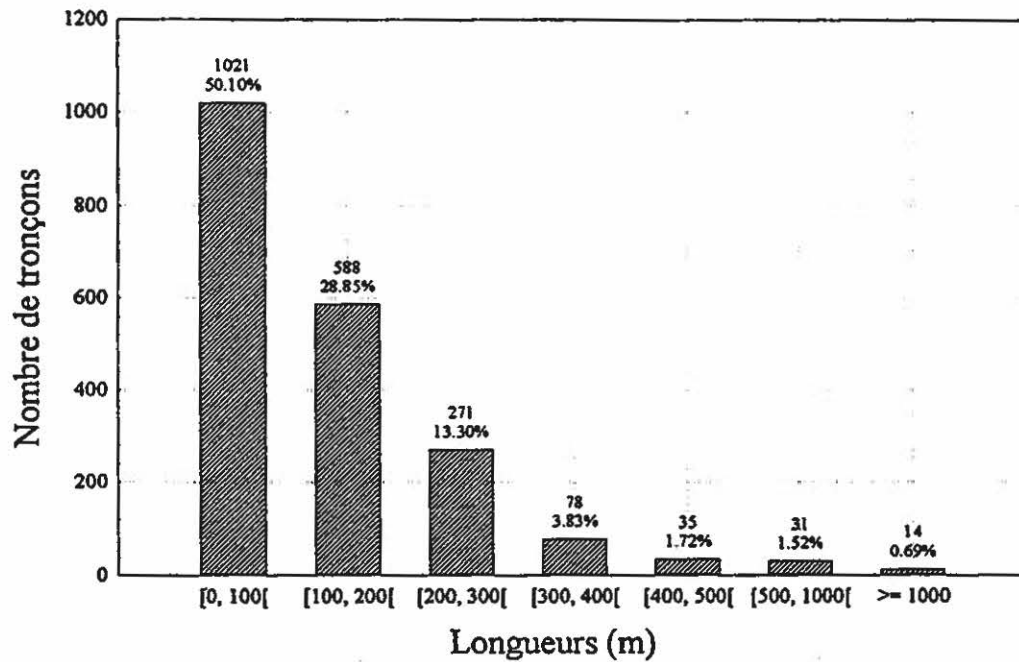


Figure 4.20 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité B

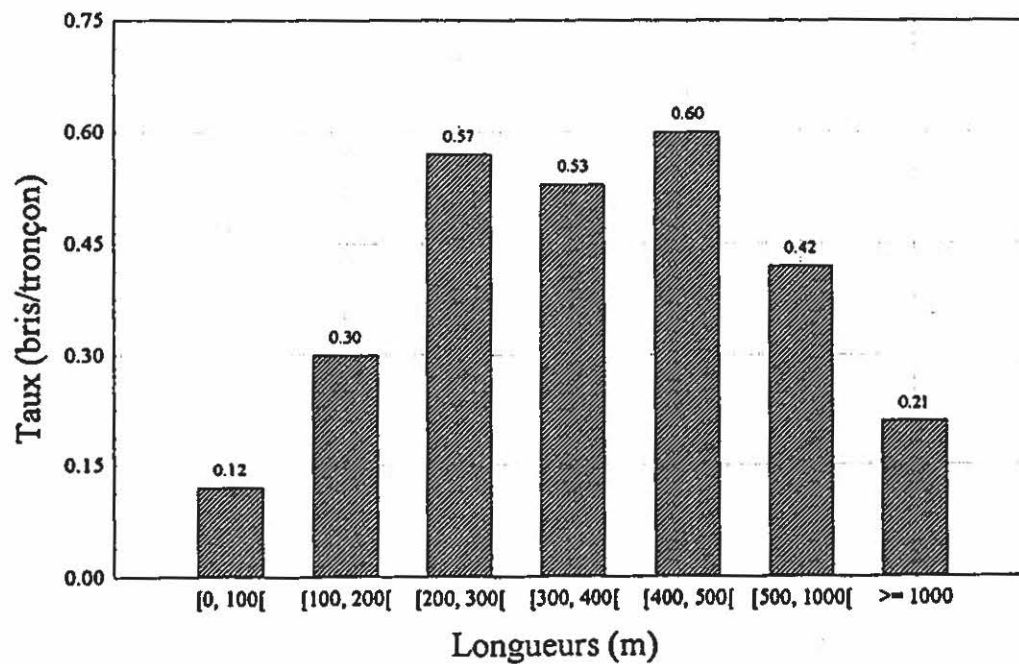


Figure 4.21 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité B

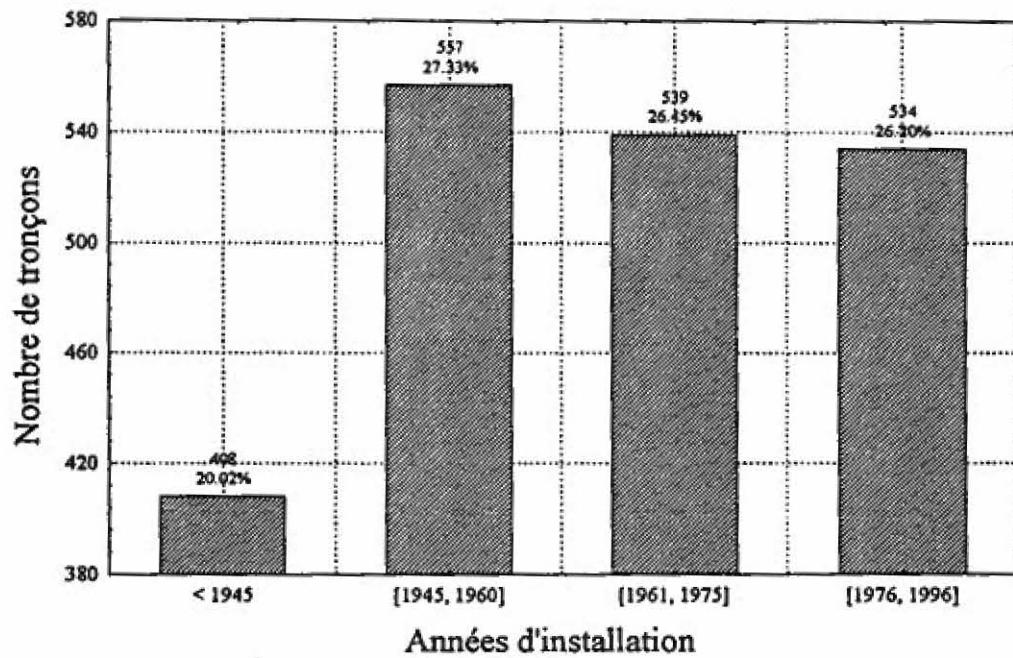


Figure 4.22 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité B

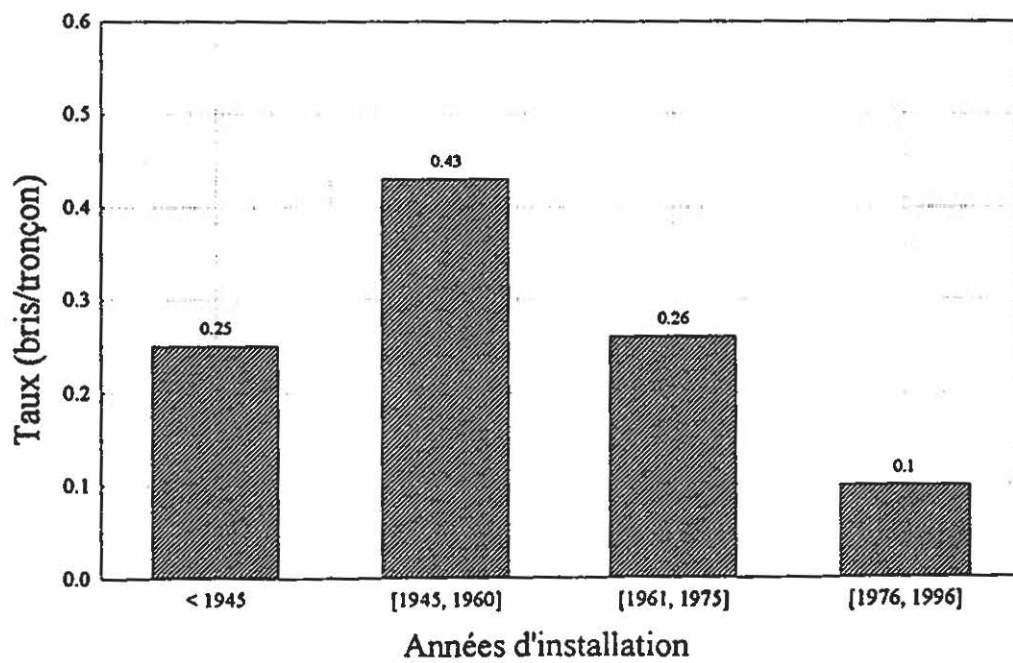


Figure 4.23 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité B

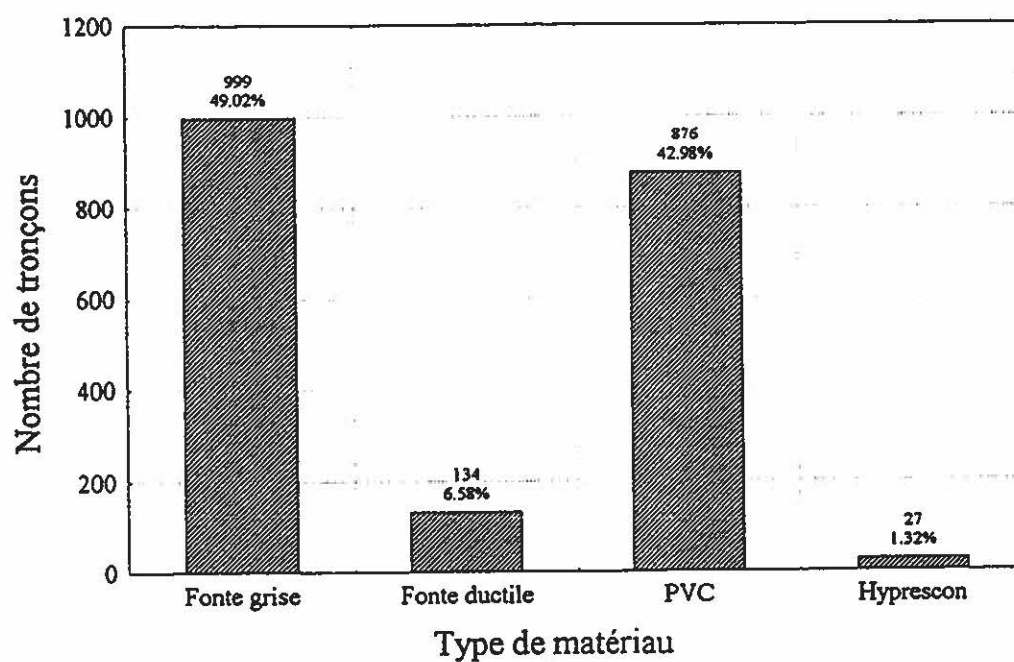


Figure 4.24 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité B

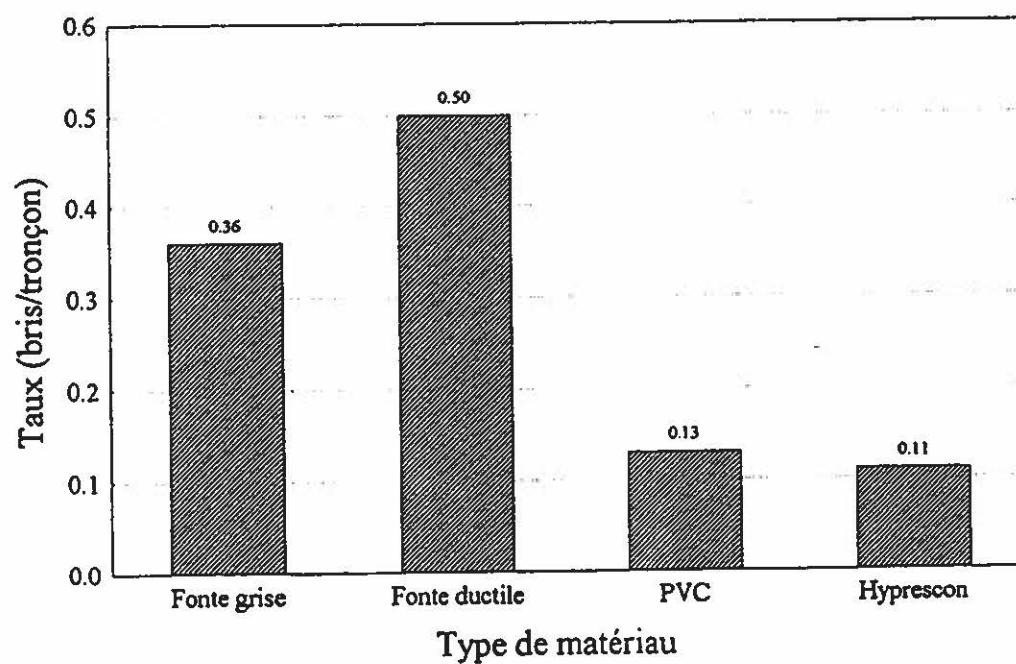


Figure 4.25 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité B

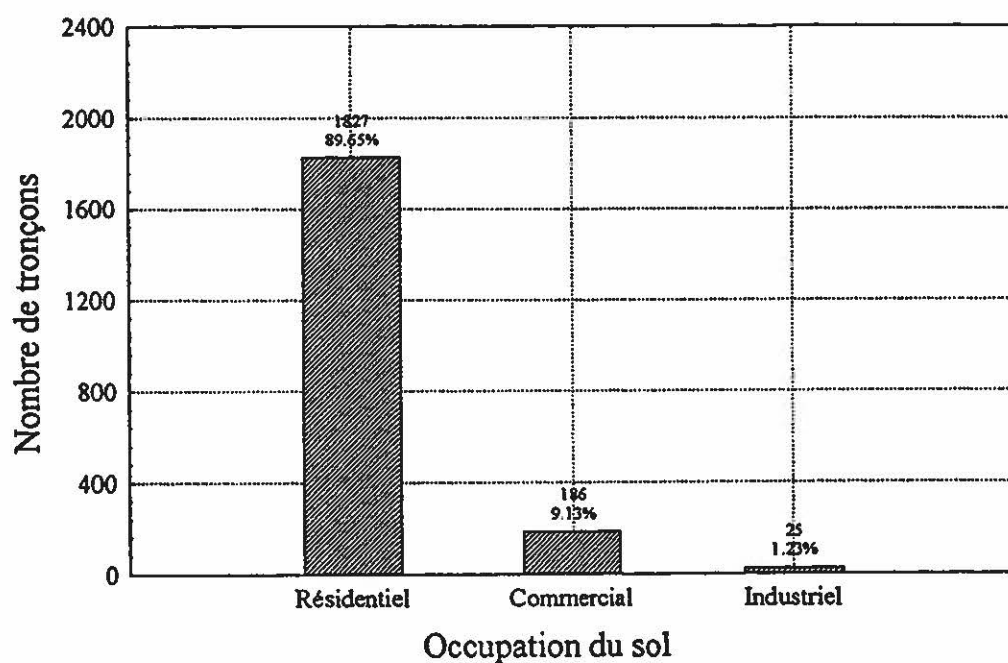


Figure 4.26 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité B

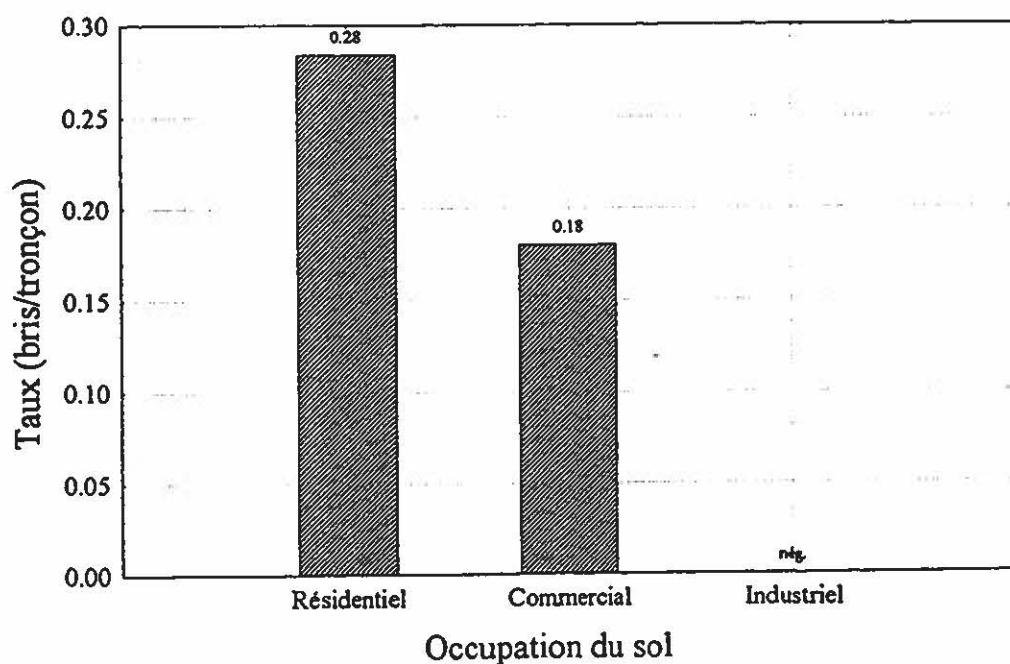


Figure 4.27 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité B

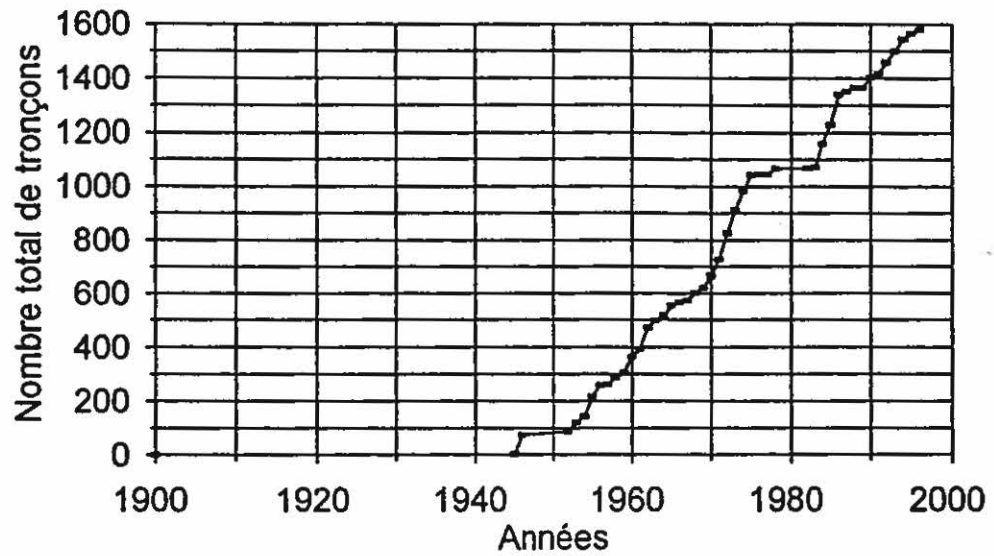


Figure 4.28 Croissance de la municipalité C en terme de tronçons

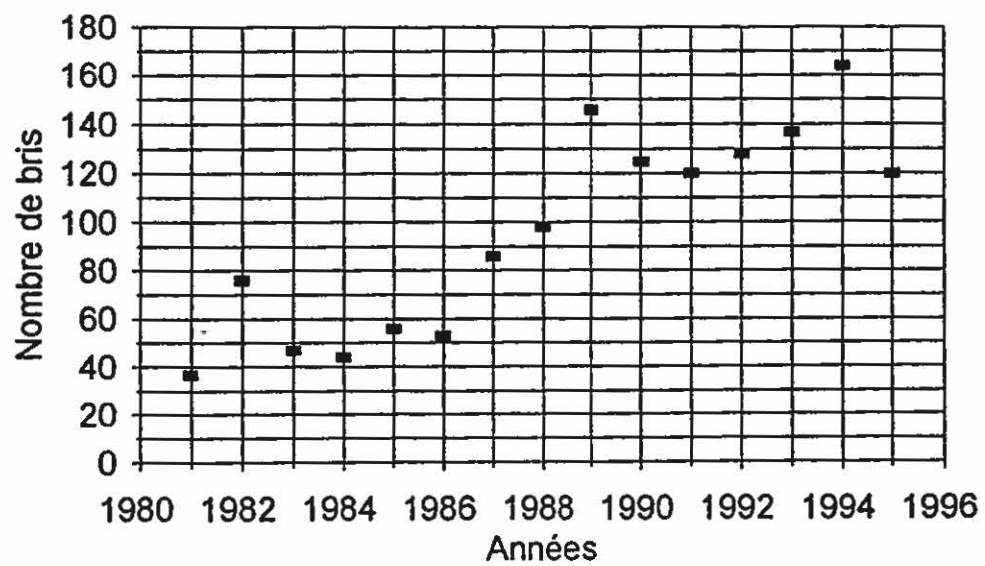


Figure 4.29 Historique de bris pour la municipalité C

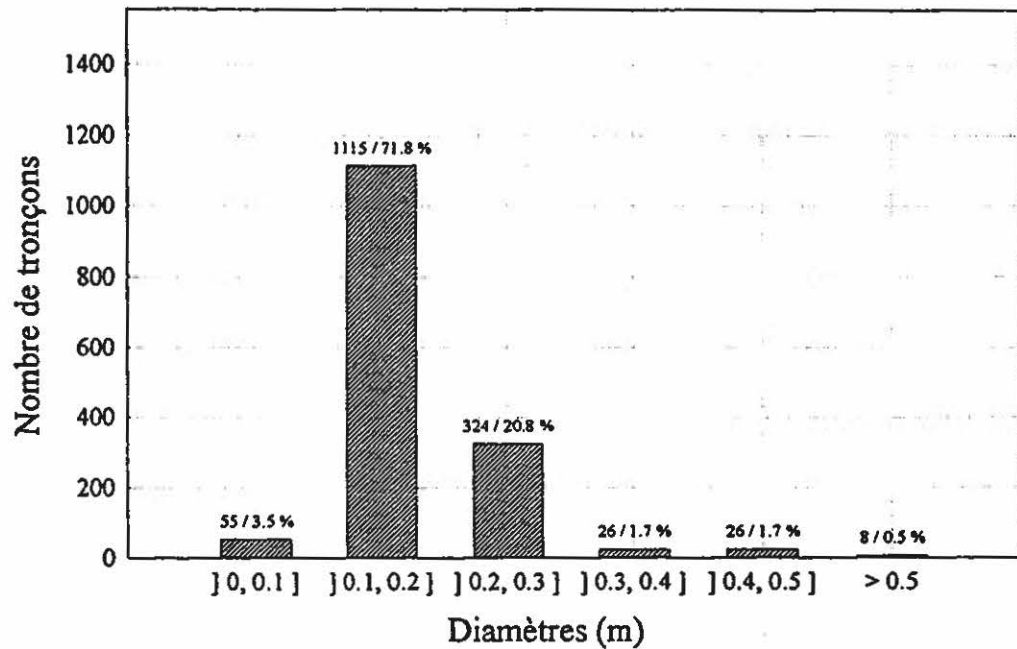


Figure 4.30 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité C

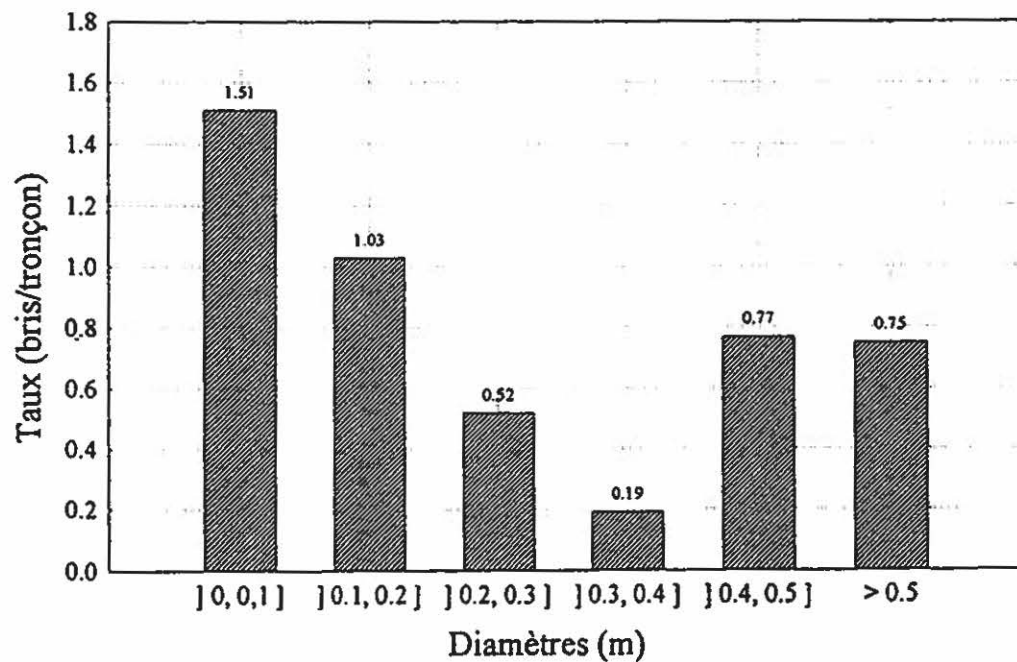


Figure 4.31 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité C

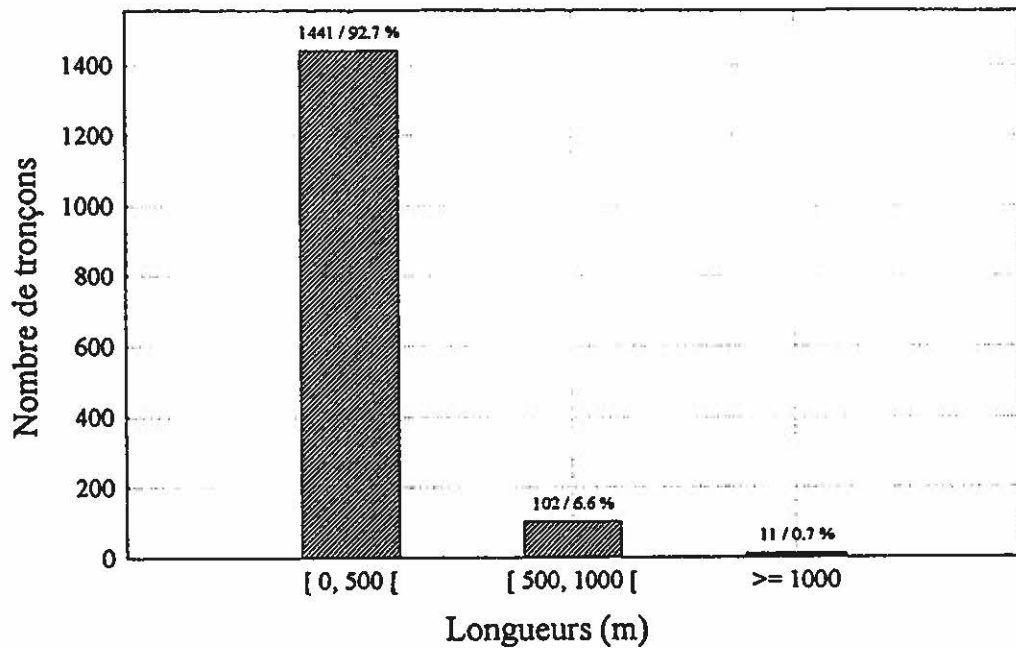


Figure 4.32 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité C

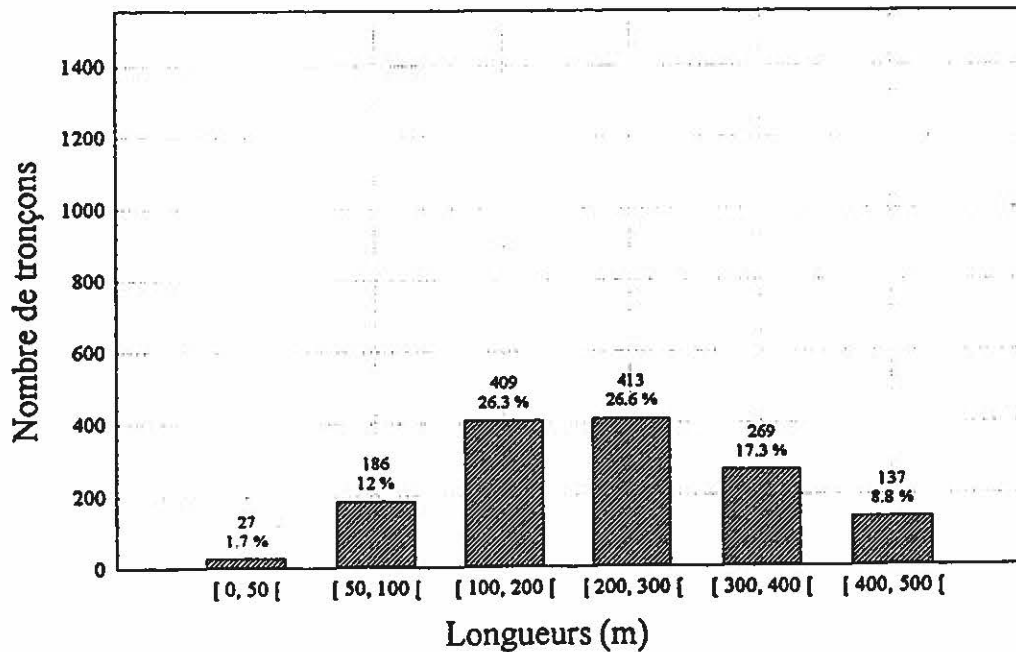


Figure 4.33 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité C

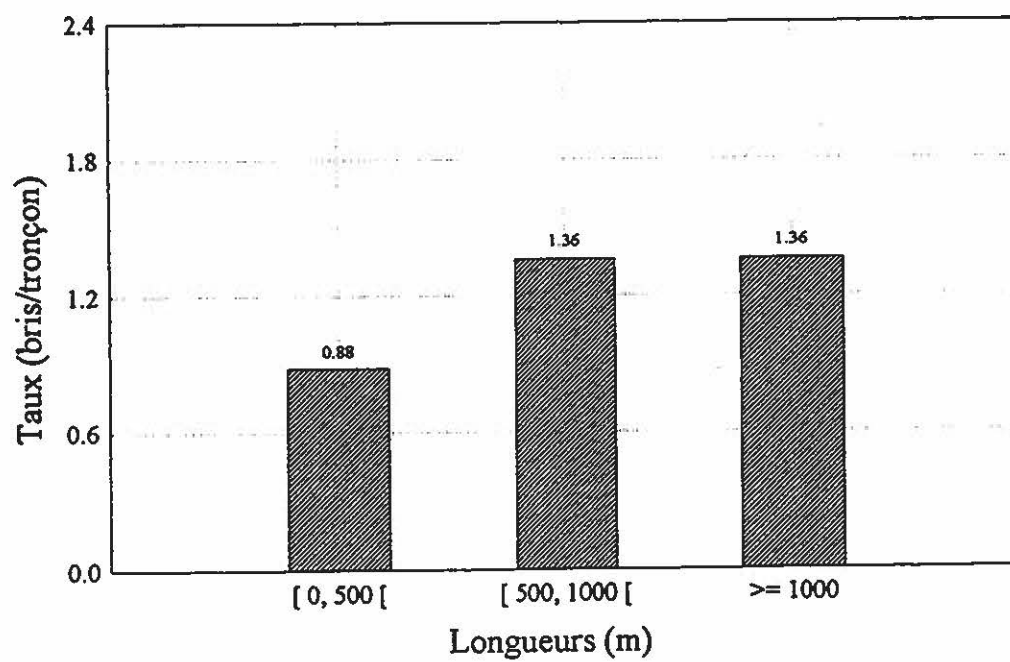


Figure 4.34 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité C

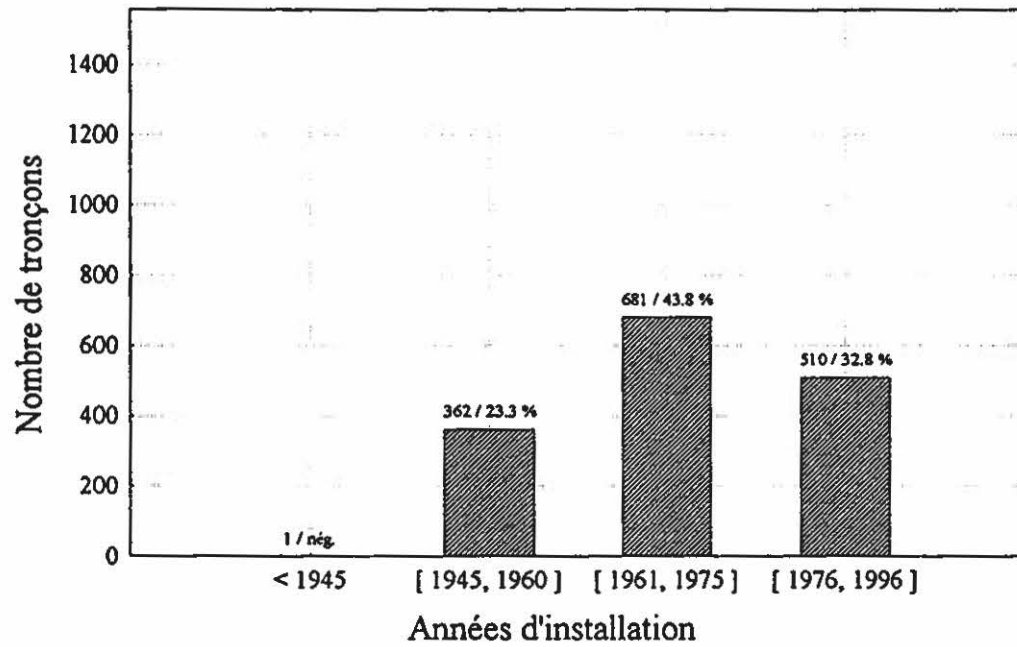


Figure 4.35 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité C

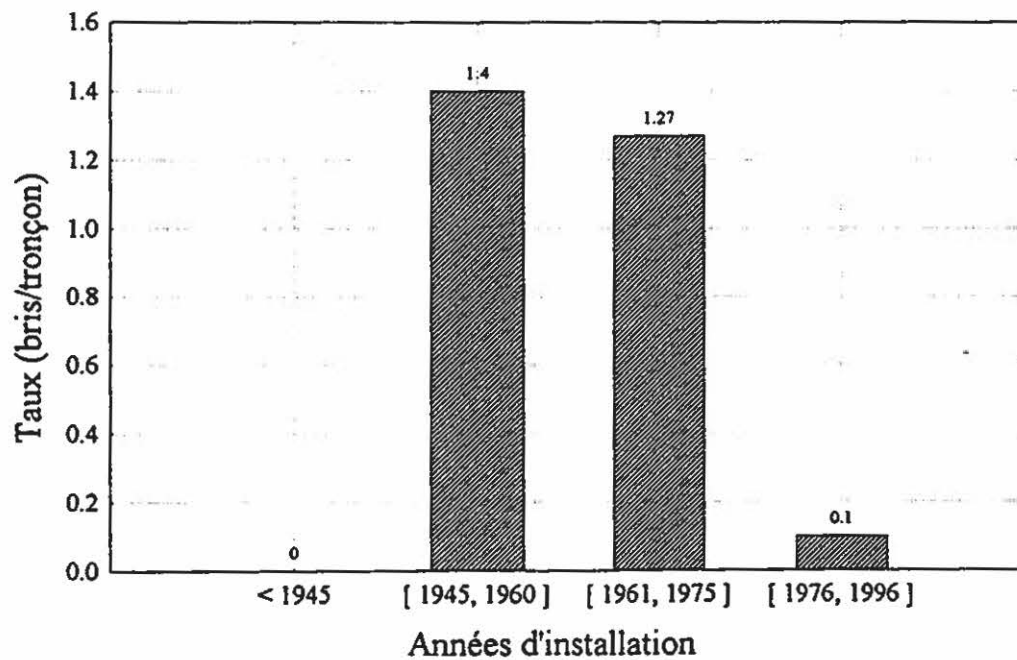


Figure 4.36 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité C

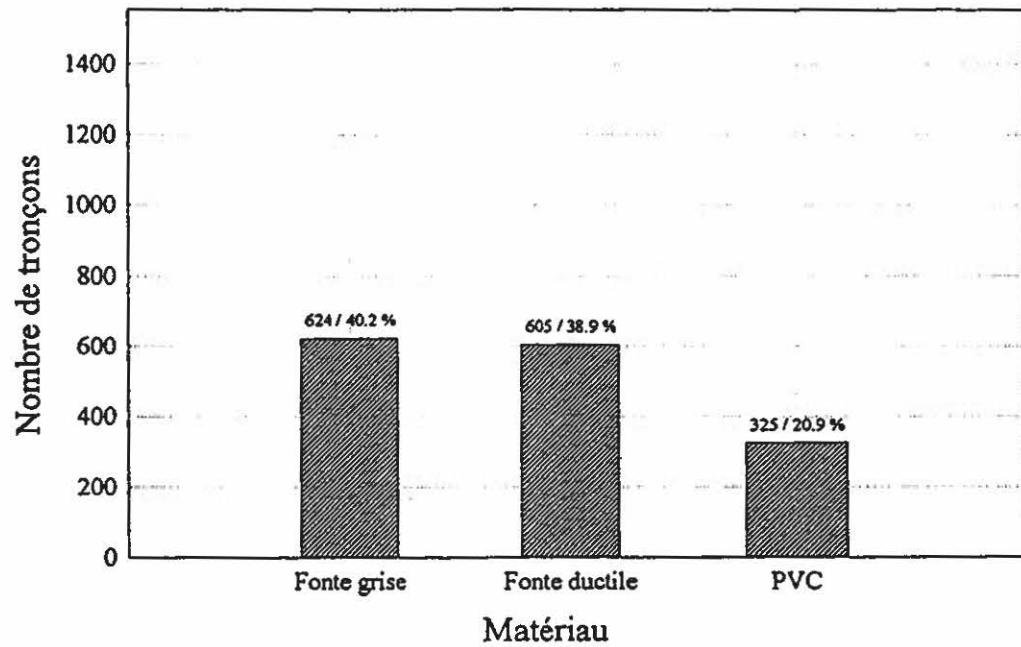


Figure 4.37 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité C

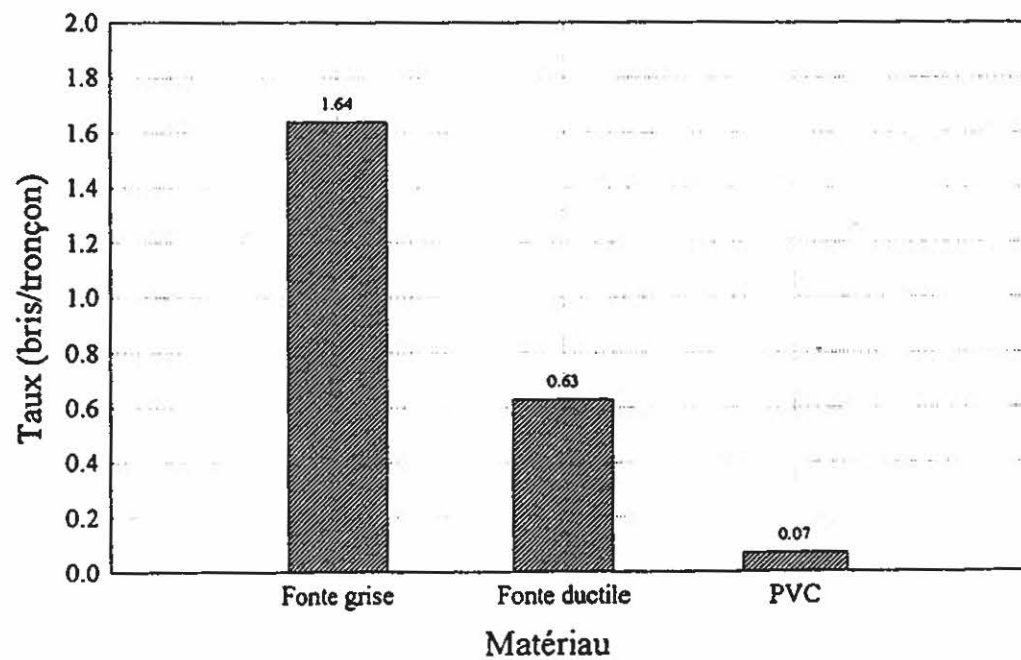


Figure 4.38 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité C

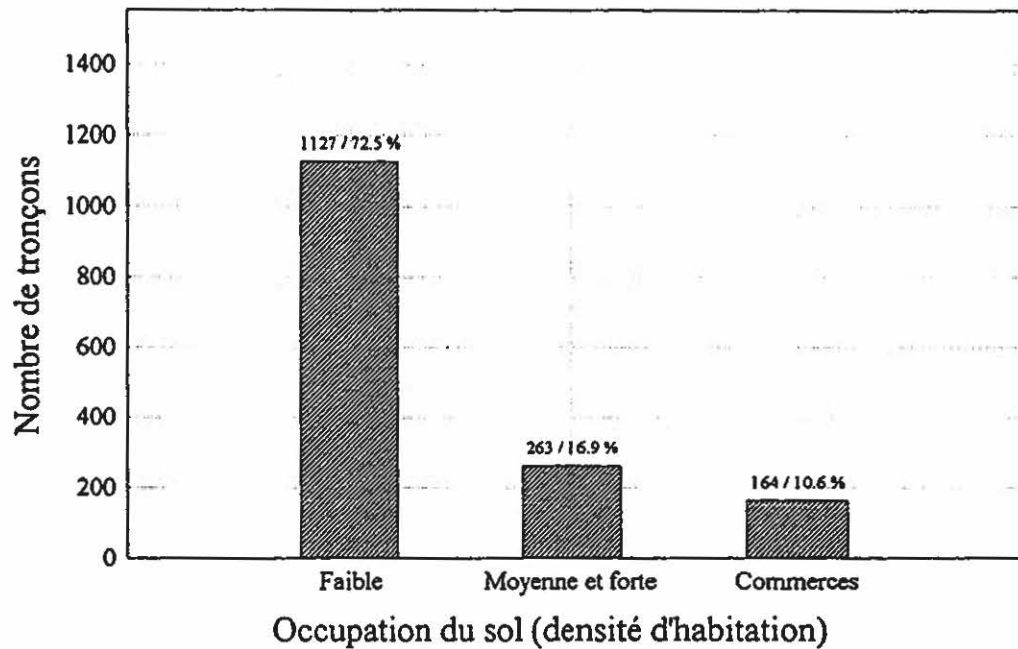


Figure 4.39 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité C

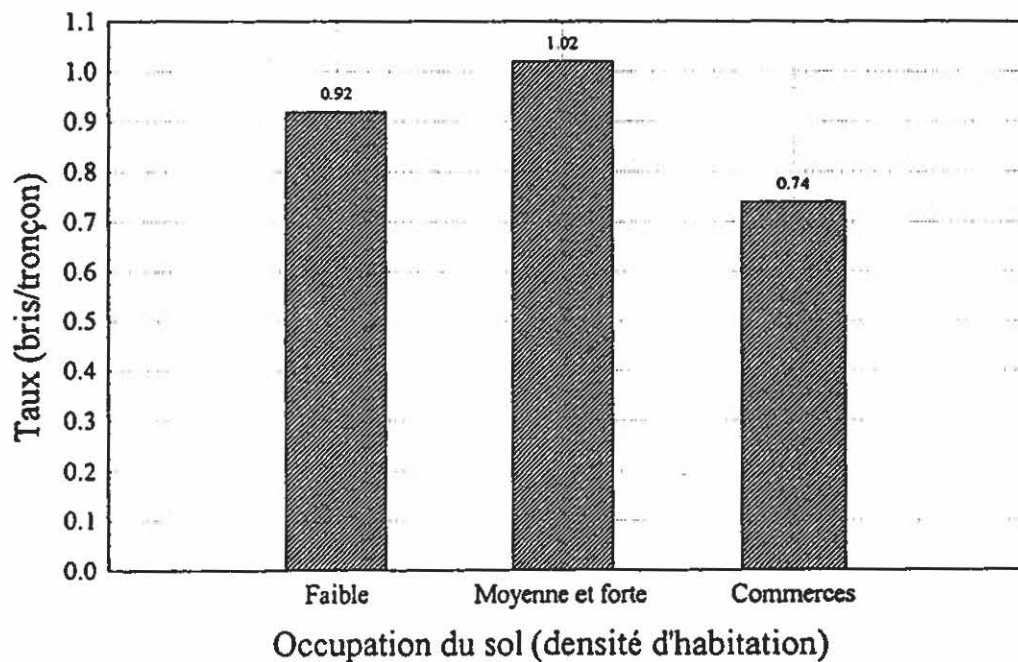


Figure 4.40 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité C

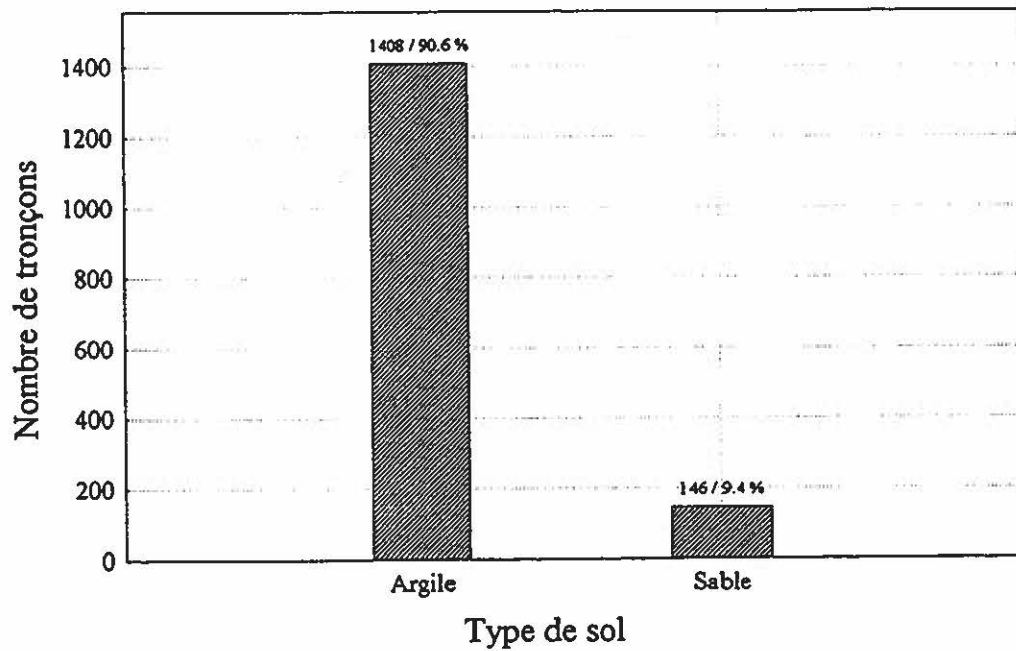


Figure 4.41 Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité C

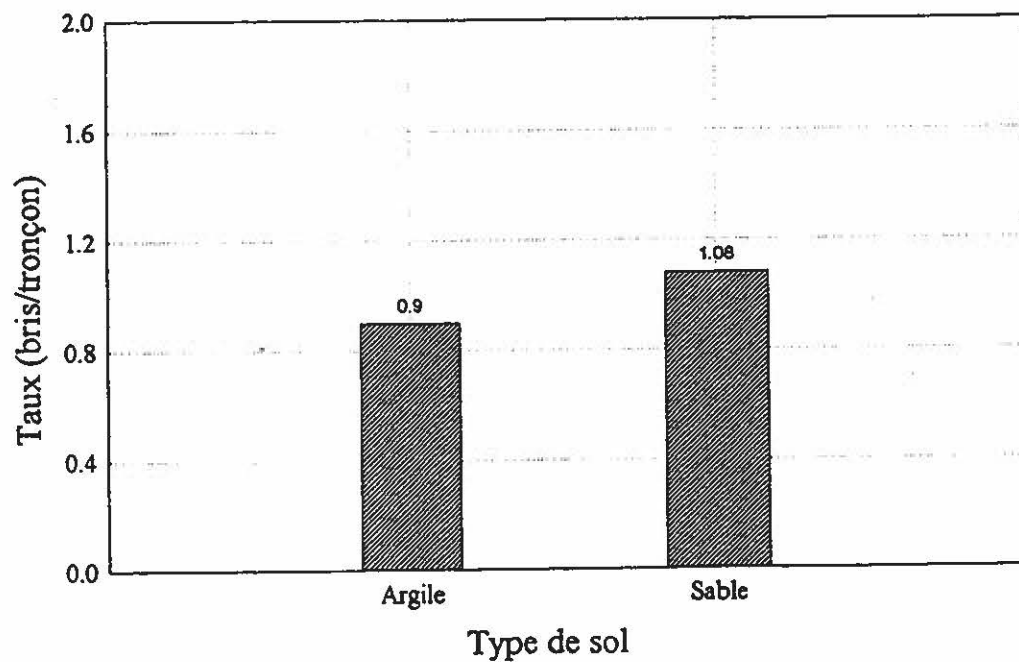


Figure 4.42 Taux de bris par type de sol pour la municipalité C

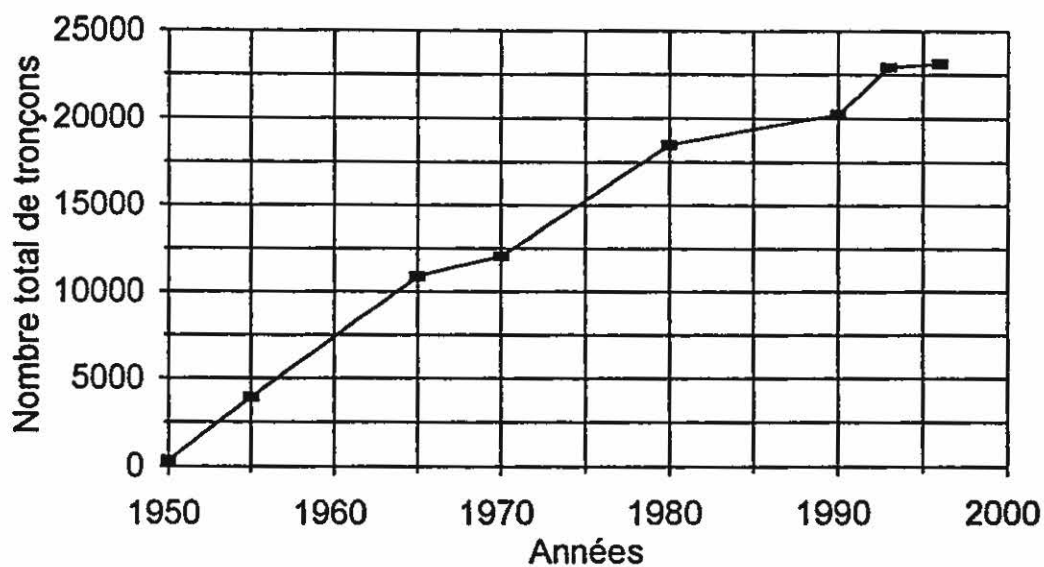


Figure 4.43 Croissance de la municipalité D en terme de tronçons

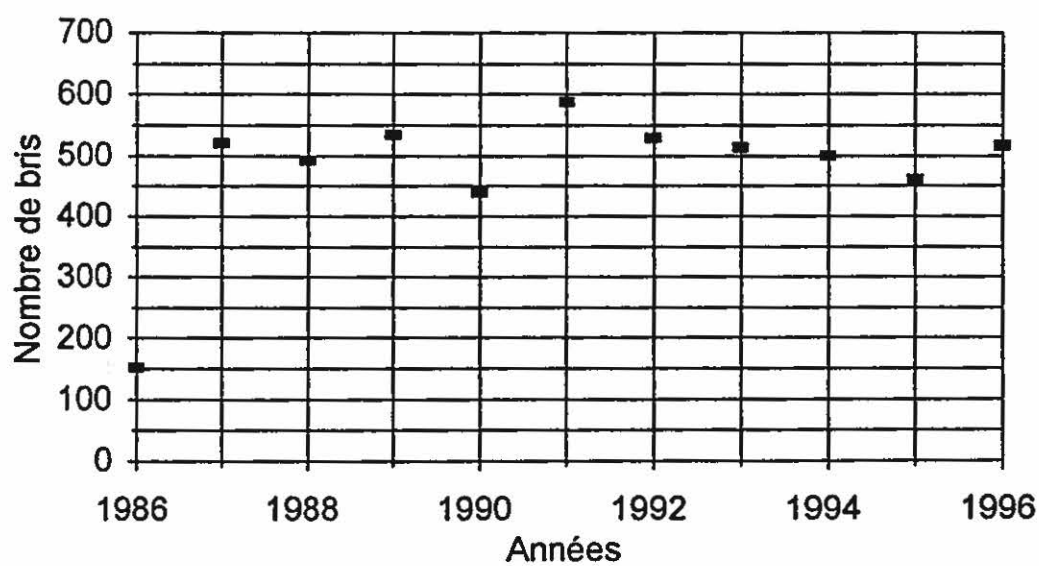


Figure 4.44 Historique de bris pour la municipalité D

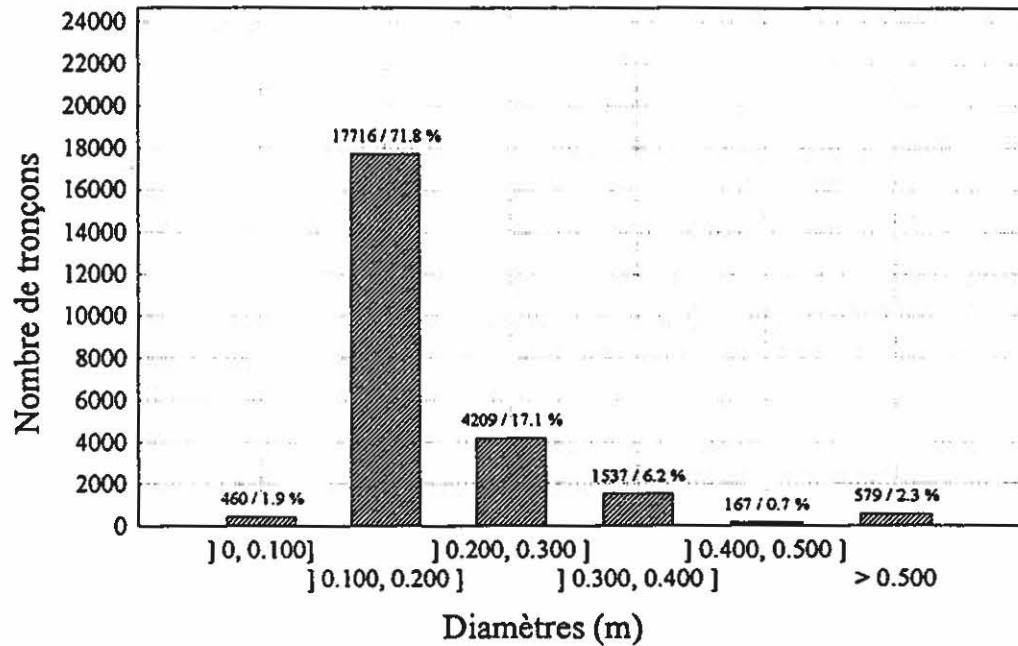


Figure 4.45 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité D

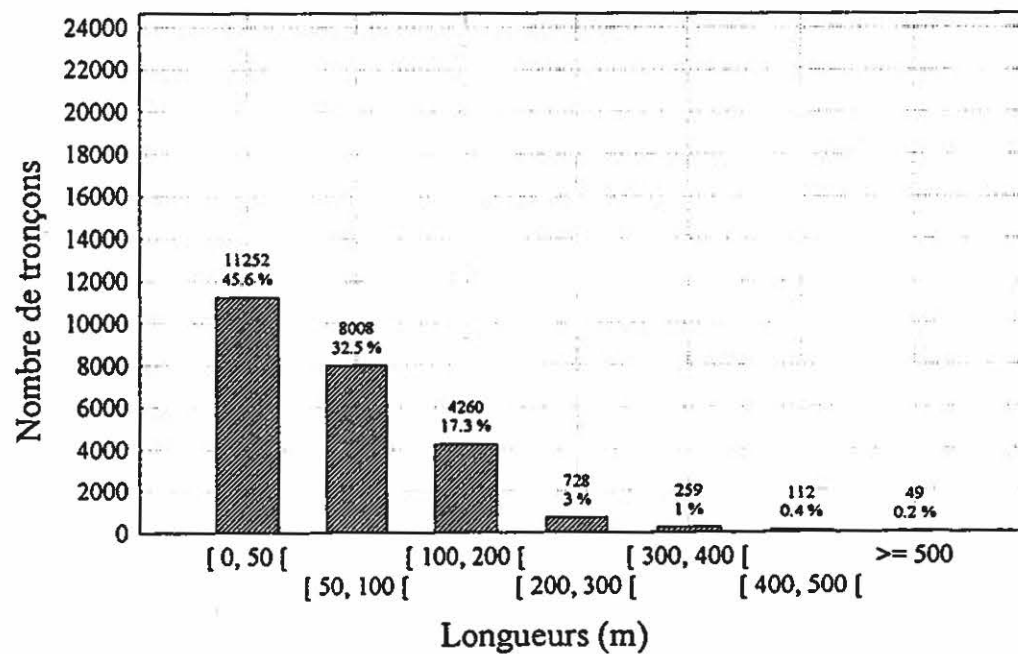


Figure 4.46 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité D

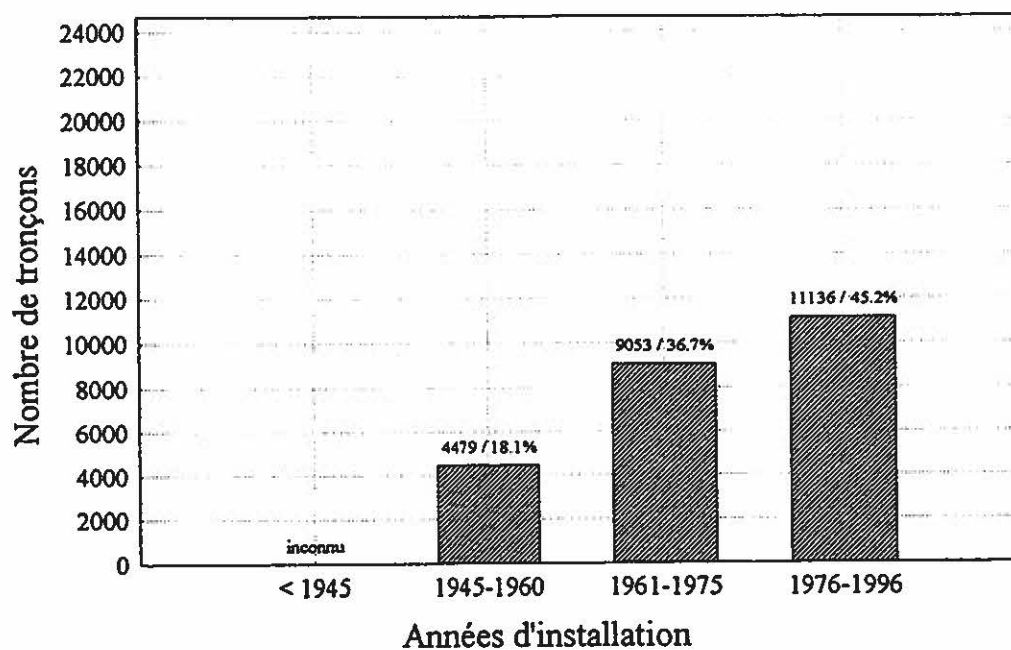


Figure 4.47 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité D

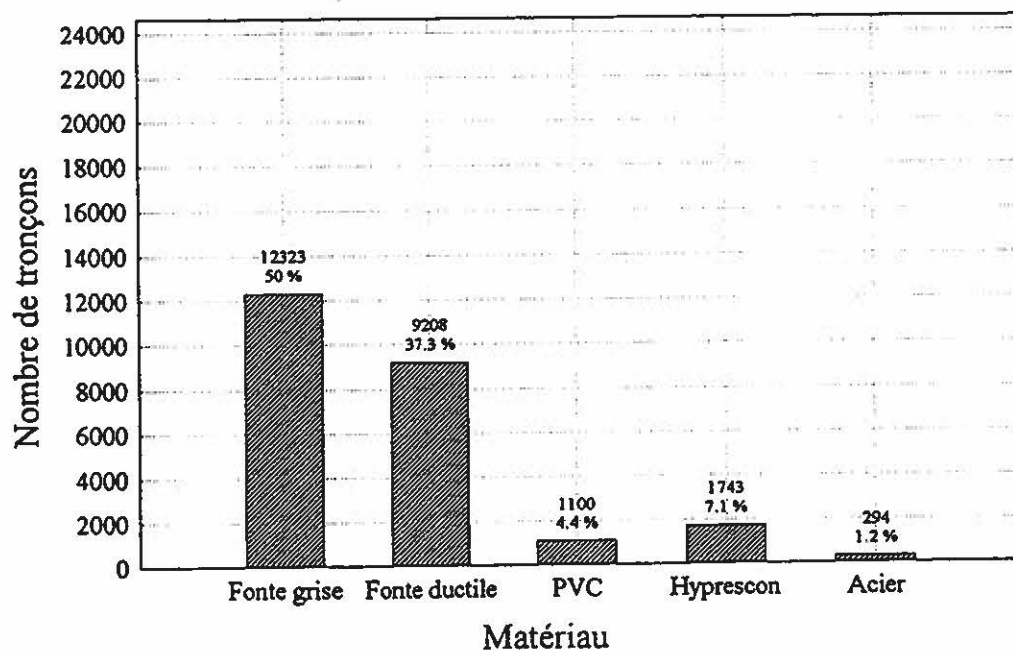


Figure 4.48 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité D

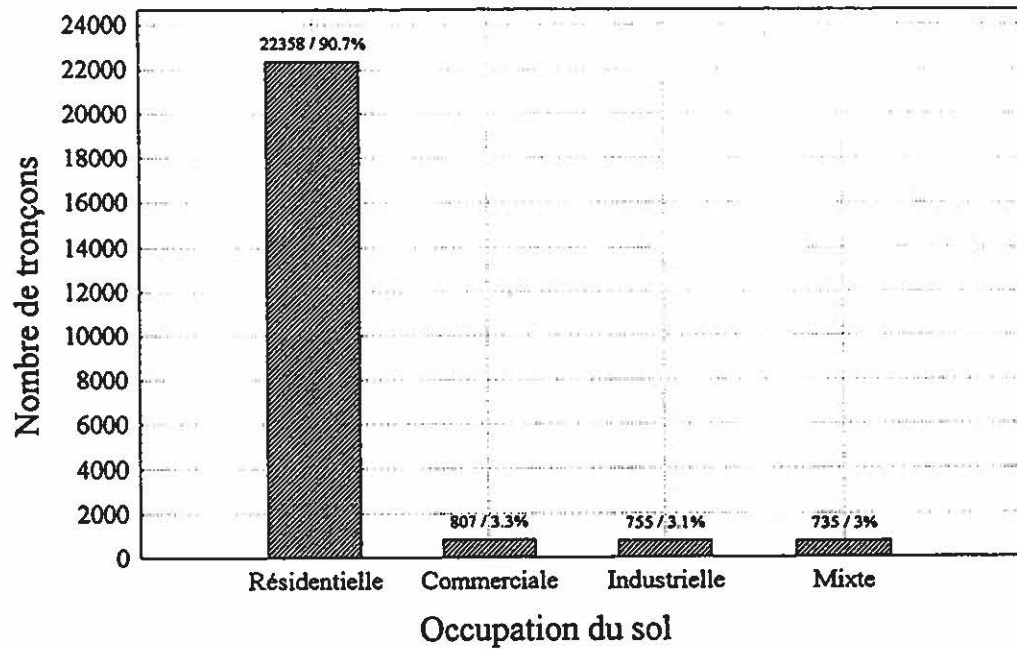


Figure 4.49 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité D

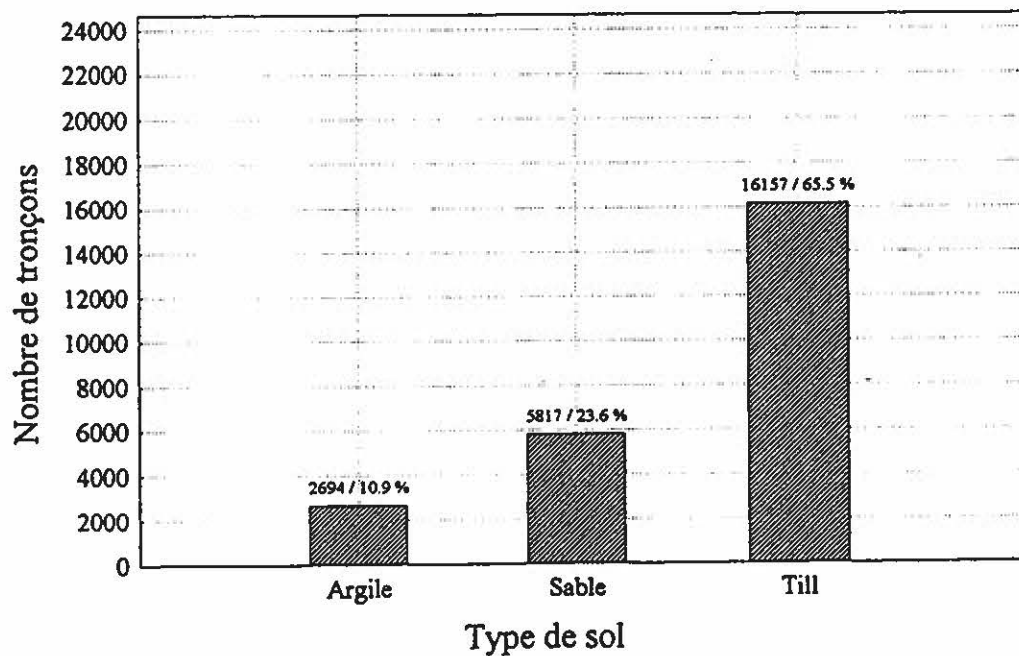


Figure 4.50 Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité D

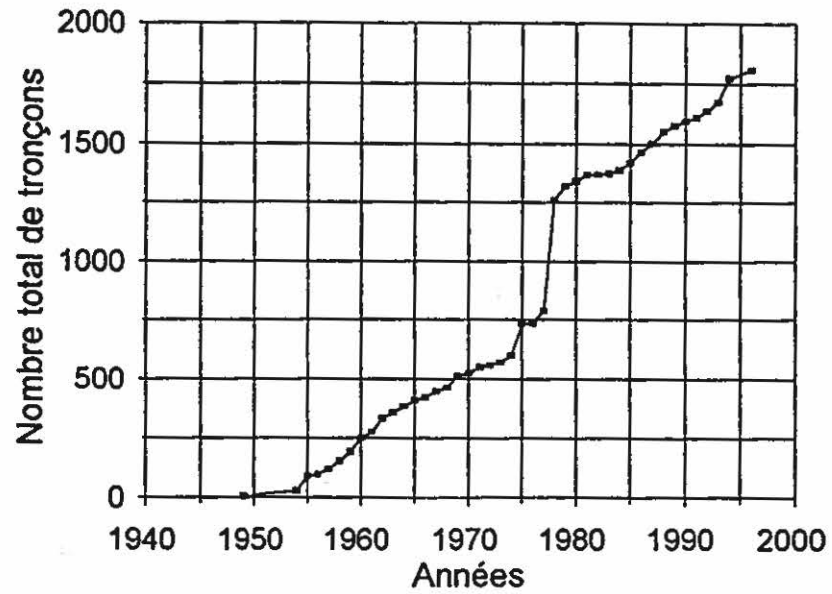


Figure 4.51 Croissance de la municipalité E en terme de tronçons

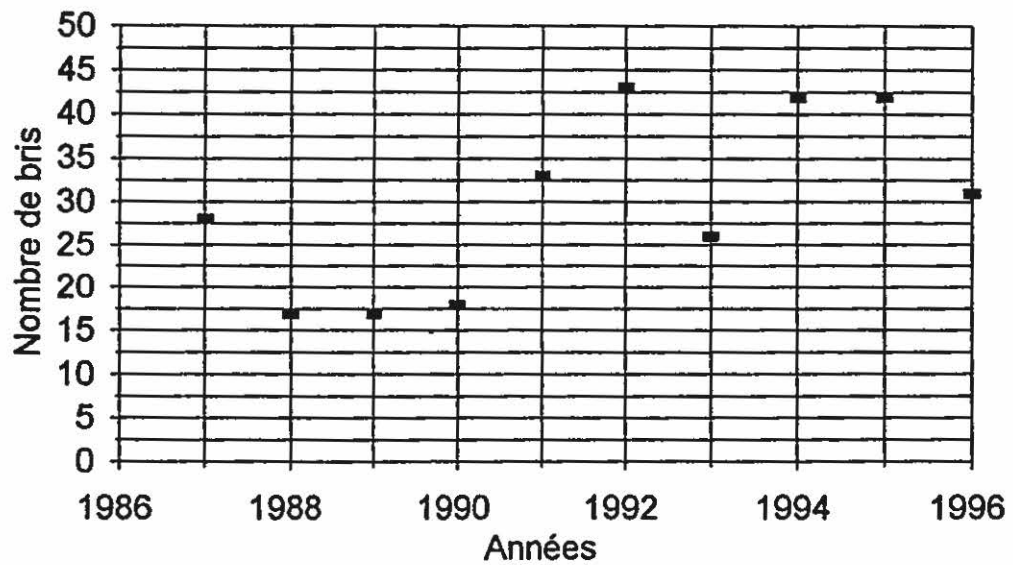


Figure 4.52 Historique de bris pour la municipalité E

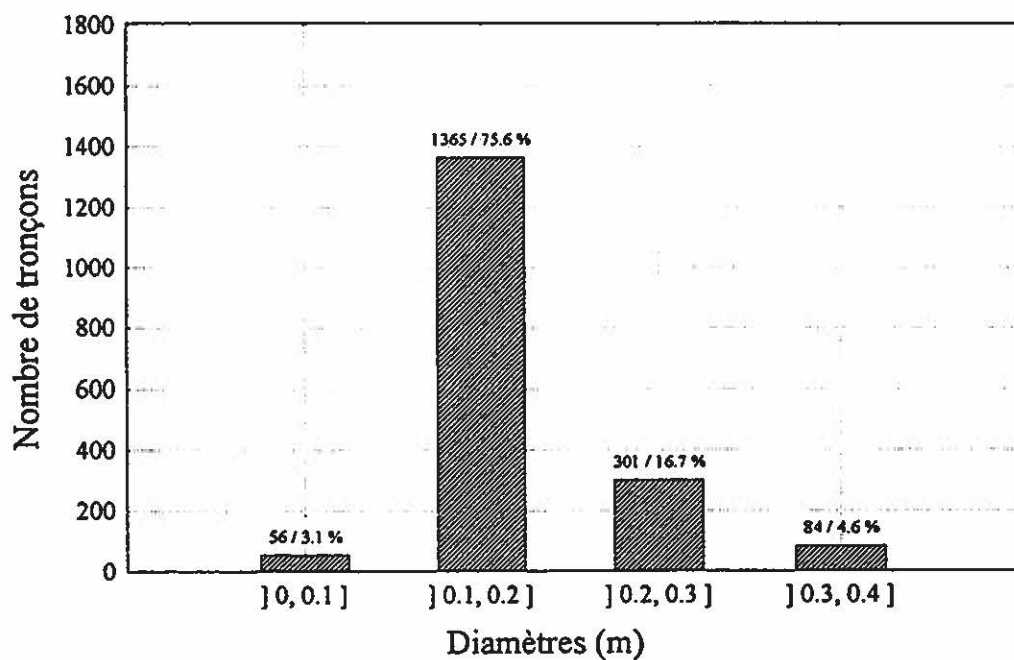


Figure 4.53 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité E

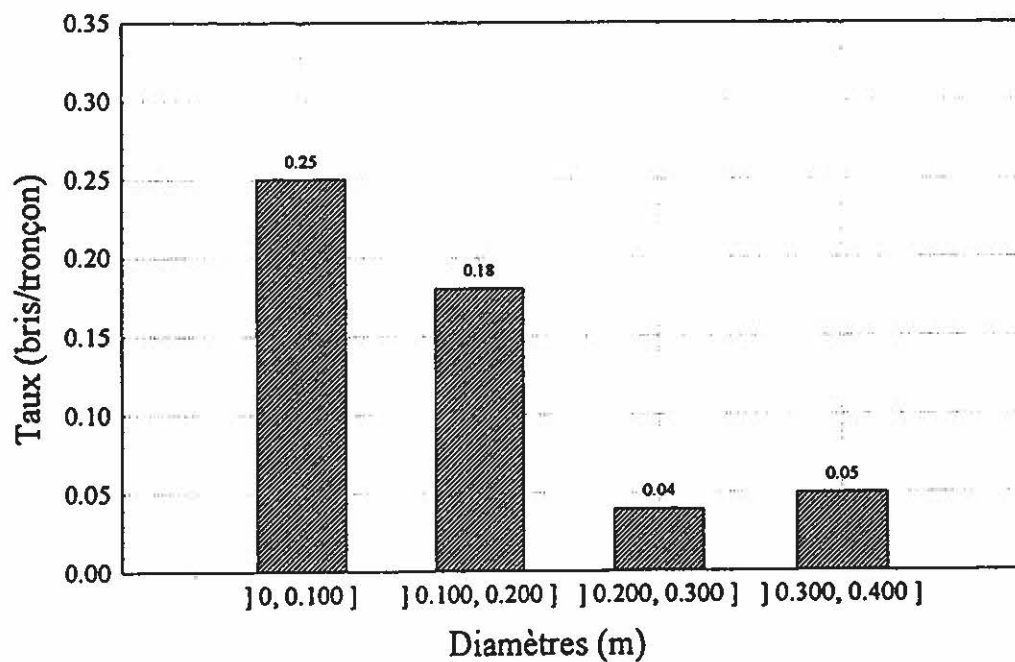


Figure 4.54 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité E

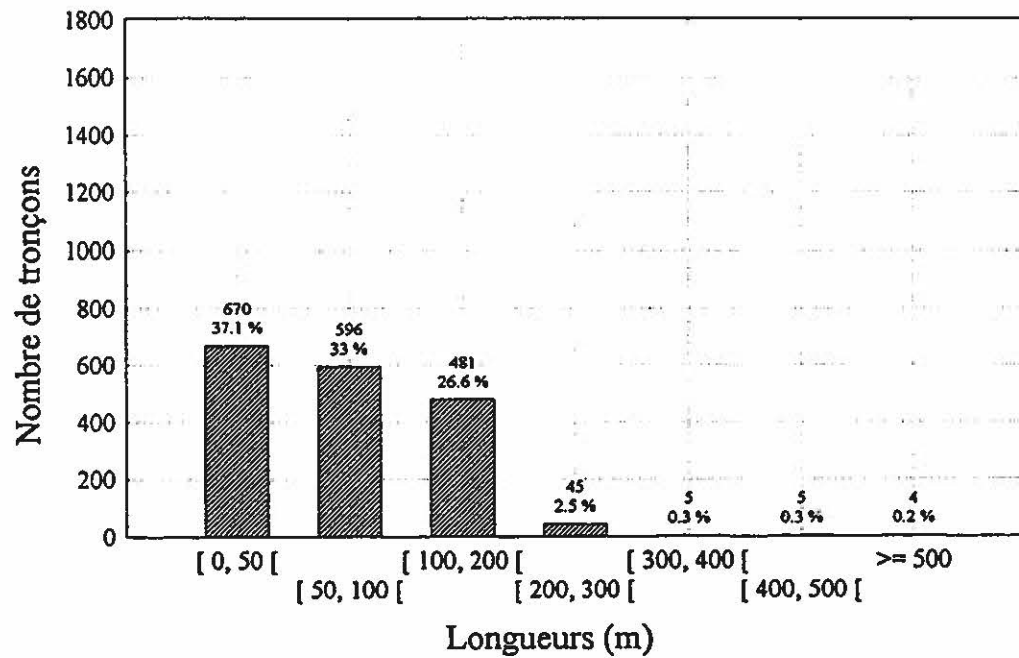


Figure 4.55 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité E

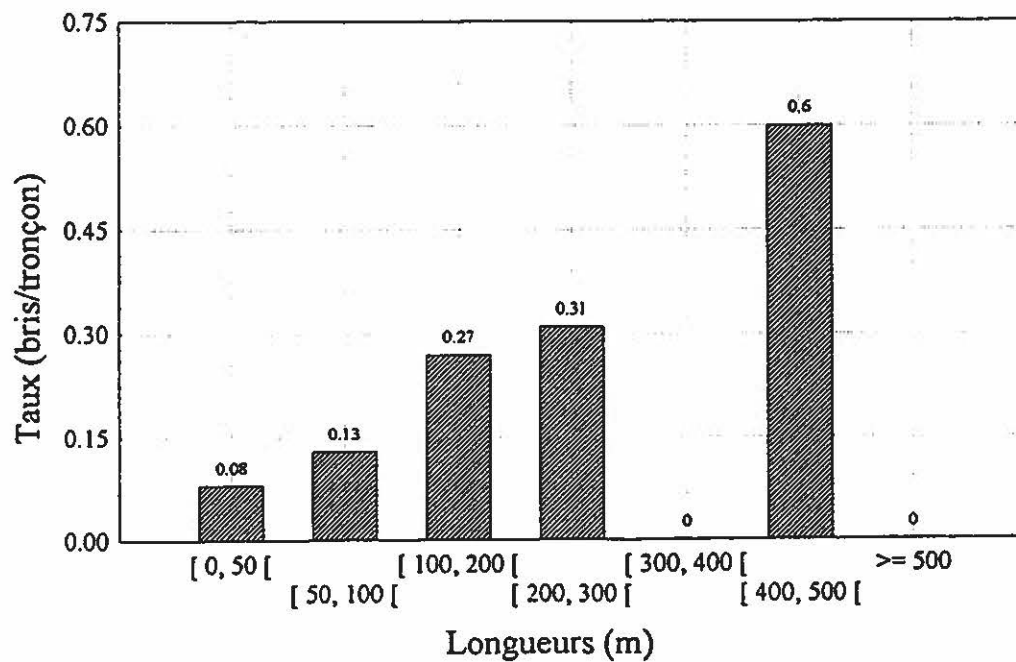


Figure 4.56 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité E

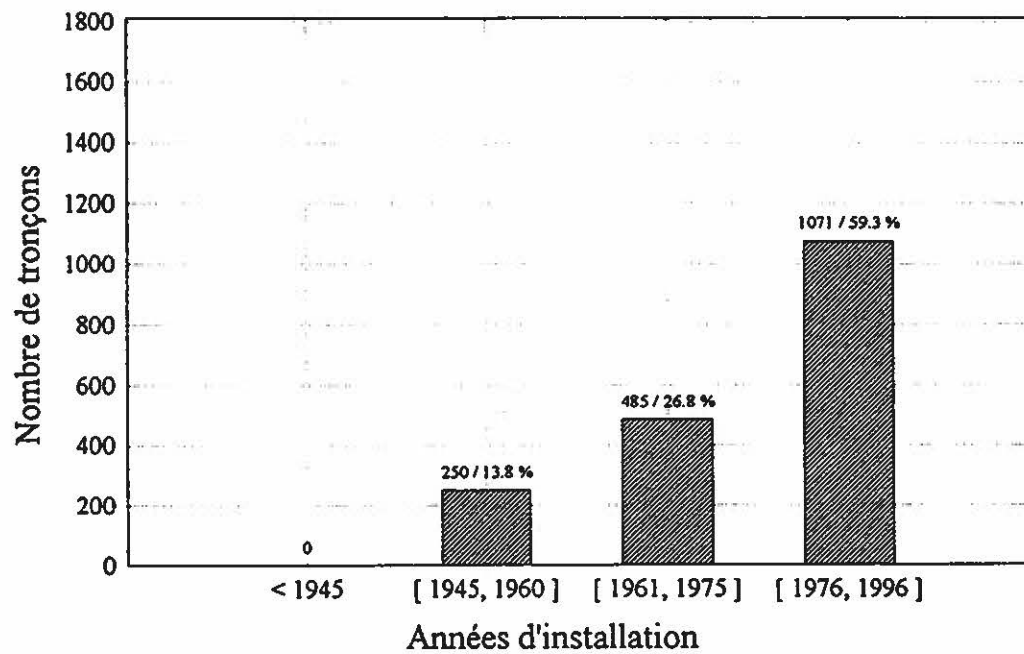


Figure 4.57 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité E

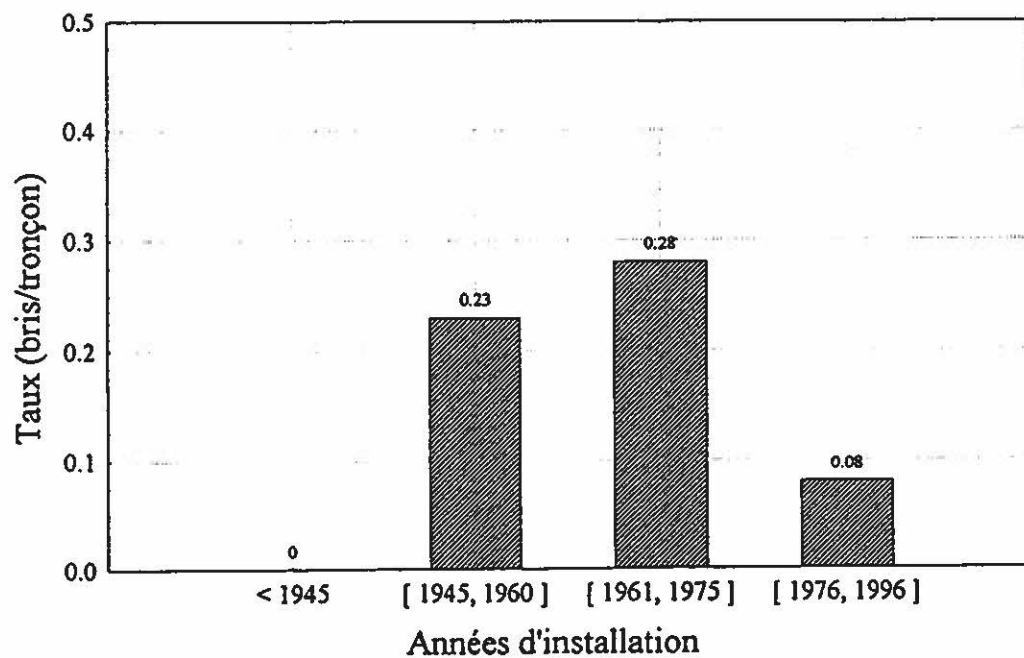


Figure 4.58 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité E

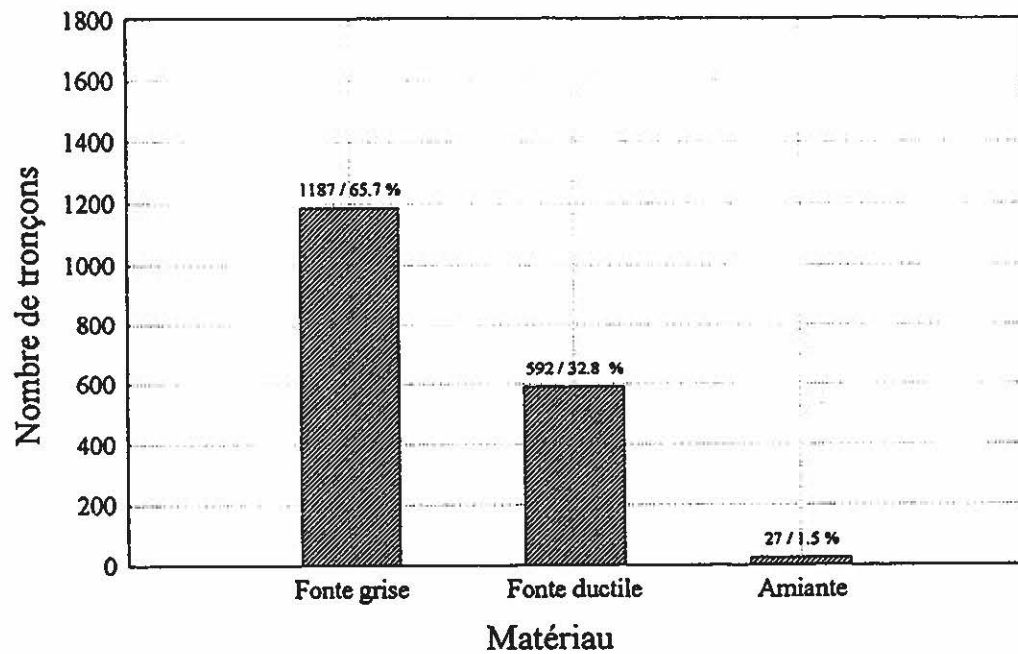


Figure 4.59 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité E

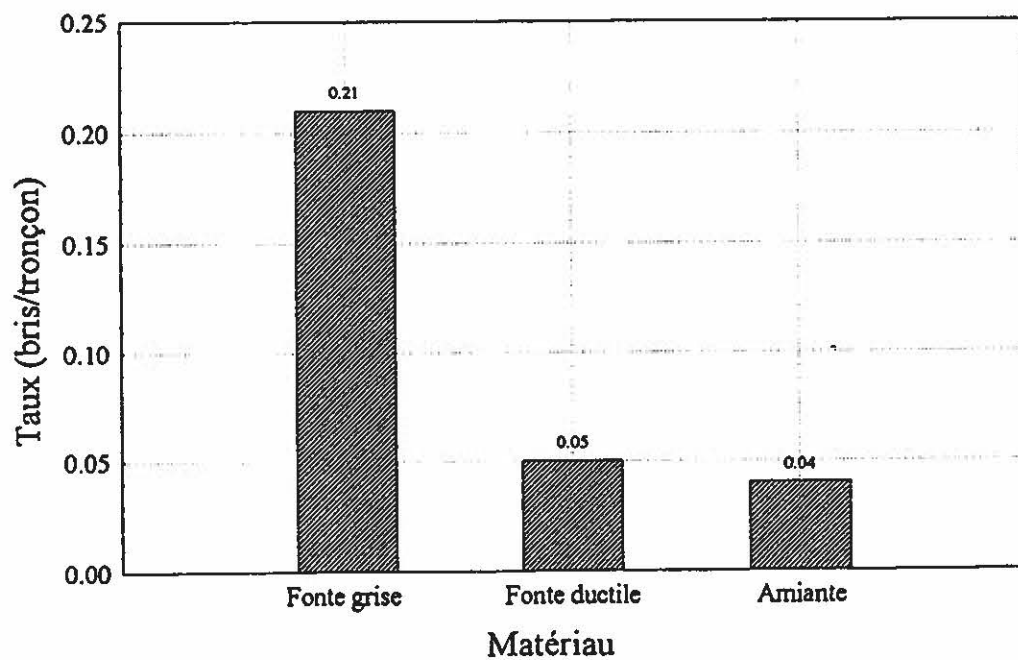


Figure 4.60 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité E

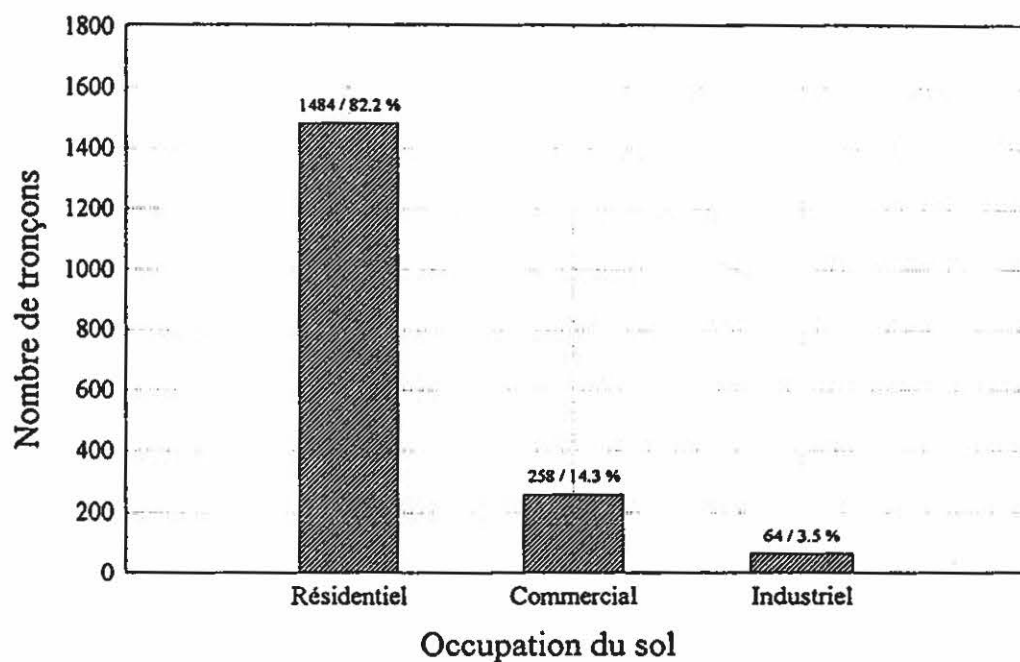


Figure 4.61 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité E

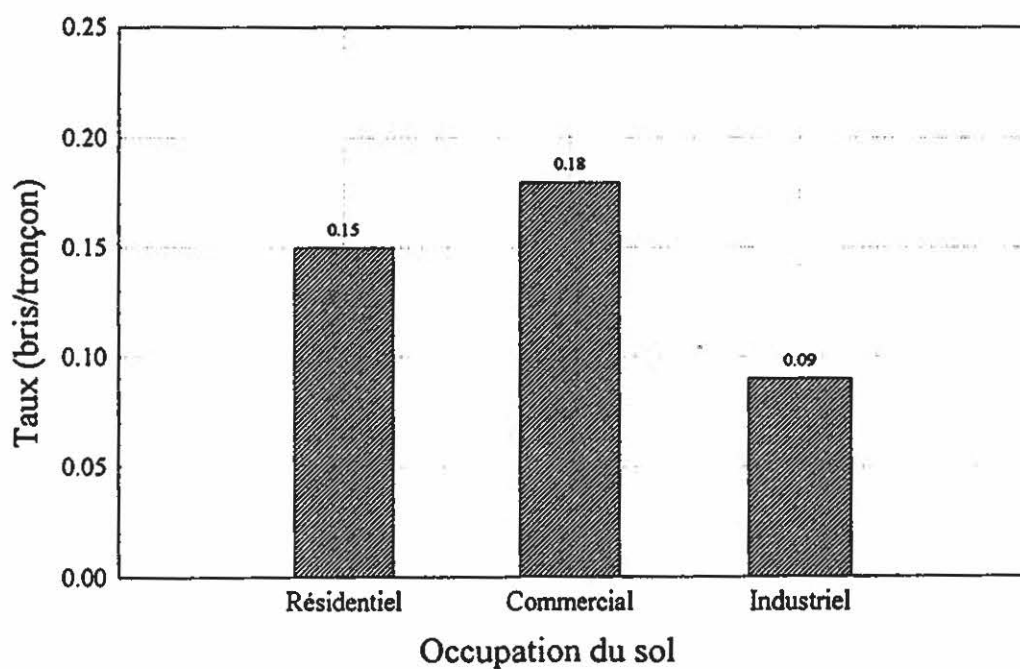


Figure 4.62 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité E

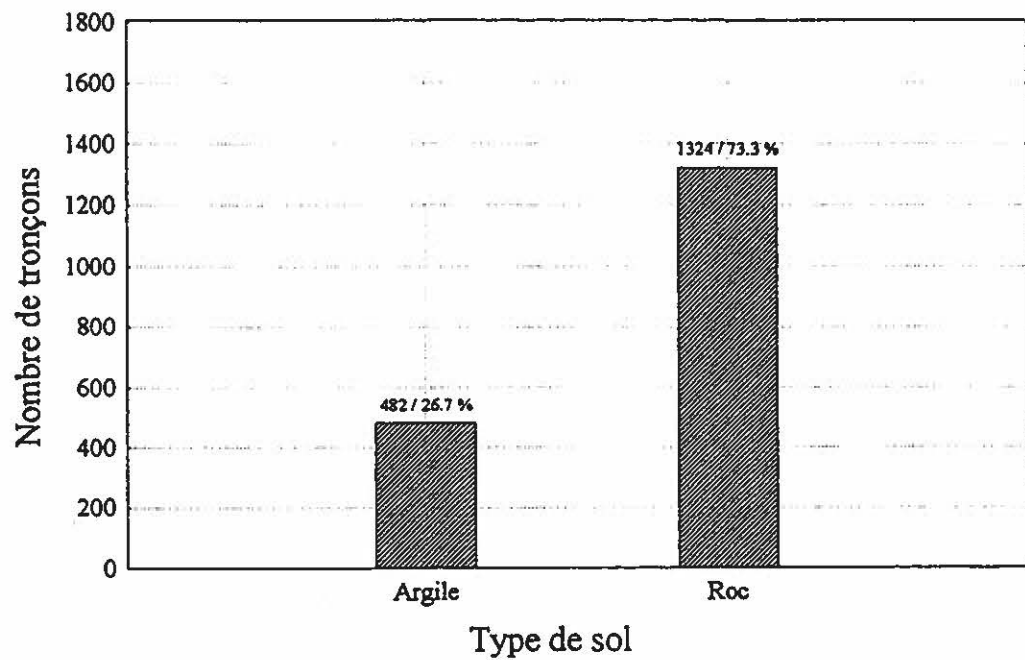


Figure 4.63 Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité E

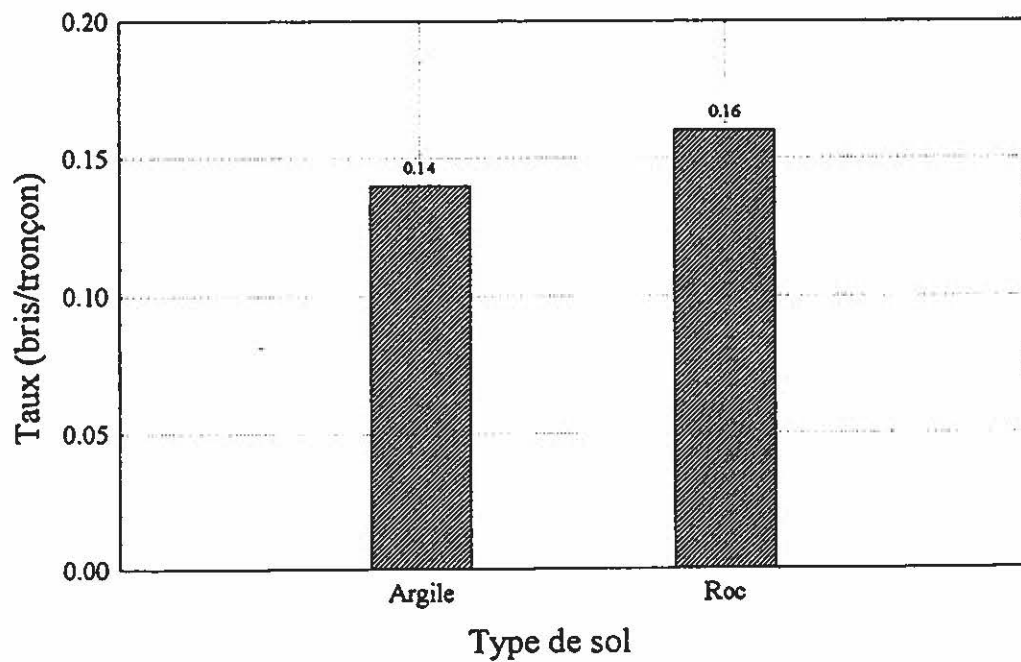


Figure 4.64 Taux de bris par type de sol pour la municipalité E

Années d'installation	Matériau	Diamètre	Tronçons installés	Nombre de bris	% tronçons	% bris
Avant 1945	Fonte grise	$\leq 8''$	155	76	7.7	4.5
		$> 8''$	6	1		
1945 - 1960	Fonte grise	$\leq 8''$	651	437	35.5	27.2
		$> 8''$	94	33		
1961 - 1975	Fonte grise	$\leq 8''$	237	607	32.5	55.3
		$> 8''$	28	25		
	Fonte ductile	$\leq 8''$	346	268		
		$> 8''$	70	50		
1976-1996	Fonte ductile	$\leq 8''$	179	177	24.3	13.0
		$> 8''$	77	32		
	PVC	$\leq 8''$	253	13		

Figure 4.65 Schéma-résumé pour la municipalité A

Années d'installation	Matériau	Diamètre	Tronçons installés	Nombre de bris	% tronçons	% bris
Avant 1945	Fonte grise	$\leq 8''$	339	89	20	19.1
		$> 8''$	65	15		
	Hyprescon	$> 8''$	2	0		
1945 - 1960	Fonte grise	$\leq 8''$	474	218	27.3	44.7
		$> 8''$	78	20		
	Hyprescon	$> 8''$	5	0		
1961 - 1975	Fonte grise	$\leq 8''$	36	13	26.5	26.1
		$> 8''$	8	0		
	Fonte ductile	$\leq 8''$	114	59		
		$> 8''$	20	8		
	PVC	$\leq 8''$	161	43		
		$> 8''$	183	12		
	Hyprescon	$> 8''$	17	3		
1976-1996	PVC	$\leq 8''$	355	43	26.2	10.1
		$> 8''$	176	13		
	Hyprescon	$> 8''$	4	1		

Figure 4.66 Schéma-résumé pour la municipalité B

Années d'installation	Matériau	Diamètre	Tronçons installés	Nombre de bris	% tronçons	% bris
Avant 1945	Fonte grise	≤ 8"	1	0	nég.	nég.
		> 8"	0	0		
1945 - 1960	Fonte grise	≤ 8"	301	439	23.3	35.6
		> 8"	61	70		
1961 - 1975	Fonte grise	≤ 8"	230	480	43.8	60.8
		> 8"	31	38		
	Fonte ductile	≤ 8"	272	295		
		> 8"	148	63		
1976-1996	Fonte ductile	≤ 8"	133	9	32.8	3.6
		> 8"	52	10		
	PVC	≤ 8"	233	4		
		> 8"	92	18		

Figure 4.67 Schéma-résumé pour la municipalité C

Années d'installation	Matériau	Diamètre	Tronçons installés	Nombre de bris	% tronçons
Avant 1945	Fonte grise	$\leq 8''$	0	0	inconnu
		$> 8''$	0	0	
1945 - 1960	Fonte grise	$\leq 8''$	3409	1025	18.1
		$> 8''$	882	82	
	Acier	$\leq 8''$	144	36	
		$> 8''$	44	3	
1961 - 1975	Fonte grise	$\leq 8''$	6875	1674	36.7
		$> 8''$	1157	95	
	Fonte ductile	$\leq 8''$	846	68	
		$> 8''$	155	11	
	Acier	$\leq 8''$	19	4	
		$> 8''$	1	0	
1976-1996	Fonte ductile	$\leq 8''$	6077	95	45.2
		$> 8''$	2130	17	
	Acier	$\leq 8''$	48	0	
		$> 8''$	38	0	
	PVC	$\leq 8''$	758	1	
		$> 8''$	342	9	
	Hyprescon	$\leq 8''$	0	0	
		$> 8''$	1743	11	

Figure 4.68 Schéma-résumé pour la municipalité D

Années d'installation	Matériau	Diamètre	Tronçons installés	Nombre de bris	% tronçons	% bris
Avant 1945	Fonte grise	$\leq 8''$	0	0	nég.	nég.
		$> 8''$	0	0		
1945 - 1960	Fonte grise	$\leq 8''$	249	58	13.8	20.6
		$> 8''$	1	0		
1961 - 1975	Fonte grise	$\leq 8''$	426	127	26.8	48.7
		$> 8''$	54	8		
	Fonte ductile	$\leq 8''$	4	2		
		$> 8''$	1	0		
1976-1996	Fonte grise	$\leq 8''$	334	55	59.3	30.7
		$> 8''$	123	2		
	Fonte ductile	$\leq 8''$	383	18		
		$> 8''$	204	6		
	Amiante	$\leq 8''$	25	1		
		$> 8''$	2	0		

Figure 4.69 Schéma-résumé pour la municipalité E

5 DÉVELOPPEMENT ET ADAPTATION DU MODÈLE

Compte tenu du contexte particulier de l'actuelle application, il nous est apparu nécessaire de développer un modèle original s'inspirant des modèles relevés dans la littérature et dont nous avons donné un aperçu dans les chapitres précédents. Le présent chapitre présente l'ensemble de la problématique de la modélisation, décrit le modèle développé et les hypothèses de base sur lesquelles ce modèle repose. Dans un premier temps, nous décrivons les objectifs de modélisation, *i.e.* les questions précises auxquelles le modèle doit apporter des réponses. La section 5.2 explique, à la lumière des objectifs de modélisation et des données disponibles, pourquoi et en quoi les modèles décrits au Chapitre 2 doivent être modifiés afin d'être parfaitement adaptés au présent contexte d'application. Le modèle est ensuite décrit à la section 5.3 et les hypothèses de base sur lesquelles il repose sont énoncées à la section 5.3.2.

5.1 Objectifs de modélisation

Le modèle doit, sur la base des données fournies par les municipalités-témoins (cf. Chapitre 3), être en mesure de prédire l'évolution du nombre de bris moyen par année pour une période allant jusqu'à 20 ans. De plus, il doit être en mesure d'estimer l'impact de différents scénarios de remplacement sur ce nombre moyen de bris. Ces scénarios de remplacement sont présentés à la section 6.4.1. Une fois ce modèle élaboré, une stratégie de transposition sera mise en place afin qu'il puisse être appliqué aux municipalités recensées par le questionnaire d'INRS-Urbanisation (cf. Chapitre 7).

5.2 Nécessité de développer une approche originale

A la lumière des objectifs énoncés à la section précédente, il appert que le modèle doit être de type prédictif, doit fonctionner avec un minimum de données et être relativement robuste. Reprenons rapidement les modèles décrits précédemment. D'abord, les modèles dits agrégés permettent de décrire l'évolution générale du nombre de bris pour une ville donnée en prenant en compte le temps depuis la pose. Ces modèles, tels que présentés dans la littérature, ne permettent pas de tenir

compte du remplacement. Le modèle proposé s'inspire cependant de ce type de modèle, puisqu'il assume que l'état de détérioration du réseau dépend en premier chef du temps.

Les modèles de régression, quant à eux, sont des modèles utiles pour analyser et identifier les facteurs de risque pouvant déterminer l'évolution de l'état du réseau, mais ne sont pas des modèles capables de prédire l'évolution du nombre de bris pour une municipalité donnée. Enfin, l'analyse de survie est une méthode très utile pour déterminer les formes des différentes fonctions de probabilités représentant le vieillissement des tronçons, mais n'est pas, comme tel, un modèle prédictif. La section 6.1 décrivant la méthodologie de calage nous permettra de mieux voir comment, justement, l'analyse de survie est utilisée dans le contexte de modélisation présent.

5.3 Modèle proposé

L'approche que nous favorisons est une approche statistique s'inspirant des modèles agrégés et utilisant l'analyse de survie afin de caler le modèle. L'évolution du réseau est décrit, suivant cette approche, en définissant une probabilité de bris pour chaque tronçon, probabilité qui peut dépendre des caractéristiques de la conduite, de son environnement et de "l'histoire" de celle-ci. Une fois cette probabilité définie, il est possible de prédire le nombre de bris sur le réseau en calculant simplement la fraction des conduites subissant des bris année après année (cf Figure 5.1). Parmi les facteurs importants dont dépend cette probabilité, la littérature démontre que deux facteurs se démarquent : l'âge et le nombre de bris antérieurs. Mentionnons, par exemple, les travaux de Eisenbeis [1994] qui concluent, à partir d'une analyse sur quatre réseaux, que le comportement des probabilités de bris est différent selon qu'il s'agisse du premier, du deuxième au quatrième, ou du cinquième bris et plus. Globalement, ce travail confirme ce que d'autres études ont démontré, à savoir que la probabilité de bris augmente selon le nombre de bris antérieurs observés pour un tronçon donné. Le nombre de bris est donc en quelque sorte un indicateur de l'état structural global du tronçon. L'apparition d'un premier bris est symptomatique d'un état structural dégradé et donc un indicateur de possibles bris subséquents. De plus, on peut penser que les

travaux de réparation effectués lors d'un bris peuvent être source de stress et favoriser l'apparition de bris subséquents.

5.3.1 Considérations théoriques

Avant d'aller plus avant dans la description du modèle, nous avons jugé utile de décrire très brièvement un certain nombre de concepts importants qui seront utilisés dans ce qui suit. Le modèle proposé est, comme nous le disions, de nature statistique et considère la probabilité de bris des tronçons en fonction d'un certain nombre de variables et paramètres. Trois types de fonctions seront souvent mentionnées à savoir les fonctions : (1) de survie, (2) de risque et (3) de densité de probabilité [Kalbfleisch et Prentice 1980]. Faire une hypothèse sur une de ces fonctions est équivalent à en faire une sur les trois puisqu'elles sont interdépendantes. Le modèle de Weibull est souvent cité dans la littérature en rapport avec la détérioration des conduites d'aqueduc. La fonction de survie correspond à la probabilité qu'un tronçon donné n'ait pas subi de bris à un temps t donné. L'équation décrivant la fonction de survie, noté $F(t)$, du modèle de Weibull s'écrit:

$$F(t) = \exp \left[- (\lambda t)^p \right] \quad (5.1)$$

La fonction de risque $h(t)$, quant à elle, définit la probabilité de bris instantanée au temps t sur un tronçon n'ayant pas subi de bris antérieurement. Elle est de la forme suivante dans le cas de la distribution de Weibull:

$$h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \quad (5.2)$$

Trois comportements différents sont possibles selon la valeur de p . Pour $p < 1$, $h(t)$ est une fonction décroissante, alors que pour $p > 1$, $h(t)$ est une fonction croissante. Le cas $p = 1$ correspond au cas où $h(t) = \lambda$ et nous avons alors la fonction de risque de la distribution exponentielle, indépendante du temps. Enfin la fonction de densité de probabilité définit la probabilité de bris en fonction du temps. Elle indique, par exemple, la fraction de tronçons qui

subiront un bris au temps t . Cette dernière fonction s'écrit, toujours considérant la distribution de Weibull :

$$f(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \exp[-(\lambda t)^p] \quad (5.3)$$

Le cas $p = 1$ de la distribution de Weibull correspond au cas de la distribution exponentielle qui suppose une fonction de risque indépendante du temps et égale à λ . La Figure 5.2 montre un exemple avec $p = 2.5$ et $\lambda = 0.025$.

5.3.2 Description du modèle

Le modèle proposé prend en compte l'âge du tronçon et le nombre de bris antérieurs pour définir la probabilité de bris. Deux fonctions de risque sont définies selon qu'il s'agisse du premier bris ou d'un bris subséquent. La fonction de risque $h(t)$ utilisée pour le premier bris est la fonction de Weibull définie par l'Équation 5.2. Deux paramètres sont donc nécessaires pour caractériser cette fonction, λ et p . Cette fonction définit la probabilité de bris au temps t ($t = 0$ correspondant à la date de pose), sachant que le tronçon n'a pas subi de bris jusqu'à ce temps. Les bris subséquents (deuxième, troisième, etc) sont modélisés en considérant une distribution exponentielle définie par un seul paramètre, que nous désignerons par λ_2 . Le Tableau 5.1 présente un résumé des types de distribution de probabilité de bris intégrées au modèle proposé.

Tableau 5.1 - Type de distribution et paramètres selon l'ordre du bris

Comportement	Type de distribution	Paramètres
Premier bris	Weibull	p, λ_1
Bris subséquents	Exponentielle	λ_2

Comme on peut le voir le modèle proposé est simple et ne comporte que trois paramètres de calage. Les raisons justifiant un tel choix de modélisation sont multiples. D'abord, compte tenu

de la nature, de la qualité et de la quantité des données disponibles, nous avons opté pour une approche de modélisation simple. La littérature montre que le deuxième bris n'est souvent pas exactement décrit par une exponentielle. Toutefois, dans le contexte de la problématique actuelle, l'utilisation d'une exponentielle nous semble tout à fait justifiée d'autant plus que, comme nous le verrons au Chapitre 6, le calage du modèle à trois paramètres sur la base des données disponibles donnent des résultats très satisfaisants. L'utilisation de différentes fonctions de risque pour les différents ordres de bris ne ferait que multiplier le nombre de paramètres de calage sans augmenter de façon significative la qualité du calage et sans modifier de façon significative la qualité des résultats. La stratégie a donc été de considérer un modèle simple et de voir si ce modèle permettrait après calage de reproduire les résultats observés.

Le modèle considéré ne demande donc que très peu de données. Il faut lui fournir : (1) le nombre de tronçons installés chaque année depuis le premier tronçon jusqu'à aujourd'hui, (2) les remplacements effectués *i.e* le nombre de tronçons remplacés chaque année et la date d'installation des tronçons que l'on remplace, et (3) pour fin de calage du modèle, les années de bris et les tronçons sur lesquels sont survenus ces bris. Cette information de base est disponible pour l'ensemble des municipalités-témoins et pour les municipalités ayant correctement répondu au questionnaire d'INRS-Urbanisation. Il est important de noter que l'information relative au remplacement de tronçons effectué par le passé est très souvent incomplète ou très imprécise. Pour les municipalités-témoins, seule la municipalité A nous a fourni une liste relativement exhaustive des remplacements effectués ces dernières années. Pour les autres municipalités, nous ne disposons que de très peu d'information, voire aucune, comme par exemple pour la municipalité D.

Une fois ce modèle calé et appliqué aux différentes municipalités-témoins, nous avons été à même d'effectuer différents tests afin de voir si d'autres facteurs de risque ne devaient pas être pris en compte. Comme nous le verrons, à l'exception de la municipalité A, le modèle sous cette forme très simple donne des résultats tout à fait satisfaisants et l'addition de facteurs de risque

supplémentaires n'améliore pas de façon sensible la qualité des résultats.

5.3.3 Hypothèses de base du modèle

Le modèle proposé repose sur l'hypothèse suivante : la probabilité de bris d'une conduite à un temps t donné est déterminée par le nombre de bris antérieurs et par le temps écoulé depuis la pose ou le dernier bris selon le cas. Le "vieillissement" des tronçons est donc le même pour tous les tronçons du réseau peu importe le matériau, la date de pose, etc. Nous avons constaté cependant que dans le cas de la municipalité A, les tronçons plus anciens présentent des fréquences de bris nettement moins élevées que ce que l'extrapolation du comportement des conduites installées récemment ne laisse présager. Nous avons donc modifié le modèle en conséquence et proposons un modèle où deux jeux de paramètres différents sont utilisés pour décrire les fonctions de risque selon qu'il s'agisse du premier ou de bris subséquents. Pour les autres municipalités, il faut regarder les fonctions de risque proposées comme les fonctions de risque "moyennes" des tronçons. Des analyses plus poussées des données de ces municipalités semblent suggérer que le matériau et la date de pose ont une influence sur la probabilité de bris. Toutefois, seule la municipalité A possède un historique suffisamment long qui nous permette de démontrer clairement cette influence et de la quantifier. Par ailleurs, puisque nous nous intéressons au nombre de bris total sur le réseau et non au nombre de bris par type de matériau, par date de pose, etc., l'idée de considérer le comportement moyen du réseau est tout à fait justifiée.

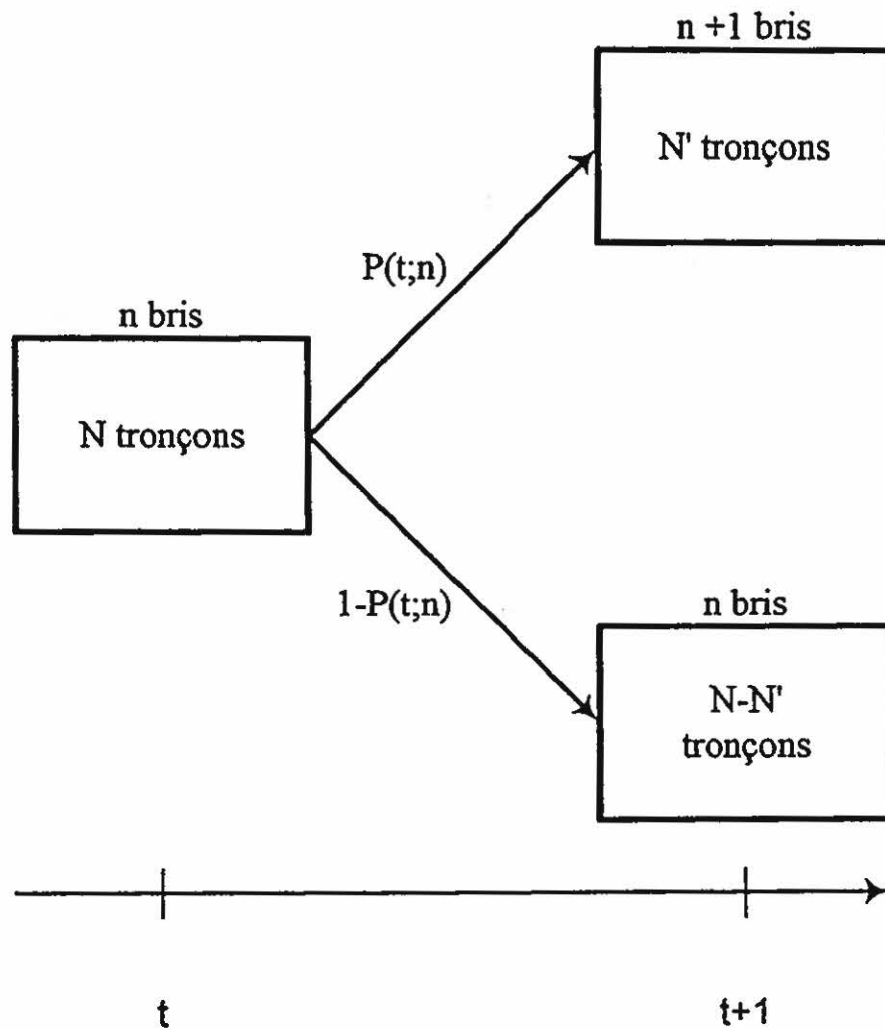


Figure 5.1 Modélisation de l'évolution des bris sur un réseau d'aqueduc. $P(t;n)$ est la probabilité qu'un bris apparaisse après un temps t , depuis le dernier bris ou la pose, pour un tronçon ayant subi n bris

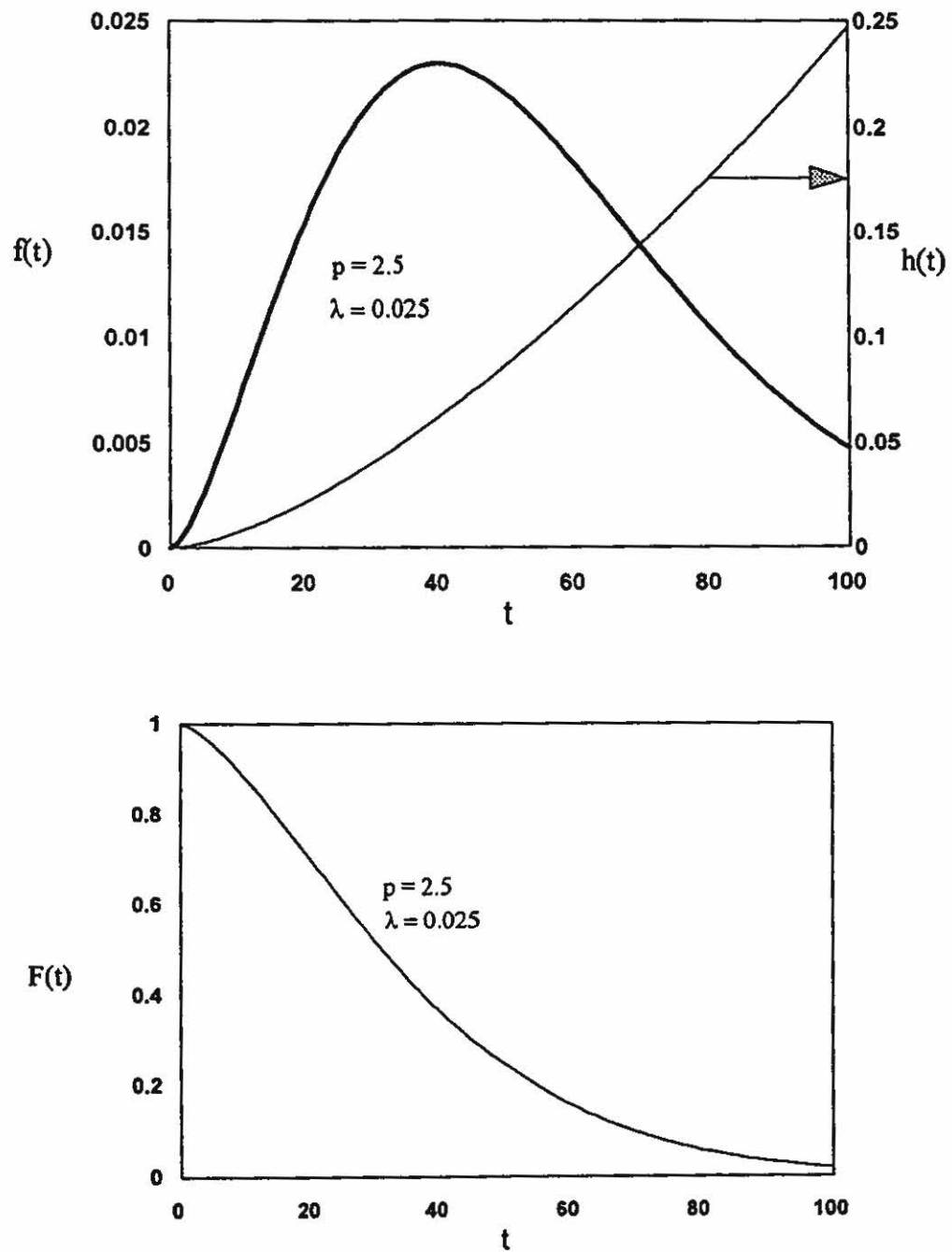


Figure 5.2 Densité de probabilité $f(t)$, fonction de risque $h(t)$ et fonction de survie $F(t)$ associées à la distribution de Weibull

6 CALAGE ET APPLICATION AUX MUNICIPALITÉS - TÉMOINS

La phase de calage du modèle vise à déterminer sur la base d'un ensemble de données historiques, les valeurs des trois paramètres du modèle pour chacune des municipalités-témoins. Comme nous le mentionnions précédemment, le faible historique de bris disponible (cf. Chapitre 4) nous a conduit à développer un modèle simple ne comptant qu'un minimum de paramètres de calage. Outre le modèle, l'une des originalités de l'approche proposée réside dans la méthodologie de calage du modèle. Cette question est discutée à la section 6.1. Une fois la méthodologie déterminée, la phase de calage proprement dite a pu démarrer. La section 6.2 présente les résultats pour chacune des municipalités-témoins.

6.1 Méthodologie de calage

La difficulté de caler le modèle proposé provient essentiellement du faible historique de bris disponible. Certes, certaines municipalités possèdent un historique plus long, que l'on pense à la municipalité A avec un historique de 21 ans, mais généralement il n'en est pas ainsi (cf Chapitre 4). Typiquement l'historique de bris couvre une période de temps Δt_1 beaucoup plus courte que l'historique des conduites de la municipalité T déterminé essentiellement par la période écoulée depuis l'année de pose du premier tronçon. La période d'historique de bris correspond à ce que l'on peut appeler la "fenêtre d'observation". Les tronçons installés à une certaine époque, antérieure de x années à l'année de début d'archivage des bris, sont observés alors qu'elles ont x années. Les moyennes effectuées sur la période de l'historique de bris nous renseignent sur ces tronçons lorsqu'ils sont rendus à ce stade de leur vieillissement. Il en est ainsi de tous les tronçons installés à différentes périodes et observés pendant la période de l'historique de bris. Le calage vise donc à déterminer les paramètres du modèle en utilisant au mieux les informations recueillies pendant la période d'observation.

Le calage du modèle s'est fait en deux temps. D'abord l'analyse de survie a été utilisée (cf.

Kalbfleisch et Prentice [1980]). Cette méthode statistique a été développée afin d'analyser des populations pour lesquelles les individus sont soumis à certains types de "défaillance". Elle est utilisée, par exemple, pour estimer l'efficacité d'un traitement médical, ou encore la fiabilité d'un procédé industriel. L'analyse de survie a été appliquée à la problématique des bris de réseau d'aqueduc par Andreou *et al.* [1987a]. La particularité de cette technique est qu'elle permet de tenir compte du fait qu'il y ait eu bris sur telle ou telle conduite, mais elle permet aussi de prendre en compte le fait que telle ou telle conduite n'a pas subi de bris pendant la période d'analyse. L'application de cette technique lorsque les historiques de bris sont courts posent toutefois certains problèmes. Lorsque l'historique est suffisamment long, on peut considérer l'ensemble des conduites installées pendant cette période et observer un nombre de bris suffisant pour permettre une analyse statistique valable. Si cet historique est trop court par contre, alors le nombre de bris observé sur des conduites installées durant la période d'observation risque fort d'être trop petit pour nous permettre de réaliser une analyse valable. On peut alors très bien effectuer une analyse en considérant l'ensemble des tronçons installés. L'hypothèse implicitement formulée dans ce cas, est que le premier bris observé correspond au premier bris réel sur le tronçon, ce qui, on le devine, serait difficile à admettre pour un "vieux réseau" avec un court historique de bris.

Ce type d'analyse peut tout de même être fort utile dans un contexte de court historique de bris. Nous avons d'abord effectué ce type d'analyse en ne considérant que les tronçons installés durant la période couverte par l'historique de bris, en stratifiant les données selon qu'il s'agisse du premier, deuxième ou troisième bris. Pour certaines municipalités, telles les municipalités B ou E qui possèdent des historiques de bris très courts, les résultats sont peu concluants. Nous avons, par la suite, repris cette analyse en considérant l'ensemble des tronçons et en stratifiant suivant qu'il s'agisse du premier bris observé pendant l'historique de bris ou des bris subséquents. Cette façon de faire nous est dictée par la nature du modèle proposé. En effet, la modélisation ne distingue pas entre les deuxième, troisième ou quatrième bris mais ne considère que deux comportements possibles à savoir celui associé à l'apparition du premier bris et celui associé à l'apparition des bris subséquents. En stratifiant les données en fonction du premier bris observé

et des bris suivants, nous sommes assurés que les tronçons appartenant à ce deuxième groupe en sont au moins à leur deuxième bris. L'analyse de survie de ce groupe de bris nous montre que la fonction de risque se rapproche d'une fonction exponentielle dans la plupart des cas et elle nous permet donc de définir une fonction de risque moyenne associée aux bris subséquents. Par ailleurs, lorsque l'analyse est reprise en considérant des groupes de stratification où sont éliminés successivement les deuxième, troisième, quatrième bris, on observe, pour les municipalités avec un historique de bris suffisant, que le comportement de la fonction de risque se rapproche de plus en plus d'une forme exponentielle. Ce type d'analyse confirme l'hypothèse voulant que la fonction de risque pour les bris subséquents au premier bris puisse être représentée, en moyenne, par la fonction de risque de la distribution exponentielle. Ce type d'analyse nous a permis par ailleurs d'estimer, pour chaque municipalité-témoin, λ_2 , la valeur du paramètre de la fonction de risque pour les deuxième bris et plus (voir Tableau 6.1).

Une fois fixée la valeur de λ_2 , on procède au calage des deux paramètres de la fonction de risque de Weibull pour les premier bris. Pour ce faire, nous estimons à partir de l'historique disponible, la probabilité $P(t)$ d'observer un bris sur un tronçon quelque soit l'ordre du bris (premier, deuxième, etc.) t années après son installation. La Figure 6.1 montre la courbe de $P(t)$ en fonction de t obtenue pour la municipalité A. Les autres municipalités-témoins nous donnent des courbes à peu près similaires si ce n'est la brusque décroissance de la courbe après 30 ans. Pour les autres municipalités, nous observons plutôt un plateau lorsque t devient grand.

La probabilité $P(t)$ peut être aisément estimée en fonction du modèle et s'écrit sous la forme suivante:

$$P(t) = \frac{1}{1-\lambda_2} \left[\lambda_2 (1-F(t)) + f(t) \right] \quad (6.1)$$

où $F(t)$ est la fonction de survie et $f(t)$ la densité de probabilité associées à la distribution de Weibull. Le calage peut donc s'effectuer simplement en ajustant les paramètres λ_1 et p du modèle

de Weibull. La Figure 6.1 montre le résultat du calage dans le cas de la municipalité A (seule la partie de la courbe où $t < 30$ a été considérée lors du calage ; voir section 6.3.1).

6.2 Calage du modèle pour les municipalités-témoins

Le Tableau 6.1 présente l'ensemble des valeurs des paramètres ainsi que certaines caractéristiques pour chacune des municipalités-témoins ainsi que les incertitudes sur ces valeurs. Si les valeurs de λ_2 obtenues sont très près les unes des autres, il en est tout autrement pour les fonctions de risque des premier bris. La Figure 6.2 montre les fonctions de survie associées au premier bris pour chacune des municipalités-témoins. On voit que plusieurs comportements sont observés. Ces résultats appellent les commentaires suivants.

Tableau 6.1 Paramètres de calage obtenus pour les municipalités-témoins

Municipalité	λ_1	p	λ_2	Nombre de bris observé en 1996	Linéaire de réseau (km)	Nombre de bris aux 100 km
A1 (avant 1960)	0.020 (2)	1.8 (1)	0.09 (2)	159	352	45.7
A2 (après 1960)	0.020 (2)	1.2 (1)	0.20 (2)			
B	0.016(2)	2.2 (1)	0.12 (1)	80	305	26.2
C	0.026 (3)	1.9 (1)	0.16 (2)	121	407	29.7
D	0.012 (1)	1.9 (1)	0.17 (2)	517	1507	34.3
E	0.012 (2)	1.6 (1)	0.10 (1)	31	155	20.0

6.2.1 Municipalité A

La municipalité A est la seule municipalité-témoin pour laquelle il a été nécessaire de modifier le modèle de façon à considérer un facteur de risque absent du modèle de base. L'examen de la Figure 6.1 montre en effet que le vieillissement des conduites dépend fortement de la date de pose. En effet, il semble que les conduites installées récemment (depuis 1960) présentent une fréquence de bris beaucoup plus élevée que les tronçons installés avant cette année. Nous avons examiné la possibilité que le type de matériau puisse expliquer cette observation. L'examen des données nous amène à conclure que le matériau n'est pas uniquement en cause puisque, pour la fonte grise, le comportement des tronçons installés avant 1960 et après 1960 est très différent. Évidemment, nous pouvons toujours émettre l'hypothèse que la fonte grise utilisée au début des années 60 était de moins bonne qualité que celle utilisée avant 60. En fait, plusieurs hypothèses sont possibles. Un entretien avec le gestionnaire du réseau pourrait à ce titre être fort instructif. En fait, nous soupçonnons qu'un ensemble de facteurs est en cause dont le type de matériau, la date de pose, le contracteur, etc..

Afin de tenir compte de ce facteur de risque lié à la date de pose (avant vs après 1960), nous avons considéré deux fonctions de risque différentes pour modéliser la municipalité A, l'une pour les tronçons installés avant 1960 et l'autre pour ceux installés après 1960. Les valeurs des paramètres apparaissent au Tableau 6.1 et les distributions correspondantes à la Figure 6.2. La Figure 6.3 permet de comparer le nombre de bris simulé avec les valeurs observées pour l'historique de bris disponible. On observe une nette tendance à l'accroissement, très bien reproduite par le modèle.

6.2.2 Municipalité B

L'historique de bris de cette municipalité est le plus court que nous possédions. La Figure 6.4 donne un aperçu en fait de la difficulté de caler le modèle avec si peu de données. Si le modèle semble bien reproduire le nombre moyen de bris observé pendant la période couverte par l'historique de bris, il est difficile de distinguer la tendance. Certes, la tendance est à la hausse mais la pente est difficile à établir avec précision. De plus, tout comme pour la municipalité A, nous

constatons que les conduites installées il y a plus de 40 ans semblent se détériorer moins rapidement que celles installées récemment. Toutefois, nous avons préféré, toujours à cause du faible nombre de données, définir des fonctions de risque représentatives du comportement moyen de l'ensemble des conduites.

6.2.3 Municipalité C

La municipalité C a vu son nombre de bris annuel moyen croître de façon très marquée depuis quelques années. L'examen de la fonction de distribution de cette municipalité montre en effet que le maximum de bris survient à environ 25 ans. Il semble donc que les tronçons de ce réseau qui entrent dans une phase de deuxième bris et plus sont de plus en plus nombreux. Les nombres de bris simulés et observés sont présentés à la Figure 6.5. Encore une fois, on constate que le modèle reproduit bien l'évolution à la hausse du nombre de bris annuel observé. Compte tenu de la croissance très rapide du nombre de bris durant la période d'observation et de la forme de la densité de distribution de cette municipalité, on peut affirmer que la municipalité C est une municipalité qui se caractérise par un vieillissement rapide de son réseau d'aqueduc.

6.2.4 Municipalité D

Comme nous l'avons mentionné au Chapitre 4, la qualité des données de la municipalité D, particulièrement en ce qui a trait aux années d'installation des tronçons, ne nous a pas permis de pousser très loin l'analyse. Nous avons pu tout de même, sur la base de la méthodologie décrite à la section précédente, estimer un jeu de paramètres. La comparaison avec les autres municipalités est toutefois difficile compte tenu que la municipalité D est la seule qui effectue un programme d'inspection systématique de son réseau. Ce programme a débuté partiellement en 1977 et est devenu systématique en 1989 au début de la période couverte par l'historique de bris disponible. Bien que l'on puisse penser qu'un tel programme ne diminue pas en soi le nombre de bris mais permette de les détecter avant que l'eau n'arrive en surface, l'impact sur le nombre de bris au moment de sa mise en place demeure très difficile à évaluer. On peut supposer que le nombre de bris augmente les premières années du programme de détection mais dans quelle mesure ? Suite

à cette augmentation, on peut penser que le nombre de bris restera stable puisque ce programme a pour conséquence de détecter des fuites qui autrement auraient mis quelques mois (voire quelques années) à être détectées. Ceci pourrait expliquer la forme de la courbe observée pour la municipalité D (voir Figure 6.6). Encore une fois, le court historique, apparent sur ce dernier graphique, rend l'estimation d'une tendance difficile. Par ailleurs, l'examen de la fonction de survie (Figure 6.2) montre que la probabilité qu'un tronçon ne subisse pas de bris après 100 ans est relativement élevé, de l'ordre de 40 %. Le modèle nous indique donc que la municipalité D est la municipalité dont la fonction de survie favorise le moins l'apparition de premier bris mais dont la probabilité de bris subséquents est la plus élevée.

6.2.5 Municipalité E

La municipalité E est la plus petite municipalité considérée et celle possédant le plus petit nombre de bris aux 100 km. On observe cependant dans cette municipalité la même évolution à la hausse du nombre de bris annuel (cf. Figure 6.7). Cette croissance est toutefois la moins prononcée des municipalités-témoins ce qui nous fait dire que le réseau de la municipalité E vieillit à un rythme modéré à faible.

6.3 Prédiction du nombre de bris pour des horizons de 5, 10 et 20 ans

Le modèle proposé nous a permis, après calage, de reproduire de façon satisfaisante les tendances pour les nombres de bris annuels moyens observés pour chacune des municipalités-témoins. Nous sommes en mesure maintenant, sur la base de la définition de scénarios de remplacement et de croissance, de déterminer l'évolution future du nombre de bris pour chacune de ces municipalités pour des horizons de 5, 10 et 20 ans. La section qui suit décrit dans le détail les scénarios de remplacement et de croissance considérés dans la présente étude.

6.3.1 Scénarios de remplacement et de croissance considérés

D'abord, concernant la croissance des municipalités-témoins, nous considérons un scénario de croissance nulle, i.e. qu'aucun nouveau tronçon ne sera installé sur la période de 20 ans à venir. Concernant le remplacement des tronçons, quatre scénarios seront considérés. Les taux de remplacement de ces quatre scénarios sont : (1) aucun remplacement, (2) 0.5 % du linéaire par année, (3) 1.0 % du linéaire par année et (4) taux de remplacement nécessaire pour que le nombre de bris soit comparable dans 20 ans à ce qu'il est aujourd'hui.

Une fois le taux de remplacement défini, il faut préciser comment s'effectue le remplacement, i.e. en fonction de quel critère remplace-t-on tel ou tel tronçon. De nombreuses règles de remplacement sont possibles. Dans le cadre de la présente modélisation, ce qui est déterminant pour l'évolution du nombre de bris d'un tronçon donné, c'est le fait qu'il ait subi ou non un bris antérieurement. On peut donc imaginer deux types de remplacement : (1) aléatoire, où le remplacement se fait sans tenir compte ni de l'âge, ni du nombre de bris antérieurs, (2) optimal, où l'on remplace d'abord les tronçons ayant déjà subi un bris sans égard à l'âge du tronçon (le risque de bris est indépendant du temps pour les bris subséquents). Nous avons opté pour cette deuxième règle de remplacement. En réalité le remplacement est souvent fait lorsqu'une rue complète est reconstruite. Il peut donc se trouver sur cette section des tronçons qui ont déjà subi des bris et des tronçons qui n'en ont jamais subis. Lorsque le taux de remplacement est précisé, le modèle identifie, à chaque année, les tronçons ayant déjà subi un bris et parmi ces tronçons, aléatoirement, remplace le nombre de tronçons correspondant au taux prescrit. Il est à noter que la conversion du taux de remplacement exprimé en kilomètres à un nombre de tronçons à remplacer se fait en utilisant la longueur moyenne des tronçons du réseau considéré.

Dans le cas de la municipalité A où la probabilité de bris dépend de l'âge, de l'ordre du bris et de la date d'installation (avant ou après 1960), deux stratégies de remplacement ont été considérées. La première, désignée par A^a aux Tableaux 6.2, 6.3, 6.4 et 6.6, consiste à remplacer aléatoirement les tronçons ayant déjà subi un bris (i.e. sans considérer le fait qu'ils aient été installés avant ou

après 1960). La seconde stratégie, désignée par A^b aux mêmes tableaux, consiste à remplacer d'abord des tronçons ayant déjà subi un bris et qui ont été installés après 1960. Si aucun tronçon de ce type ne peut être remplacé, alors un tronçon installé avant 1960 est remplacé. Cette dernière stratégie de remplacement est optimale puisque les tronçons les plus susceptibles de subir des bris sont d'abord remplacés.

6.3.2 Évaluation du nombre de bris par an pour des horizons de 5, 10 et 20 ans

Une série de simulations a été menée pour les municipalités-témoins sur la base des scénarios de remplacement présentés à la section précédente. Nous avons de plus effectué une analyse de sensibilité qui nous a permis d'estimer les écarts-types sur le nombre de bris engendré par les incertitudes estimées sur les valeurs des paramètres. Pour ce faire, des valeurs de paramètres ont été tirées au hasard à partir des distributions initiales, générant donc une distribution des nombres de bris simulés. L'écart-type de cette distribution est ensuite calculé et correspond à l'incertitude sur le nombre de bris.

Les Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4 présentent les résultats obtenus pour les scénarios de type (1), (2) et (3) pour les cinq municipalités-témoins pour des horizons de 5, 10 et 20 ans. Le Tableau 6.5 présente le nombre de bris simulé par le modèle pour l'année 1996 et qui a servi à calculer les pourcentages d'accroissement des Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4. Enfin, le Tableau 6.6 présente les pourcentages de linéaires qu'il est nécessaire de remplacer annuellement pour que le nombre de bris après 20 ans soit comparable au nombre de bris de 1996 (scénario (4)).

Tableau 6.2 Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 5 ans

Municipalité	Pourcentage de linéaire remplacé					
	0.0 %		0.5 %		1.0 %	
	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996
A ^a *	181 (+/- 17)	13 (+/- 11)	176 (+/- 20)	10 (+/- 12)	172 (+/- 18)	7.5 (+/- 11)
A ^b *	181 (+/- 17)	13 (+/- 11)	170 (+/- 20)	6 (+/- 12)	160 (+/- 18)	0 (+/- 11)
B	118 (+/- 13)	24 (+/- 14)	110 (+/- 13)	16 (+/- 13)	103 (+/- 13)	- 8 (+/- 14)
C	163 (+/- 18)	21 (+/- 13)	155 (+/- 18)	15 (+/- 13)	204 (+/- 21)	51 (+/- 16)
D	802 (+/- 109)	34 (+/- 16)	681 (+/- 121)	13.5 (+/- 20)	578 (+/- 108)	- 4 (+/- 18)
E	46 (+/- 9)	15 (+/- 23)	41 (+/- 10)	2 (+/- 25)	37 (+/- 9)	- 7.5 (+/- 25)

*Note : A^a représente le cas de remplacement aléatoire et, A^b, le cas de remplacement prioritaire de conduites installées après 1960

Tableau 6.3 Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 10 ans

Municipalité	Pourcentage de linéaire remplacé					
	0.0 %		0.5 %		1.0 %	
	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996
A ^a *	202 (+/- 18)	26 (+/- 12)	195 (+/- 20)	22 (+/- 12)	183 (+/- 18)	14 (+/- 11)
A ^b *	202 (+/- 18)	26 (+/- 12)	183 (+/- 20)	14 (+/- 13)	164 (+/- 18)	2.5 (+/- 12)
B	136 (+/- 15)	43 (+/- 16)	120 (+/- 14)	26 (+/- 15)	107 (+/- 14)	13 (+/- 14)
C	189 (+/- 21)	40 (+/- 16)	173 (+/- 18)	28 (+/- 13)	161 (+/- 18)	19 (+/- 14)
D	989 (+/- 136)	65 (+/- 23)	777 (+/- 120)	29.5 (+/- 20)	551 (+/- 153)	-8 (+/- 25)
E	55 (+/- 10)	37.5 (+/- 25)	45 (+/- 10)	12.5 (+/- 25)	37 (+/- 10)	- 7.5 (+/- 25)

*Note : A^a représente le cas de remplacement aléatoire et, A^b, le cas de remplacement prioritaire de conduites installées après 1960

Tableau 6.4 Nombre de bris simulé pour les différentes municipalités-témoins en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 20 ans

Municipalité	Pourcentage de linéaire remplacé					
	0.0 %		0.5 %		1.0 %	
	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996	Nombre de bris	% augmentation p/r à 1996
A ^a *	242 (+/- 19)	51 (+/- 12)	221 (+/- 25)	38 (+/- 15)	208 (+/- 21)	30 (+/- 13)
A ^b *	242 (+/- 19)	51 (+/- 12)	203 (+/- 25)	27 (+/- 15)	168 (+/- 21)	5 (+/- 13)
B	171 (+/- 18)	80 (+/- 20)	142 (+/- 15)	49 (+/- 16)	115 (+/- 16)	17 (+/- 16)
C	232 (+/- 26)	72 (+/- 19)	204 (+/- 21)	51 (+/- 16)	181 (+/- 19)	34 (+/- 14)
D	1414 (+/- 168)	136 (+/- 27)	976 (+/- 166)	63 (+/- 27)	554 (+/- 153)	- 8 (+/- 32)
E	74 (+/- 13)	85 (+/- 30)	55 (+/- 12)	37.5 (+/- 30)	40 (+/- 11)	0 (+/- 27.5)

*Note : A^a représente le cas de remplacement aléatoire et, A^b, le cas de remplacement prioritaire de conduites installées après 1960

Tableau 6.5 Nombre de bris simulé pour l'année 1996 ayant servi au calcul des pourcentages d'augmentation apparaissant aux Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4

Municipalité	Nombre de bris moyen en 1996
A	160
B	95
C	135
D	600
E	40

Tableau 6.6 Pourcentage de linéaires qu'il est nécessaire de remplacer annuellement pour que le nombre de bris après 20 ans soit comparable au nombre de bris de 1996 (scénario (4))

Municipalité	Pourcentage de linéaire à remplacer
A ^a *	1.9 (+/- 0.5)
A ^b *	1.1 (+/- 0.5)
B	1.4 (+/- 0.5)
C	2.0 (+/- 0.5)
D	0.9 (+/- 0.5)
E	1.0 (+/- 0.5)

*Note : A^a représente le cas de remplacement aléatoire et, A^b, le cas de remplacement prioritaire de conduites installées après 1960

Les pourcentages de linéaires devant être remplacés pour les différentes municipalités se situent entre 1.0 et 2.0 % (cf Tableau 6.6). Un pourcentage de remplacement élevé est un indice d'un réseau en phase de détérioration plus avancée ou rapide et un pourcentage plus faible indique une détérioration moins avancée ou moins rapide. On constate que la municipalité C possède un réseau

qui, malgré son relatif jeune âge, se détériore rapidement et qu'un effort important de remplacement devra être entrepris si les gestionnaires de ce réseau veulent maintenir le nombre de bris à son taux actuel. À terme, dans le pire scénario, *i.e* pour lequel aucun remplacement n'est effectué, le nombre de bris sur 20 ans risque de s'accroître de l'ordre de 72 %.

Pour les réseaux à mettre dans la classe "état de détérioration moins avancé", on retrouve les municipalités D et E. On peut être surpris de voir cette dernière dans cette classe, compte tenu de la croissance accélérée du nombre de bris observé lorsqu'aucun remplacement n'est effectué. Cette forte croissance est attribuable à deux facteurs, d'abord (1) les périodes de fortes urbanisations de la municipalité, et (2) la probabilité de deuxième bris plus élevée pour cette municipalité (cf. Tableau 6.1). Le premier facteur a pour conséquence que de plus en plus de tronçons subiront au cours des 20 prochaines années un premier bris. Or la probabilité de deuxième bris étant relativement élevée (deuxième facteur), cet ensemble de tronçons subira année après année de nombreux bris. Par ailleurs, on peut se demander pourquoi, dans le cas de la municipalité D, l'"efficacité" du remplacement semble plus grand que pour les autres municipalités, considérant que le modèle prédit un accroissement sans remplacement de près de 136 % du nombre de bris sur 20 ans, alors qu'un taux de remplacement de 0.9 % suffit pour ramener cette croissance à zéro. En fait, ceci s'explique par le fait que la majorité des bris répertoriés dans la municipalité D sont des bris subséquents et qu'il suffit de remplacer ces tronçons pour considérablement diminuer le nombre de bris.

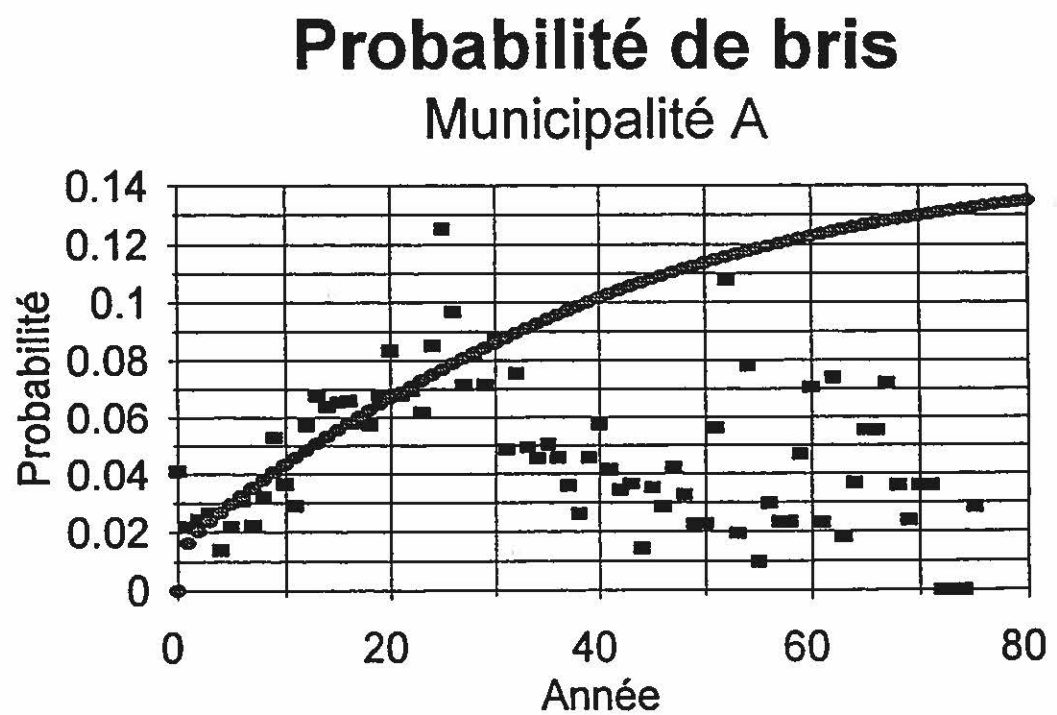


Figure 6.1 Probabilité de bris par tronçon en fonction du temps pour la municipalité A

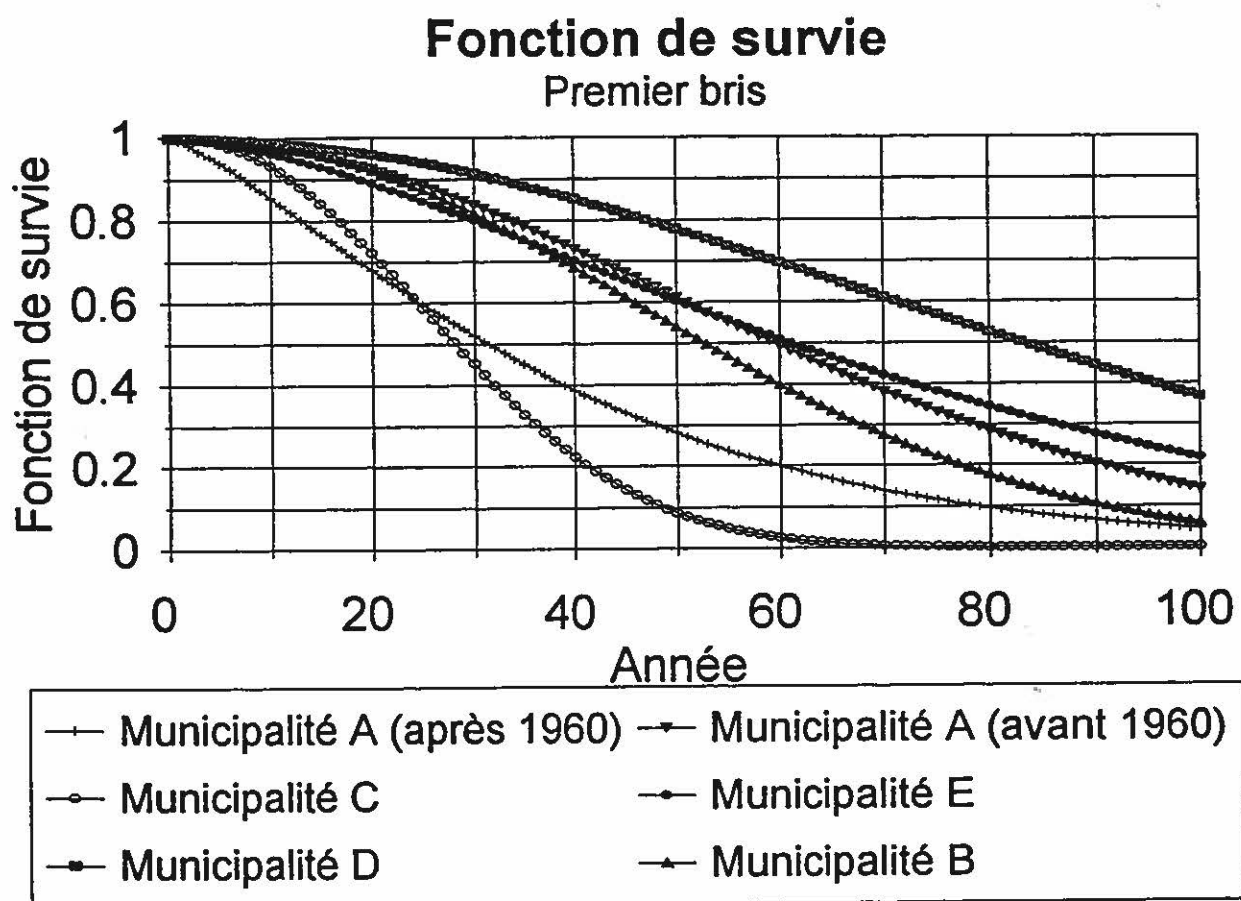


Figure 6.2 Fonction de survie associée au premier bris pour les municipalités-témoins

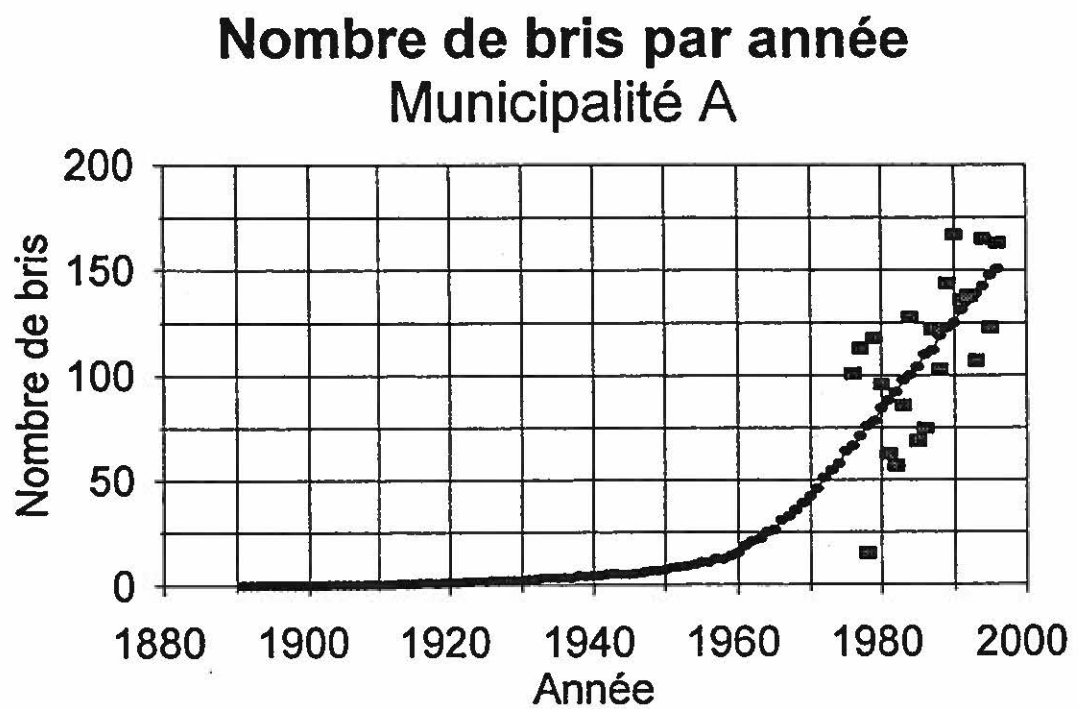


Figure 6.3 Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité A

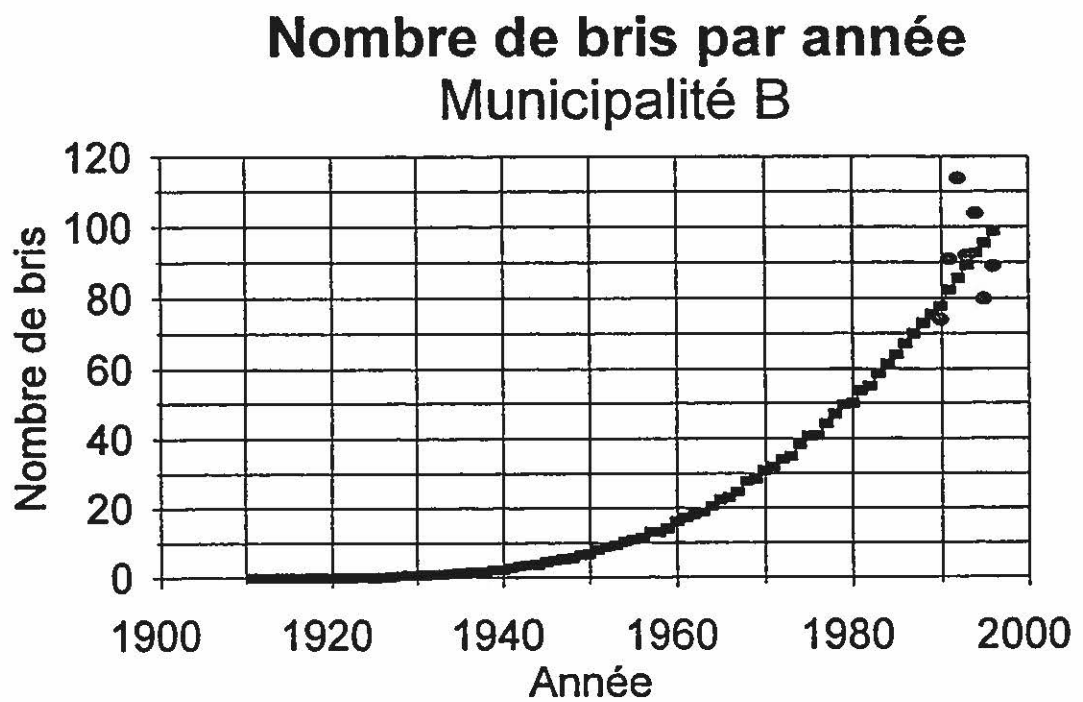


Figure 6.4 Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité B

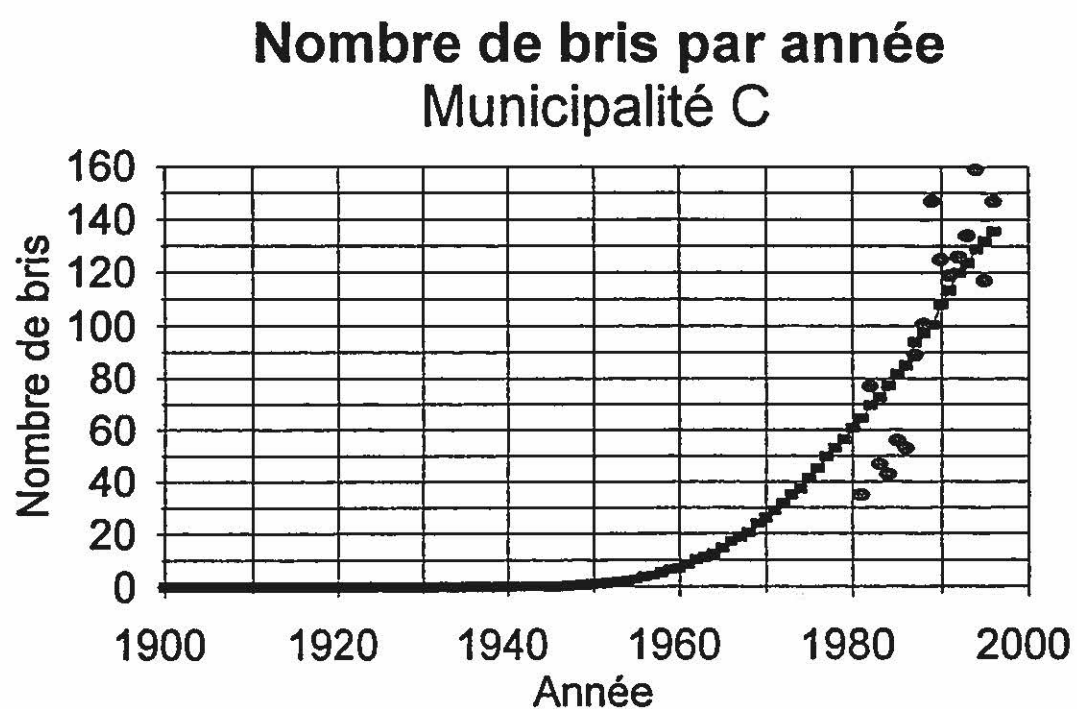


Figure 6.5 Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité C

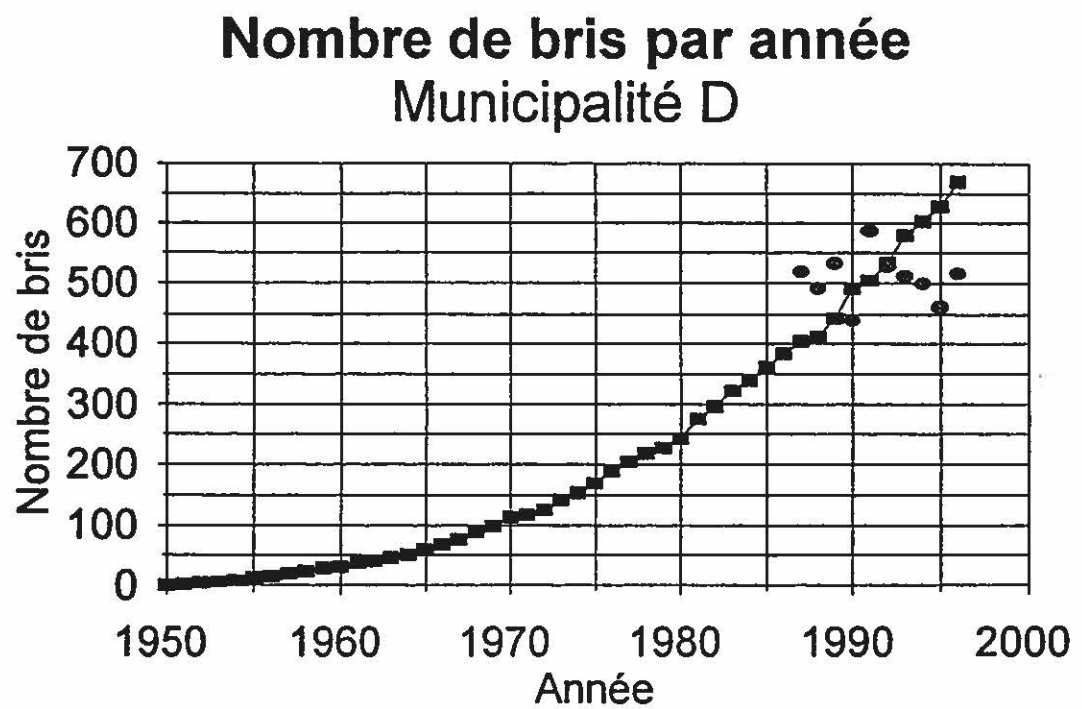


Figure 6.6 Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité D

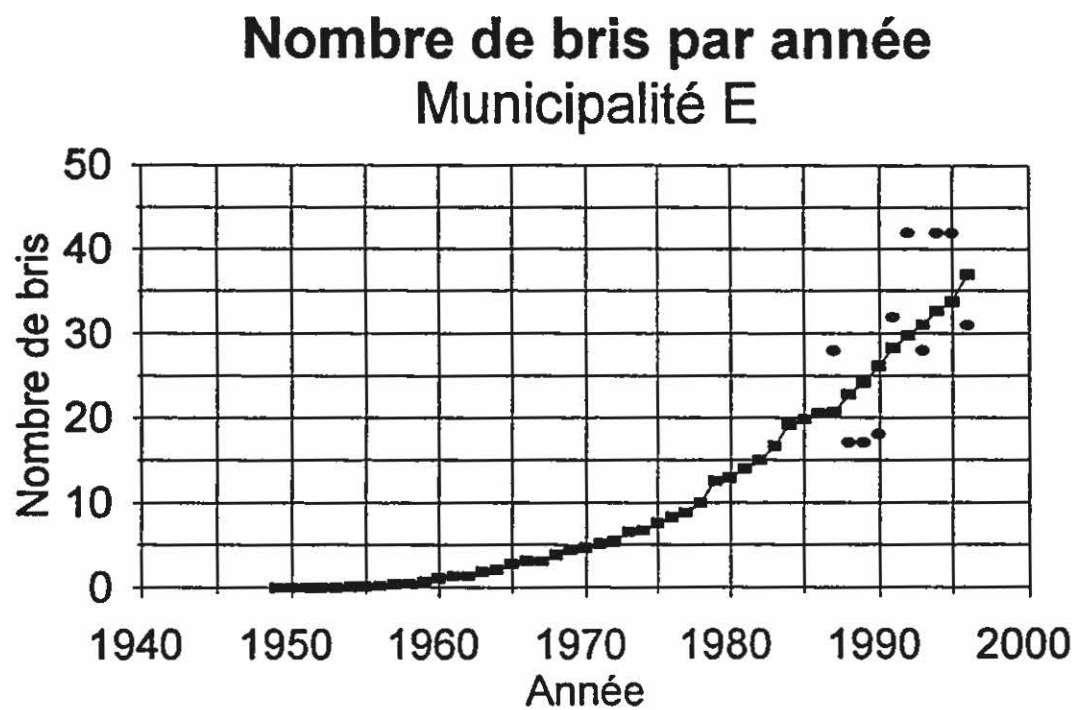


Figure 6.7 Nombre de bris annuel moyen pour la municipalité E

7 TRANSPOSITION DU MODÈLE

Nous avons estimé au chapitre précédent l'évolution du nombre de bris des municipalités-témoins selon les différents scénarios de remplacement envisagés. L'étape suivante consiste à transposer ce modèle aux municipalités ayant convenablement répondu aux questionnaires de l'INRS-Urbanisation. Par convenablement répondu, nous entendons les municipalités (1) qui ont répondu aux questions 12, 13 et 14 (ces questions sont nécessaires pour appliquer le modèle) et (2) pour lesquels nous n'avons pas noté d'incohérence majeure entre les réponses. Par exemple, plusieurs municipalités ont distribué les longueurs de réseau en fonction des diamètres (question 12) et en fonction de différentes caractéristiques (question 13). Or, lorsque nous sommes le linéaire total pour chacune de ces questions, nous constatons parfois des incohérences majeures. Nous avons préféré ne pas considérer ces municipalités. Des quelque 220 municipalités ayant retourné le questionnaire, nous n'avons gardé que 110 municipalités. La liste de ces municipalités est présentée au Tableau 7.1.

7.1 Méthodologie proposée

Les données dont nous disposons pour les 110 municipalités ayant convenablement répondu aux questionnaires et que nous utiliserons dans le contexte de modélisation défini plus haut sont : (1) le linéaire de réseau installé selon les époques identifiées dans le questionnaire (avant 1945, entre 1945 et 1960, entre 1961 et 1975 et, entre 1976 et 1996), (2) le nombre de bris observé en 1996. Ces informations sont insuffisantes en soit pour permettre de caler le modèle pour chacune des municipalités sondées. L'hypothèse que nous formulons est la suivante : le comportement de chaque municipalité du Québec en terme d'évolution du nombre de bris annuel se rapproche du comportement observé pour l'une ou l'autre des municipalités-témoins. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les municipalités-témoins définissent une gamme de comportements relativement variés. Afin de vérifier cette assertion, nous avons appliqué le modèle à chacune des municipalités identifiées à la section précédente en utilisant successivement chacun des jeux de paramètres des municipalités-témoins. Six jeux de paramètres ont donc été considérés à savoir :

(1) Municipalité A avant 1960 (appelé dans ce qui suit le jeu de paramètre Municipalité A1), (2) Municipalité A après 1960 (Municipalité A2), (3) Municipalité C, (4) Municipalité B, (5) Municipalité D et (6) Municipalité E.

Après avoir appliqué le modèle avec ces différents jeux de paramètres, les municipalités ont été regroupées selon le jeu de paramètres nous permettant d'obtenir l'estimé le plus juste du nombre de bris en 1996. Ainsi, pour la ville x, si, après simulation avec les six jeux de paramètres, celui associé à la municipalité E nous permet d'obtenir le nombre de bris simulé le plus près du nombre de bris observé dans cette ville, alors nous classons la ville dans le groupe Municipalité E. L'ensemble des municipalités a pu ainsi être regroupé selon l'une ou l'autre des six classes. Le Tableau 7.1 montre les résultats de ces simulations. Les nombres ombragés identifient le nombre de bris simulé qui approxime le mieux le nombre de bris observé et donc la classe de jeux de paramètres à laquelle appartient cette municipalité. En général, les nombres de bris simulés sont à plus ou moins 25 % des valeurs observées. Il est important de noter finalement que, puisque nous ne disposons que des valeurs de linéaire installé, nous avons dû convertir cette donnée pour l'exprimer en nombre de tronçons. Le nombre de tronçons pour chaque municipalité a été estimé en tenant compte de la longueur moyenne des tronçons associée à chaque municipalité-témoin.

Enfin, l'information colligée à partir des réponses aux questionnaires nous indique le linéaire total installé pour différentes périodes. Ces périodes sont : (1) avant 1945, (2) entre 1945 et 1960, (3) entre 1961 et 1975 et (4) entre 1976 et 1996. Une fois les linéaires convertis en nombre de tronçons et puisque le modèle utilise des données annuelles, il nous fallait décider comment répartir ces tronçons sur la période correspondante. Par exemple, si 34 tronçons sont installés entre les années 1960 et 1975, doit-on considérer qu'ils ont été installés uniformément pendant toute cette période, ou au début, ou à la fin, etc. Nous considérons pour fin de simulation que ces tronçons ont été installés à l'année médiane de chaque période sauf pour la période avant 1945. Pour cette période, nous avons considéré que les tronçons avaient tous été installés en 1944. Certes cette assertion est très approximative mais compte tenu du faible nombre de tronçons

installés durant cette période, l'erreur commise est très certainement négligeable. Ainsi les années d'installation sont 1944, 1953, 1968 et 1986. Un simple test nous a permis de constater que ce type de répartition des tronçons donnait des résultats semblables à une répartition uniforme des tronçons pendant la période.

Tableau 7.1 Échantillon de municipalités retenues pour la transposition

Municipalité	Population	Linéaire de réseau (km)	Taux de bris aux 100 km	Nombre de bris en 1996	Nombre de bris en 1996 avec différents jeux de paramètres de calage					
					A1	A2	B	C	D	E
Amos	13783	90	11.1	10	26	63	25	38	60	32
Amqui	6518	33	12.1	4	11	25	11	15	27	11
Asbestos	6487	63	15.9	10	14	37	12	21	30	17
Ascot	9085	25	24.0	6	5	11	3	6	7	5
Aylmer	32244	171	9.9	17	42	104	39	59	100	50
Baie-d Urfé	3849	44	6.8	3	12	30	10	18	24	16
Batiscan	869	16	103.2	16	5	11	4	6	9	5
Beauport	69158	370	22.4	83	72	188	61	99	156	86
Blainville	22679	150	7.3	11	26	70	18	36	46	30
Boucherville	33796	195	28.7	56	40	105	31	57	76	43
Bromptonville	3190	40	5.0	2	11	26	10	15	24	11
Brossard	64793	262	31.7	83	56	143	44	78	110	64
Chambly	15893	128	22.7	29	37	88	35	52	86	43
Charlesbourg	70788	320	39.4	126	106	247	105	152	256	127
Charny	10239	50	24.1	12	11	27	8	15	21	12
Coaticook	6637	45	8.9	4	13	30	12	18	29	16
Cowansville	11982	90	16.7	15	26	63	25	38	58	31
Delson	6063	40	25.2	10	7	20	6	10	15	9
Dolbeau	8181	60	8.3	5	20	46	20	28	50	27
Dollard-des-Ormeaux	46922	140	47.1	66	27	71	20	38	50	31
Dorval	17249	112	53.5	60	36	82	34	50	82	43
Fleurimont	14727	75	21.3	16	13	36	9	18	24	15
Granby	42804	192	39.1	75	56	133	53	79	128	65
Greenfield Park	17652	63	52.1	33	19	44	18	26	41	22
Hampstead	7219	26	69.2	18	8	18	7	11	18	9
Henryville	677	14	7.1	1	4	10	3	6	8	5
Hudson	4829	60	5.0	3	13	33	10	18	25	16
Hull	60707	255	23.9	61	58	148	50	82	122	68
L Assomption	10830	68	26.5	18	12	34	9	17	23	14
La Tuque	12577	75	16.0	12	25	57	25	35	62	30
Lac-Brome	4824	33	9.1	3	10	23	6	13	18	11
Lachute	11730	75	10.7	8	29	65	32	40	78	38
LaSalle	73804	180	16.7	30	61	140	60	86	147	73
Les Cèdres	3836	60	5.0	3	17	40	14	24	33	16
Les Méchins	1339	8	12.5	1	1	5	2	2	4	2
Lévis	39417	211	28.4	60	65	152	65	92	157	78
Longueuil	129874	420	47.6	200	142	327	143	201	346	171
Maple Grove	2431	19	47.4	9	7	16	7	9	17	8
Maria	2491	20	10.0	2	3	7	2	3	4	3
Masson-Angers	5753	51	21.5	11	11	30	10	16	26	14
Mercier	8227	44	34.1	15	10	26	7	13	18	11
Métabetchouan	3379	21	19.0	4	7	15	7	10	17	8
Mistassini	6842	29	3.4	1	6	17	5	9	13	5

Tableau 7.1 (suite)

Municipalité	Population	Linéaire de réseau (km)	Taux de bris aux 100 km	Nombre de bris en 1996	Nombre de bris en 1996 avec différents jeux de paramètres de calage					
					A1	A2	B	C	D	E
Sainte-Foy	71133	390	27.2	106	86	223	70	124	173	100
Sainte-Geneviève	3197	9	33.0	3	4	8	4	5	9	4
Sainte-Julie	20632	134	18.7	25	18	52	12	24	30	21
Sainte-Madeleine	1847	16	12.9	2	5	11	4	6	11	5
Sainte-Marthe-du-Cap	5798	40	10.0	4	7	19	5	10	13	8
Sainte-Thècle	2766	16	6.5	1	2	7	2	3	5	5
Sainte-Victoire-de-Sorel	2146	44	2.3	1	12	30	10	18	22	14
Senneville	961	7	14.7	1	2	6	3	4	7	5
Sept-Îles	24848	155	9.7	15	26	73	20	37	50	30
Shawinigan-Sud	199931	91	8.8	8	29	65	29	39	70	32
Sherbrooke	76429	372	22.3	83	115	273	115	164	277	140
Sillery	12519	72	13.9	10	25	58	27	36	63	32
Sorel	24253	129	7.8	10	37	89	36	53	87	43
Sullivan	3045	20	5	1	2	7	2	3	3	2
Terrebonne	39678	152	13.2	20	28	76	23	40	57	33
Thetford-Mines		64	12.5	8	17	40	14	24	37	19
Tracy	13181	75	33.3	25	24	55	23	33	57	28
Val-Bélair	17181	99	15.2	15	14	40	9	19	23	16
Vaudreuil-Dorion	11187	91	33	30	18	48	15	25	37	21
Verchères		46	34.7	16	8	23	7	11	17	9

Tableau 7.1 (suite)

Municipalité	Population	Linéaire de réseau (km)	Taux de bris aux 100 km	Nombre de bris en 1996	Nombre de bris en 1996 avec différents jeux de paramètres de calage					
					A1	A2	B	C	D	E
Mont-Laurier	7862	60	89.1	53	18	43	17	26	41	21
Montmagny	11861	71	16.9	12	17	43	15	24	37	20
Nicolet	4845	28	57.8	16	8	18	7	11	17	9
Notre-Dame-de-l'Ile-Perrot	5372	67	3.0	2	7	24	4	10	12	11
Notre-Dame-des-Prairies	6465	36	11.1	4	7	19	5	10	13	8
Otterburn Park		42	40.2	17	10	24	8	13	20	11
Petit-Matane	1288	16	12.5	2	4	8	3	5	6	5
Pierrefonds	48735	200	50.0	100	51	126	42	73	103	58
Pointe-au-Père	4001	28	25.0	7	6	15	5	9	12	7
Pointe-aux-Trembles		12	101.7	12	4	10	4	6	10	5
Prévost	6024	13	179.0	24	4	8	3	5	7	4
Québec	167517	644	18.8	121	239	544	254	337	617	295
Régie Richelieu Centre		262	0.8	2	24	82	12	30	33	29
Repentigny	49630	231	34.6	80	39	106	29	53	72	45
Richelieu		12	41.7	5	6	12	7	8	16	7
Roberval	11628	72	26.5	19	17	40	13	23	33	19
Rock-Forest	14551	100	4.0	4	13	38	8	17	21	16
Rosemère	11198	78	76.9	60	17	43	13	23	31	19
Rouyn-Noranda	26412	131	29.8	39	31	78	29	43	70	37
Saint-Adelme	566	2	50.0	1	0	1	0	1	1	1
Saint-Amable	5804	68	4.4	3	6	21	4	8	9	7
Saint-Antoine-de-Lavatrie		17	5.9	1	1	5	1	2	2	2
Saint-Boniface-de-Shawinigan	3813	12	25.0	3	5	11	5	7	12	6
Saint-Charles-Borromée	1242	51	13.7	7	11	29	9	16	21	13
Saint-Damase	1089	55	1.8	1	8	24	6	11	11	10
Saint-Élie-d'Orford		27	18.5	5	4	13	3	7	9	5
Saint-Eustache	37278	198	16.2	32	48	119	41	68	100	56
Saint-Félicien	9340	102	14.7	15	21	55	18	30	45	25
Saint-Fulgence	2170	17	23.5	4	7	15	7	10	18	8
Saint-Gabriel-de-Brandon	2155	4	50.0	2	1	3	1	1	1	1
Saint-Honoré	750	2	50.0	1	1	2	1	1	2	1
Saint-Hyacinthe	39292	214	23.8	51	64	152	63	91	154	78
Saint-Isidore	2567	15	13.3	2	1	5	1	2	2	2
Saint-Isidore-d'Auckland	599	4	27.6	1	1	4	2	2	4	2
Saint-Jean-sur-Richelieu	37607	178	45.0	80	52	125	51	74	125	63
Saint-Lazare	1300	108	8.3	9	11	37	7	15	18	14
Saint-Léonard	1223	175	39.4	69	46	115	38	68	93	53
Saint-Mathias-sur-Richelieu	3553	23	17.4	4	4	11	3	6	8	5
Saint-Mathieu-de-Beloeil	1947	46	141.3	65	12	29	9	16	22	13
Saint-Robert		36	19.4	7	6	17	5	9	11	7
Saint-Sévère	367	22	9.1	2	5	12	4	7	9	5
Sainte-Agathe-des-Monts	5452	55	10.9	6	18	43	18	26	45	22
Sainte-Anne-des-Plaines	10787	51	23.5	12	8	23	5	11	14	9

7.2 Prédiction du nombre de bris pour des horizons de 5, 10 et 20 ans pour les différentes classes de municipalités identifiées

Nous avons regroupé, à la section précédente, les différentes municipalités selon les jeux de paramètres les plus susceptibles de reproduire le nombre de bris observé en 1996. Ce faisant nous assumons que le comportement des réseaux ainsi regroupés est correctement décrit par le jeu de paramètres correspondant à cette classe. Les linéaires de réseau des municipalités ainsi regroupées ont ensuite été sommés pour chacune des périodes d'installation considérées. Le Tableau 7.2 présente les résultats de ce regroupement pour les six classes considérées.

Nous sommes maintenant en présence de six grandes classes de municipalités avec, pour chacune, une description du linéaire total installé par période. Chacune de ces classes possède un jeu de paramètres propre qui nous permet, sur la base de l'historique d'installation en notre possession, d'estimer le nombre de bris total observé en 1996. L'estimation de l'évolution du nombre de bris annuel pour des horizons de 5, 10 et 20 ans a donc été réalisée sur la base de ces six classes en utilisant le modèle et le jeu de paramètres de chaque classe. Les scénarios de remplacement considérés sont les mêmes que ceux décrits à la section 6.3.1. Les Tableaux 7.3, 7.4 et 7.5 présentent pour chacune de ces classes de municipalités le pourcentage d'augmentation du nombre de bris estimé pour des horizons de 5 ans, 10 ans et 20 ans selon les différents scénarios de remplacement considérés. Le Tableau 7.6 présente pour sa part, le pourcentage de linéaire à remplacer sur une base annuelle par classe de municipalités afin que le nombre de bris dans 20 ans soit le même qu'actuellement. On voit donc que ce pourcentage pour l'ensemble des classes se situe entre 1 et 2 %.

Tableau 7.2 Caractéristiques des différentes classes de municipalités

Classe de municipalités	Nombre de municipalités	Population	Nombre de km avant 1945	Nombre de km 1945 à 1960	Nombre de km 1961 à 1975	Nombre de km 1976 à 1996	Nombre de km total en 1996	Nombre de bris en 1996	Taux de bris par 100 km
A1	19	611335*	483	620	468	584	2155	421	19.5
A2	8	82041*	11	33	224	122	390	314	80.5
B	42	467613*	229	417	1156	1398	3200	367	11.5
C	16	424240	119	432	842	676	2069	781	37.7
D	5	103210*	0	62	242	243	547	229	41.9
E	16	314957*	57	337	565	727	1686	446	26.5

*Note : Cette valeur est incomplète puisque quelques municipalités n'ont pas indiqué le nombre d'habitants dans le questionnaire INRS-Urbanisation

Tableau 7.3 Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 5 ans

Classe de municipalités	Pourcentage de linéaire remplacé		
	0.0 %	0.5 %	1.0 %
	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996
A1	13	10	3
A2	13	12	3
B	32	14	-7
C	17	12	6
D	32	7	-13
E	20	7	-5

Tableau 7.4 Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 10 ans

Classe de municipalités	Pourcentage de linéaire remplacé		
	0.0 %	0.5 %	1.0 %
	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996
A1	23	17	6
A2	26	18	2
B	64	25	-7
C	33	23	14
D	64	21	-13
E	39	20	-5

Tableau 7.5 Pourcentage d'augmentation du nombre de bris pour les différentes classes de jeux de paramètres en fonction du taux de remplacement pour un horizon de 20 ans

Classe de municipalités	Pourcentage de linéaire remplacé		
	0.0 %	0.5 %	1.0 %
	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996
A1	43	30	12
A2	50	32	8
B	76	68	5
C	59	42	26
D	136	57	-7
E	80	41	-3

Tableau 7.6 Pourcentage de linéaire à remplacer annuellement afin que le nombre de bris sur un horizon de 20 ans se maintienne au niveau actuel

Classe de municipalités	Pourcentage de linéaire à remplacer annuellement
A1	1.3
A2	1.2
B	1.0
C	1.8
D	0.9
E	1.0

Afin maintenant d'obtenir un estimé moyen pour l'ensemble de ces classes de municipalités en fonction des scénarios de remplacement considérés, nous avons sommé les pourcentages de remplacement des différentes classes selon le poids respectif des linéaires de chacune de ces classes. Les pourcentages d'augmentation des nombres de bris annuels sur des horizons de 5, 10 et 20 ans pour les municipalités regroupées dans les six classes ci-haut mentionnées sont présentés au Tableau 7.7.

Tableau 7.7 Pourcentage d'augmentation moyen du nombre de bris pour l'ensemble des municipalités à l'étude en fonction des scénarios de remplacement

Horizon de prédiction	Pourcentage de linéaire remplacé annuellement		
	0.0 %	0.5 %	1.0 %
	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996	% augmentation p/r à 1996
5 ans	22	11	-2
10 ans	43	22	0
20 ans	68	48	9

Le taux de remplacement devant conduire au maintien du nombre de bris annuel moyen à son taux actuel a été estimé à 1.1 %.

8 ESTIMATION DES COÛTS

L'estimation des coûts dépend de la valeur du coût unitaire moyen de remplacement (\$ par mètre linéaire) utilisée qui doit être le plus réaliste possible à l'échelle du Québec. Ce coût unitaire moyen de remplacement varie énormément dépendant du contracteur, du type de matériau utilisé, du genre d'équipement nécessaire, du coût de la main-d'oeuvre, etc. C'est pourquoi une hypothèse sur la valeur de ce coût, bien que basée sur des études solides, restera toujours une hypothèse.

Le coût unitaire de remplacement est souvent présenté en fonction du diamètre des conduites à remplacer. Les diamètres les plus communs sont les 150, 200, 250 et 300 mm. Le Tableau 8.1 présente le pourcentage de réseau pour chacun de ces diamètres dans nos cinq municipalités-témoins. Ces quatre diamètres couvrent en moyenne 90.8% des réseaux à l'étude, c'est pourquoi la dernière colonne du tableau normalise les pourcentages afin que le total soit égal à 100%. Ces pourcentages seront utilisés pour pondérer l'importance de chacun de ces diamètres dans les réseaux.

Tableau 8.1 Pourcentage des réseaux dans quatre catégories de diamètres pour les cinq municipalités-témoins

Diamètre	Municipalités					Moyenne	Moyenne à 100%
	A	B	C	D	E		
150 mm	72.4%	53.1%	33.1%	47.5%	62.7%	50.1%	55.2%
200 mm	12.7%	16.1%	38.7%	24.3%	12.9%	23.4%	25.8%
250 mm	4.0%	13.4%	12.4%	9.2%	9.2%	9.5%	10.5%
300 mm	5.3%	9.9%	8.4%	7.8%	7.4%	7.8%	8.6%
Total	94.4%	92.5%	92.6%	88.8%	92.2%	90.8%	100%

Le Tableau 8.2 présente le coût unitaire de remplacement, tel qu'estimé pour la ville de Montréal, pour quatre diamètres selon deux scénarios. Le premier scénario est celui où l'aqueduc est

remplacé en même temps que l'égout (économie sur les travaux d'excavation et de réfection de la chaussée) et le second est le remplacement de l'aqueduc seulement. La quatrième colonne du Tableau (coût unitaire normalisé) est obtenue en multipliant le pourcentage de réseau pour ce diamètre par le coût unitaire de remplacement pour ce même diamètre. Ceci permet de pondérer le coût unitaire selon l'importance et le coût associés à ce diamètre. Les rangs ombragés présentent le coût unitaire global pour chacun des scénarios. Il n'est pas clair si les coûts unitaires de remplacement mentionnés dans ce Tableau comprennent tous les coûts imputables à ce genre de travaux (main d'oeuvre, équipement, matériau, réfection de la chaussée, etc.).

Tableau 8.2 Coût unitaire de remplacement pour les diamètres 150, 200, 250 et 300 mm (estimé pour la ville de Montréal)

Diamètre	Pourcentage moyen des réseaux	Coût unitaire de remplacement	Coût unitaire normalisé	Commentaires
150 mm	55.2%	500	276	Remplacement des conduites d'aqueduc dans la tranchée de l'égout proposé
200 mm	25.8%	550	142	
250 mm	10.5%	580	61	
300 mm	8.6%	620	53	
Global	100%		532	
150 mm	55.2%	660	364	Remplacement des conduites d'aqueduc à l'extérieur de la tranchée de l'égout
200 mm	25.8%	740	191	
250 mm	10.5%	780	82	
300 mm	8.6%	820	71	
Global	100%		708	

Le Tableau 8.3 présente certains coûts unitaires tels que relevés dans différentes études. Le coût unitaire moyen choisi pour cette étude pour le remplacement de l'aqueduc seulement est de \$ 645

par mètre linéaire et le coût pour le remplacement simultané des réseaux d'aqueduc et d'égout est de \$ 1065 par mètre linéaire. Ces coûts comprennent la reconstruction de la chaussée (fondation et pavage) ainsi que les bordures mais excluent l'ajout d'un réseau pluvial. Ces valeurs sont celles utilisées par l'INRS-Urbanisation dans son étude.

Tableau 8.3 Coûts unitaires de remplacement relevés dans différentes études

Source	Coût unitaire \$/m	Commentaires
INRS-Urbanisation	1065	Coût de remplacement d'un mètre linéaire de conduite comprenant la conduite d'eau potable, la conduite d'eaux usées, la conduite d'eau pluviale et les ouvrages extérieurs (pavage, bordures, etc.)
	645	Coût de remplacement d'un mètre linéaire de conduite d'eau potable et les ouvrages extérieurs (pavage, bordures, etc.)
Municipalité C	315 (249-472)	Coût de remplacement de la conduite d'aqueduc (ne savons pas si ce coût comprend les ouvrages extérieurs)
Montréal	532	Coût de remplacement des conduites d'aqueduc dans la tranchée de l'égout proposé
	708	Coût de remplacement des conduites d'aqueduc à l'extérieur de la tranchée de l'égout

Afin d'extrapoler les résultats présentés précédemment à l'ensemble de la province de Québec, il a fallu faire l'hypothèse qu'une population de 5 954 896 habitants (incluant la ville de Montréal) était desservie par des réseaux d'aqueduc à l'échelle de la province et que le linéaire de réseau était proportionnel au nombre d'habitants desservis. Pour connaître le ratio entre le linéaire de réseau et la population desservie, une régression linéaire a été faite avec les données des 106 municipalités ayant servi à la transposition (voir Figure 8.1). Puisque la population totale connue dans ces municipalités comprend les habitants desservis et ceux non desservis, nous avons fait l'hypothèse,

qu'en moyenne, 85 % de la population totale de ces municipalités est desservie par un réseau d'aqueduc (la ville de Montréal est exclue de cette hypothèse). Une valeur de 4.9 m par habitant desservi est obtenue par la régression. Sur la population totale du Québec de 5 954 896 habitants desservis par un réseau d'aqueduc, il faut soustraire la population totale de la ville de Montréal (100 % des habitants sont desservis : 1 017 837 habitants), ce qui se traduit par une longueur totale de réseau excluant Montréal de 24 192 km à l'échelle de la province. À titre de comparaison, l'échantillon des 106 municipalités représente une longueur totale de 10 074 km, soit 42 % du linéaire total à l'échelle de la province (excluant Montréal).

En faisant une hypothèse sur le coût de remplacement de conduites d'aqueduc basée sur des estimations faites par INRS-Urbanisation, une valeur de \$ 645 par mètre linéaire a été choisie. Bien sûr, le coût de remplacement des conduites d'aqueduc varie énormément à l'échelle de la province, mais puisque le mandat est d'estimer un coût moyen et que cette valeur est solidement documentée, c'est elle qui servira à estimer les coûts globaux. Le Tableau 8.4 présente les **coûts annuels** de remplacement à l'échelle du Québec (excluant Montréal) pour les quatre scénarios considérés sur un horizon de 20 ans.

Tableau 8.4 Estimation des coûts annuels de remplacement à l'échelle du Québec pour les différents scénarios de remplacement considérés

Scénario	% moyen augmentation du nombre de bris au bout de 20 ans	Coût annuel de remplacement (en millions)
Aucun remplacement	68	0
0.5 % du linéaire /an	48	78
1.0 % du linéaire /an	9	156
Maintien du nombre de bris moyen annuel sur 20 ans	0	172

Le calcul des coûts totaux (aqueduc et égout) est présenté à la conclusion générale du rapport.

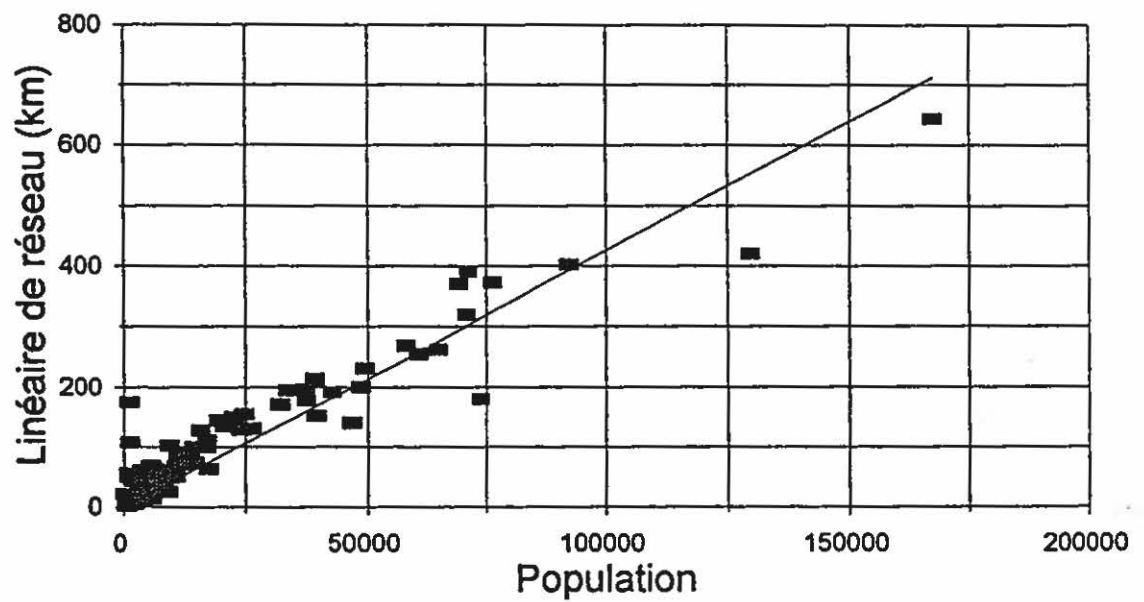


Figure 8.1 Linéaire de réseau d'aqueduc en fonction de la population pour les municipalités de l'étude

9 CONCLUSION

La partie AQUEDUC du présent rapport avait pour objectif de déterminer l'évolution de l'état des conduites d'aqueduc pour des horizons de 5, 10 et 20 ans et de déterminer l'impact de différents scénarios de remplacement sur l'évolution de cet état structural. L'indicateur utilisé pour décrire cet état est le nombre de bris annuel. Les coûts de ces scénarios de remplacement ont aussi été estimés.

Ce travail s'est effectué en plusieurs étapes. D'abord cinq municipalités-témoins ont été considérées. Elles ont été sélectionnées compte tenu de la quantité et de la qualité des informations disponibles sur les caractéristiques de leur réseau et l'historique des bris. De plus, elles devaient avoir déjà stockées, en tout ou en partie, ces données sur support informatique. Toutes les informations pertinentes ont été colligées et structurées dans une base de données.

La revue de littérature et la nature du problème qui nous intéresse nous a rapidement fait prendre conscience de la nécessité de développer une approche de modélisation originale mieux adaptée au présent contexte, caractérisé par des historiques de bris très courts. Un modèle simple a donc été développé, s'inspirant des modèles agrégés. Le calage du modèle a été réalisé en utilisant, entre autres, la technique d'analyse de survie. Le modèle a été calé pour les cinq municipalités-témoins. Les jeux de paramètres obtenus démontrent que nous avons un ensemble de comportements relativement variés.

Quatre scénarios de remplacement de tronçons ont été définis sur un horizon total de 20 ans. Le premier de ces scénarios considère qu'aucun remplacement n'est effectué. Les deux scénarios suivants considèrent des taux de remplacement de 0.5 % et 1.0 % du linéaire total du réseau par année sur 5, 10 et 20 ans. Enfin le quatrième scénario estime le taux de remplacement à maintenir pour la période de 20 ans, afin que le nombre de bris moyen annuel à la fin de cette période soit comparable au nombre de bris moyen annuel actuel. Ces scénarios ont été appliqués aux cinq municipalités-témoins. On montre, entre autres, que les taux de remplacement correspondant au

quatrième scénario se situent entre 1.0 et 2.0 % pour les cinq municipalités-témoins. De plus, les augmentations moyennes estimées du nombre de bris sur 20 ans vont de 51 % à 136 %, si aucun remplacement n'est effectué.

La transposition à un plus grand échantillon de municipalités a ensuite été effectuée. Cet échantillon a été défini en fonction des municipalités ayant adéquatement répondu au questionnaire d'INRS-Urbanisation. Les données que nous avons utilisées sont les linéaires de réseau installés par période d'urbanisation et le nombre de bris observé en 1996. Le modèle a été appliqué à chacune de ces municipalités en utilisant successivement les différents jeux de paramètres des cinq municipalités-témoins. Ensuite, elles ont été regroupées en fonction du jeu de paramètres qui nous a permis de mieux reproduire le nombre de bris observé en 1996. Nous avons ainsi six classes de municipalités dont l'évolution du réseau est décrit par un jeu de paramètres unique. Les linéaires installés selon les différentes époques ont été sommés et le modèle a été appliqué à ces regroupements de linéaires.

Les quatre scénarios de remplacement ont été appliqués à ces six classes de municipalités. Les résultats montrent que, globalement, le nombre de bris dans 20 ans augmentera de l'ordre de 43 à 136 % en moyenne, si aucun remplacement n'est effectué durant cette période. Par ailleurs, les taux de remplacement définis par le quatrième scénario se situent, tout comme pour les municipalités-témoins, entre 1.0 % et 2.0%.

Une fois en possession de ces informations, nous avons été en mesure d'estimer les coûts des scénarios de remplacement, leurs impacts sur l'augmentation du nombre de bris annuel moyen pour l'ensemble du Québec. La transposition depuis les municipalités du questionnaire de l'INRS-Urbanisation à l'ensemble du Québec s'est fait en supposant que l'échantillon de municipalités ayant servi à la présente étude est représentatif de l'ensemble du Québec. Ce faisant un linéaire de réseau par habitant desservi a été estimé et le linéaire total du Québec calculé. Nous avons repris le coût unitaire estimé par l'INRS-Urbanisation, à savoir \$ 645 par mètre linéaire pour le

remplacement de l'aqueduc seul. Connaissant le linéaire total du Québec et le coût par mètre nous sommes en mesure d'estimer les coûts associés à chacun des scénarios de remplacement considérés. Nous reprenons ici le Tableau 8.4 du Chapitre 8 qui résume les coûts et les impacts en terme d'augmentation du nombre de bris des différents scénarios de remplacement envisagés à l'échelle du Québec. On voit, à la lumière de ce tableau, qu'une somme de l'ordre de 3.4 milliards de dollars devra être investie sur une période de 20 ans pour maintenir l'ensemble du réseau dans son état structural actuel. Cette somme constitue en quelque sorte une valeur seuil en deçà de laquelle le nombre de bris augmentera et au delà de laquelle on peut espérer une amélioration de la condition structurale du réseau. Nous pensons toutefois qu'il est de la responsabilité du gestionnaire de réseau d'estimer si son réseau se trouve actuellement dans un état acceptable ou inacceptable. Il est important de se souvenir, enfin, que ces estimés ne concernent que le remplacement des conduites d'aqueduc sans intervention au niveau des égouts.

Tableau 9.1 Estimation des coûts annuels de remplacement à l'échelle du Québec pour les différents scénarios de remplacement considérés

Scénario	% moyen augmentation du nombre de bris au bout de 20 ans	Coût annuel de remplacement (en millions)
Aucun remplacement	68	0
0.5 % du linéaire /an	48	78
1.0 % du linéaire /an	9	156
Maintien du nombre de bris moyen annuel sur 20 ans	0	172

Le calcul des coûts totaux incluant l'aqueduc et l'égout est présenté à la conclusion générale du rapport.

10 BIBLIOGRAPHIE

- Andreou, S.A. (1985). *Predictive Models for Pipe Failures and Their Implications on Maintenance Planning Strategies for Deteriorating Water Distribution Systems*. Ph.D. Thesis, Cambridge, MA, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 291 p.
- Andreou, S.A., D.H. Marks et R.M. Clark. (1987a). A New Methodology for Modelling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Theory. *Adv Water Resour*, 10 (3): 2-10.
- Andreou, S.A., D.H. Marks et R.M. Clark. (1987b). A New Methodology for Modelling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Applications. *Adv Water Resour*, 10 (3): 11-20.
- Brémond, B. (1996). Programmation du renouvellement des conduites d'eau potable et d'assainissement - Apport des modèles statistiques. Dans: *Neuvièmes entretiens du Centre Jacques Cartier - Colloque "Les nouvelles infrastructures urbaines à l'heure du développement durable"*. Montréal, 1-4 octobre.
- Clark, R.M., C.L. Stafford et J.A. Goodrich. (1982). Water Distribution Systems: A Spatial and Cost Evaluation. *J Water Resour Plan Man*, 108 (3): 243-256.
- Clark, R.M., R.G. Eilers et J.A. Goodrich. (1988). Distribution System: Cost of Repair and Replacement. Dans: *Proceedings of the Conference on Pipeline Infrastructure*, B.A. Bennett (éd.), 428-440. Boston, 6-7 juin. New York: American Society of Civil Engineers.

- Desbiens, M.-E. (1997). La problématique des infrastructures urbaines: sa résolution par les voies de la méthodologie et de la technologie. Dans: *Congrès annuel de la Société Canadienne de Génie Civil (SCGC)*, P. Labossière, R. Crysler et D. T. Lau, 37-43. Montréal: Société Canadienne de Génie Civil.
- Eisenbeis, P. (1994). *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*. Études du Cemagref, 248 p. (Série Équipements pour l'eau et, l'environnement 17)
- Elnaboulsi, J. et O. Alexandre. (1996). Le renouvellement des réseaux d'eau potable: une revue critique. *Can Water Resour. J*, 21 (4): 341-354.
- Goodrich, J.A. (1986). Drinking Water Distribution System Reliability: A Case Study. Dans: *Proceedings of Water Forum '86: World Water Issues in Evolution*, M. Karamouz, G.R. Baumli et W.J. Brick, 1256-1263. New York, N.Y.: American Society of Civil Engineers.
- Goulter, I.C., J. Davidson et P. Jacobs. (1993). Predicting Water-Main Breakage Rates. *Journal of Water Resources planning and Management*, 119 (4): 419-436.
- Goulter, I.C. et A. Kazemi. (1988). Spatial and Temporal Groupings of Water Main Pipe Breakage in Winnipeg. *Can J Civil Eng*, 15: 91-97.
- Jacobs, P. et B. Karney. (1994). GIS Development with Application to Cast Iron Water Main Breakage Rate. Dans: *Proceedings of the 2nd International Conference on Water Pipeline Systems*, 53-62. Edinburgh, Scotland. BHR Group Ltd.
- Karaa, F.A. et D.H. Marks. (1990). Performance of Water Distribution Networks: Integrated Approach. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 4 (1): 51-67.

- Kalbfleisch, J.D. et Prentice, R.L. (1980). *The Statistical Analysis of failure Time Data*. New-York, John Wiley & Sons, 321 p. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics)
- Kettler, A.J. et I.C. Goulter. (1985). An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution Networks. *Can J Civil Eng*, 12: 286-293.
- Male, J.W., T.M. Thomas et A.H. Slutsky. (1988). Analysis of New York City's Water Main Replacement Policy. Dans: *Proceedings of the Conference on Pipeline Infrastructure*, B.A. Bennett (éd.), 306-312. Boston, 6-7 juin. New York: American Society of Civil Engineers.
- Male, J.W., T.M. Walski et A.H. Slutsky. (1990). Analyzing Water Main Replacement Policies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (3): 362-374.
- Moruzzi, L. (1984). Reasons for Pipe Damage. *Water Supply*, No. 3/4, SS16-1 à SS16-5.
- O'Day, D.K., C.M. Fox et G.M. Huguet. (1980). Aging Urban Water Systems : A Computerized Case Study. *Public Works*, 111(8): 61-64.
- O'Day, D.K., R. Weiss, S. Chiavari et D. Blair. (1987). *Water Main Evaluation for Rehabilitation/Replacement*, American Water Works Association Research Foundation (Denver, Colorado) et U.S. Environmental Protection Agency (Cincinnati, Ohio), 182 p.
- Schock, M.R. (1990). Internal Corrosion and Deposition Control. Dans: *Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies - Fourth Edition*. Montreal, Frederick W. Pontius (Amer Water Works Assn), McGraw-Hill, Inc., Chap. 17, p. 997-1111.

- Shamir, U. et C. Howard. (1979). Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement. *J. Amer. Water Works Assn*, 71 (5): 248-258.
- Siddiqui, S. et S. Mirza. (1996). Canadian Municipal Infrastructure - The Present State. Dans: *Congrès annuel de la Société Canadienne de Génie Civil (SCGC)*, 1^{ère} conférence spécialisée sur le génie des transports, 519-530. Edmonton, 29 mai au 1^{er} juin. Montréal: Société Canadienne de Génie Civil.
- Sullivan, J.P. Jr. (1982). Maintaining Aging Systems - Boston 's Approach. *J Amer Water Works Assn* , 74 (11): 555-59.
- Sullivan, J.P. Jr. (1986). Financing Water Supply Infrastructure - A Public Works Perspective. Dans: *Proceedings of Water Forum '86: World Water Issues in Evolution*, M. Karamouz, G.R. Baumli et W.J. Brick, 1218-1224. New York, N.Y.: American Society of Civil Engineers.
- Walski, T.M. et A Pelliccia. (1982). Economic Analysis of Water Main Breaks. *J Amer Water Works Assn*, 74 (3): 140-147.

ÉGOUT

1 INTRODUCTION

1.1 Le contexte

On constate aujourd'hui que certaines conduites des réseaux d'égout ne peuvent plus remplir de façon adéquate le rôle pour lequel elles ont été conçues, soit l'évacuation des eaux usées et pluviales vers l'exutoire du réseau de la municipalité. Des défaillances de natures structurale, hydraulique ou environnementale constituent les principaux désordres pouvant altérer la performance des réseaux.

L'apparition d'un défaut structural (fissure, trou, etc.) peut conduire, à plus ou moins long terme, à la rupture de la conduite. La rupture d'une conduite peut quelquefois avoir de sérieuses répercussions à la surface, tel l'effondrement de la chaussée. De plus, avant que ne se produise la rupture, certains défauts peuvent favoriser l'infiltration d'eau souterraine à l'intérieur de la canalisation et ainsi augmenter les risques de refoulement et de débordement de même que le volume d'eau à traiter à l'usine. Les défauts structuraux peuvent être corrigés par le remplacement de la conduite ou par la réparation du défaut, accompagnée ou non du renforcement de la conduite.

On parle de défaut hydraulique lorsque le réseau d'égout n'est plus en mesure de transporter les effluents collectés. Ce défaut peut être la conséquence d'une augmentation de la rugosité de la conduite ou d'une augmentation des débits collectés liée à un développement urbain supérieur aux prévisions des concepteurs. Les principales conséquences engendrées par un défaut hydraulique peuvent être la mise en charge des conduites, l'inondation des espaces urbains et les rejets intempestifs au milieu naturel. L'étude des défauts hydrauliques d'un réseau d'égout nécessite la réalisation d'une campagne de mesures de débits et la modélisation du fonctionnement hydraulique du réseau. Les résultats de la campagne de mesures sont généralement comparés à ceux du modèle de simulation calé et validé sur le réseau étudié. Ceci permet alors de localiser les dysfonctionnements. La réhabilitation de la performance hydraulique d'un réseau d'égout est

réalisée par l'accroissement de la capacité de la conduite ou par la réduction des apports au réseau en termes de débit de pointe et/ou de volume.

Le principal défaut environnemental des réseaux d'égout est associé aux débordements des réseaux pluviaux ou combinés, qui peuvent occasionner le dépassement des critères de qualité de l'eau dans le cours d'eau récepteur. Le diagnostic d'un rejet excessif de polluants se base principalement sur la mesure ou la simulation de la qualité de l'eau rejetée ainsi que sur l'étude de la sensibilité des cours d'eau récepteurs. Plusieurs méthodes de réhabilitation hydraulique, telle la réduction du débit de pointe, sont aussi applicables à la réhabilitation environnementale [Delleur 1994]. Il est également possible de diminuer les masses de polluants déversées en vérifiant le bon fonctionnement des ouvrages de déversement ou encore en éliminant les matières solides déposées au fond du réseau qui peuvent être remises en suspension par temps de pluie.

L'évaluation des besoins en réfection des conduites d'égout touche donc les volets structural, hydraulique et environnemental. Toutefois, l'apparition et l'évolution des défauts hydrauliques et environnementaux sont fortement liées aux conditions locales. Leur étude nécessite la modélisation du fonctionnement des réseaux d'égout et de la vulnérabilité du milieu récepteur qui sont en fait spécifiques à chaque site. Afin d'évaluer les besoins en réfection des conduites d'égout à l'échelle de la province de Québec sur des horizons de 5, 10 et 20 ans, nous nous sommes plutôt concentrés sur la réfection rendue nécessaire par le vieillissement des conduites, soit celle liée à leur détérioration structurale.

La détermination des besoins futurs en réfection exige une certaine connaissance de l'état actuel des conduites et de la façon dont évolue cet état dans le temps. Des techniques d'auscultation permettent de connaître l'état actuel des conduites d'égout. Par contre, dès lors que nous voulons prédire l'évolution de cet état dans le futur, il faut procéder par modélisation. On constate aujourd'hui que les gestionnaires de réseaux possèdent en fait une connaissance limitée de la condition présente de leurs conduites. Dans la majorité des cas, la réparation ou le remplacement

ne survient qu'en situation d'urgence ou lorsque l'effondrement d'une conduite provoque un affaissement apparent de la chaussée. À cause des limitations financières et des contraintes de main-d'oeuvre, l'entretien préventif demeure presque inexistant. Ceci se traduit par des coûts de réparation élevés, surtout en climat nordique où les réparations sont particulièrement laborieuses en hiver, et par une perte de fiabilité du réseau [Weissert 1989 ; Bible et Hinte 1993 ; Zimmerman et Martin 1993 ; Berrebi et Ledru 1994].

Nous avons effectivement constaté que peu de municipalités québécoises possèdent une bonne connaissance de l'état structural actuel de leur réseau d'égout. À notre connaissance, seules deux municipalités du Québec, que nous nommerons les municipalités A et B, réalisent un examen systématique de leurs conduites d'égout. Le développement d'un modèle d'évolution de l'état structural des conduites devra donc s'appuyer sur les données recueillies dans ces deux villes. Le modèle devra ensuite être transposé aux autres municipalités du Québec pour déterminer les besoins en réfection à l'échelle de la province. Une meilleure connaissance de l'état et des caractéristiques des réseaux d'égout de plusieurs municipalités aurait augmenté la précision de l'évaluation tout en permettant une meilleure planification des travaux futurs de réfection. Nous proposons donc tout au long de ce rapport quelques recommandations sur la récolte et la structuration des données afin d'assister les gestionnaires de réseaux d'égout dans la planification de leurs programmes de réhabilitation.

1.2 La problématique liée à l'évaluation de l'état des conduites d'égout et à leur réhabilitation

Nous traiterons dans cette section des divers aspects reliés à la dégradation structurale des conduites d'égout. Dans un premier temps, nous décrirons les principaux défauts qui affectent la structure des conduites et mentionnerons les origines probables de ces défauts. Par la suite, nous aborderons les techniques actuelles permettant de détecter la présence des défauts structuraux puis mentionnerons les moyens disponibles pour les corriger.

acoustiques). Le troisième type d'auscultation, *l'auscultation physico-chimique*, procède par la mesure et le suivi dans le temps de certains paramètres physico-chimiques propres à la conduite, parmi lesquels on peut citer le pH au niveau de la surface interne, l'étanchéité de la conduite et sa perméabilité ainsi que les concentrations d'éléments chimiques agressifs du sol et de l'effluent. Lors de *l'auscultation mécanique*, on s'intéresse plutôt à la mesure de la résistance structurale de la conduite, soit par l'essai de plaque ou par le vérinage interne. Enfin, *l'auscultation visuelle* consiste à établir un relevé des défauts visibles, lors des visites à l'intérieur des conduites de diamètre supérieur à un mètre ou à l'aide d'une caméra vidéo pour les conduites de diamètre inférieur. Cette technique étant la plus utilisée par les municipalités québécoises, nous lui consacrerons le chapitre suivant.

1.2.2.2 L'auscultation télévisuelle

L'utilisation de la caméra de télévision pour l'inspection des réseaux d'assainissement a été introduite en Angleterre dans les années 60. Cette technologie a permis de constater l'état de dégradation des conduites, qui auparavant demeurait pratiquement inconnu [Reyna 1993]. Ce procédé d'inspection débute par l'introduction dans un regard du réseau d'une caméra de télévision étanche munie d'une source lumineuse puissante puis se poursuit par le déplacement de la caméra dans la conduite. La caméra est soit poussée à l'intérieur du réseau à l'aide d'un câble semi-rigide, soit tractée, soit véhiculée par un chariot automoteur à propulsion électrique. Les images sont transmises par câble à une camionnette laboratoire installée à la surface et sont visionnées sur récepteur de télévision, puis enregistrées ou photographiées. L'inspection peut être enregistrée intégralement sur un magnétoscope à cassettes. L'opérateur suit de l'intérieur de la camionnette le déroulement des images sur l'écran vidéo et assure la télécommande de la caméra. La qualité de l'image dépend du type de caméra et de la lumière utilisée ainsi que de l'expérience du manipulateur. Plusieurs modèles de caméras de télévision de plus en plus performants et sophistiqués existent sur le marché : caméras en couleurs, en noir et blanc, aptes à exécuter plusieurs mouvements de rotation et de bascule pour obtenir une vision radiale de l'intégralité des parois de la conduite ou munies d'équipement photographique [Nacer 1992]. Si nécessaire, des

réparations mineures par colmatage peuvent être exécutées en même temps que l'inspection télévisuelle à l'aide d'une unité combinant une télévision et un appareil de colmatage.

Pour une meilleure détection de l'infiltration, l'auscultation devrait être exécutée pendant les périodes de pluie ou de haute nappe phréatique [U.S. Department of Housing and Urban Development 1984]. La qualité du rapport d'inspection télévisuelle dépend non seulement du matériel utilisé, mais aussi de l'expérience de l'opérateur pour l'interprétation des défauts observés. En effet, un technicien inexpérimenté pourrait confondre un joint avec une fissure circulaire régulière, un poinçonnement avec un dépôt sur la paroi, etc. [Augarde 1993a].

L'inspection télévisuelle ne donne aucun renseignement sur l'environnement immédiat de la conduite. Les principaux défauts pouvant être détectés par une inspection télévisuelle sont présentés au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Défauts structuraux détectables par l'inspection télévisuelle

Affaissement	Joint ouvert
Armature apparente	Ovalisation
Effondrement	Pénétration de racine
Fissure circulaire	Raccordement pénétrant
Fissure longitudinale	Sol apparent
Fissures multiples	Tuyau brisé
Joint brisé	Trou
Joint décalé	

L'auscultation télévisuelle peut être réalisée à l'aide de la caméra conventionnelle, mais également par la caméra multi-directionnelle Aqua Zoom. Cette caméra étanche est descendue à l'intérieur des regards à l'aide d'un mât télescopique. L'unité Aqua Zoom est munie d'un centre de contrôle ainsi que d'un mini studio d'enregistrement. Sa lentille permet d'enregistrer les images jusqu'à 35

mètres à partir des regards et d'identifier ainsi environ 80 % des anomalies du réseau, qui se retrouvent généralement à moins de 20 mètres des regards. La plupart des défauts détectables par l'inspection télévisuelle le sont aussi par la technique Aqua Zoom. Toutefois, les défauts peu apparents sont difficilement repérables par cette technique. Les résultats de l'auscultation sont présentés sous forme d'enregistrement des inspections sur vidéocassettes et de photographies des anomalies majeures. L'unité Aqua Zoom peut être utilisée pour l'inspection des conditions physiques et structurales des égouts sanitaires, pluviaux, combinés et industriels. Elle permet de cibler les tronçons nécessitant un nettoyage et d'identifier les tronçons du réseau où une inspection avec la caméra conventionnelle est requise [Aqua Data Consultant 1996]. Elle constitue donc une technique bien adaptée à une première évaluation de l'état structural du réseau.

1.2.3 La réhabilitation des conduites

L'auscultation télévisuelle permet de constater l'état actuel du réseau d'égout. D'après les résultats de cette auscultation, le gestionnaire de réseau peut choisir d'améliorer l'état de ses conduites à l'aide de diverses méthodes de réhabilitation. La connaissance de ces méthodes et les modèles de prédiction présentés au chapitre suivant (Revue de littérature) permettent au gestionnaire de mieux prévoir les budgets annuels qu'il devrait allouer à la réhabilitation des conduites.

La réhabilitation structurale d'une conduite a pour objectif de la remettre en bon état, que ce soit en la réparant, en la renforçant ou tout simplement en la remplaçant. Les techniques utilisées pour réparer ou renforcer les conduites d'égout sont spécifiques à un problème. Elles sont choisies en fonction de l'objectif poursuivi, des caractéristiques de la conduite ou du type d'intervention (traitement continu ou local). Les principales techniques sont les suivantes [Chocat et al. 1997] :

1) *Injection ponctuelle d'étanchement* : cette technique consiste à introduire dans la conduite un appareillage à extrémités gonflables qui constitue une chambre d'injection sous pression de

produits liquides (résines acryliques) ou pâteux (gels de polyuréthane) sous le contrôle d'une caméra.

2) *Chemisage* : la méthode par inversion consiste à introduire en la retournant une gaine souple imprégnée de résine à partir d'un regard de visite, par l'intermédiaire du poids d'une colonne d'eau qui plaque la gaine contre la paroi et en assure la polymérisation à chaud. Dans la méthode par traction, la mise en place se fait à l'aide d'un treuil qui tire la gaine d'un regard au regard suivant et la mise en pression de l'ensemble est réalisée à l'air pendant la durée de la polymérisation.

3) *Tubage* : la méthode consiste à mettre en place par traction ou poussage dans la conduite à réhabiliter une nouvelle conduite d'un diamètre inférieur. L'assemblage des éléments se fait par collage, thermosoudage ou emboîtement. Plusieurs procédés de tubage par fabrication mécanique sur site sont également disponibles.

4) *Réhabilitation par tube prédéformé* : la méthode consiste à insérer par traction un tube thermoplastique prédéformé en usine ou sur site, assemblé en usine ou sur site. Ce tube est appliqué contre la conduite par remise à la forme initiale spontanée ou forcée (mise en pression, chauffage).

5) *Réparations ponctuelles robotisées* : des robots de haute technologie pilotés depuis la surface et contrôlés par caméra réalisent des interventions de natures diverses selon l'outil amovible qui équipe la tête de travail.

6) *Procédés destructifs* : il s'agit de tubage après broyage à l'aide d'un microtunnelier ou par éclatement de la conduite dégradée.

7) *Projection de béton et éléments préfabriqués* : ces techniques spécifiques des ouvrages visitables (grands diamètres) consistent à mettre en place une coque, partielle ou complète, formée

sur site par projection de béton sur la paroi ou à l'aide d'éléments préfabriqués introduits par un regard de visite.

Le coût de la réhabilitation dépend fortement de la technique utilisée. Par ailleurs, le choix d'une technique de réparation ou de renforcement des conduites dépend de nombreux facteurs qui peuvent être très variables d'un site et à l'autre (niveau d'urbanisation, profondeur, diamètre, nature du terrain, niveau de la nappe, etc.). De tels facteurs sont difficilement généralisables à l'ensemble de la province de Québec et c'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, nous ne nous intéresserons qu'au coût de remplacement des conduites en mauvais état (cf. Chapitre 9).

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Une revue de littérature a été complétée afin d'apprécier l'état de la connaissance sur la planification de la réhabilitation des réseaux d'égout. Cette revue a permis de relever quelques exemples de programmes de réhabilitation ainsi que certains modèles mathématiques utilisés comme outils d'aide à l'élaboration de ces programmes. Ce chapitre présente les exemples relevés dans la littérature et se termine par une section exposant le type de modèle choisi pour la réalisation du présent mandat.

2.1 Programmes de réhabilitation

La majorité des plans de réhabilitation sont basés sur les résultats des examens des conditions actuelles d'un réseau. Certains de ces examens se limitent à la constatation des défauts alors que d'autres tentent d'en déterminer les origines.

Par exemple, le département français de Seine-Saint-Denis a mis en place depuis 1985 un programme d'étude sur l'état des ouvrages d'assainissement [Berrebi et Ledru 1994]. Cette étude mène à l'élaboration de programmes de réhabilitation. La démarche utilisée se décompose en quatre phases qui sont la constatation de l'état actuel, l'auscultation physique et mécanique, l'établissement de l'origine des défauts et la définition des travaux à accomplir.

Les Britanniques du Water Research Center ont quant à eux établi une stratégie de développement de programmes de réhabilitation qui débute par l'identification des segments critiques et des problèmes de performance, les segments critiques étant ceux qui constituent environ le cinquième du linéaire mais qui sont responsables de 80 % des coûts de réhabilitation [Delleur 1987 ; Hurley 1994]. Par la suite, les conduites sont inspectées pour évaluer leur condition structurale puis la condition hydraulique est évaluée par modélisation. Les résultats de ces évaluations sont utilisés dans la détermination des priorités et des options de réhabilitation, puis dans l'élaboration d'un plan stratégique intégré. Le programme se termine par l'implémentation du plan élaboré.

Selon Hurley [1994], l'existence au Royaume-Uni de cette procédure standardisée de planification de la réhabilitation a contribué à résoudre les problèmes associés aux réseaux d'égout de façon plus économique. Clegg et al. [1989] ont appliqué une méthode d'investigation semblable à deux "Regional Water Authorities" du Royaume-Uni (North West Water et Severn Trent Water). Ils ont constaté qu'il était nécessaire de recueillir un grand nombre de données supplémentaires sur les aspects structural et hydraulique de ces réseaux d'égout afin que la méthode fournisse des estimés plus précis des coûts de réhabilitation.

Le projet national de recherche-expérimentation RERAU (RÉhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains) a été mis sur pied en France pour aider à faire progresser la connaissance dans le domaine de la réhabilitation des réseaux d'assainissement [Bergue 1994]. La première opération de ce programme comprend trois objectifs spécifiques qui sont la définition d'une méthodologie de programmation de travaux de réhabilitation structurale, l'évaluation expérimentale des techniques d'auscultation et l'étude de la structure des collecteurs et de son comportement mécanique.

La méthodologie de programmation des travaux définie par le projet RERAU (1^{er} objectif) se décompose en quatre étapes fonctionnant en cascades et servant à réduire progressivement le champ d'investigation :

I) Une première sélection des tronçons à risques est effectuée. Les risques peuvent être reliés au terrain encaissant, à l'effluent, à l'ouvrage, au milieu environnant et au fonctionnement du réseau. Pour chaque type de risques, les paramètres qui interviennent dans son évolution sont identifiés et des critères de quantification sont définis pour chacun. On établit ainsi un guide de notation qui permet, à partir des notes élémentaires pondérées, d'obtenir un niveau de risque global pour chaque tronçon. Les tronçons ainsi identifiés comme plus à risques sont retenus pour l'étape II.

II) Une sélection plus sévère des tronçons retenus à l'étape I est effectuée, en considérant, cette fois-ci, les informations obtenues lors d'inspections visuelles du réseau. Celles-ci sont prises en compte dans l'évaluation de la sensibilité des ouvrages à chaque type de risques. Seuls les tronçons ayant obtenu une note globale critique seront soumis à l'étape III. Cette note globale est obtenue par une pondération des résultats de l'étape I et de l'étape II.

III) Les tronçons qui ont été appréciés comme encourant les risques les plus importants lors des étapes précédentes sont auscultés pour suivre l'évolution des dégradations afin de déterminer les tronçons critiques qui devraient être soumis à l'étape IV.

IV) Les travaux à réaliser sur les tronçons retenus sont définis en précisant les techniques possibles en fonction de l'ensemble des contraintes et des coûts correspondants.

La réalisation du second objectif de RERAU a pour but d'établir une évaluation comparée des contraintes et des performances obtenues ou attendues des diverses techniques d'auscultation. Quant au troisième objectif, il permettra de définir l'ensemble des paramètres propres à la conduite et à son environnement dont la connaissance est indispensable à la caractérisation et à l'évaluation de la structure de la conduite.

2.2 Modèles de planification de la réhabilitation

Tous les modèles de planification de la réhabilitation des réseaux d'égout cités dans la littérature sont basés sur une auscultation préalable de la condition actuelle des conduites. Certains de ces modèles planifient les opérations de réhabilitation seulement à partir du résultat de cette auscultation, et donc de l'état actuel du réseau, tandis que d'autres modèles élaborent un programme de réhabilitation en considérant la détérioration des conduites.

Parmi la première classe de modèles, le modèle mathématique MARESS ("Multi-Attribute Rehabilitation of Sewer Systems") tente d'intégrer les risques hydraulique et structural pour la sélection du plan optimal de réhabilitation des systèmes d'égout combinés [Reyna 1993]. Ce modèle, appliqué sur un réseau d'égout combiné de la ville d'Indianapolis (Indiana, USA), propose un programme de réhabilitation qui s'inscrit à l'intérieur d'une enveloppe budgétaire préalablement fixée, à partir de l'évaluation de l'état physique et hydraulique des conduites du réseau. Le plan de réhabilitation est optimisé en fonction du niveau global d'interruption causé par les réhabilitations (réparations ou remplacements), de la performance structurale du réseau, de la condition hydraulique du réseau, des coûts annuels d'entretien et des coûts associés aux dommages causés par les bris. Toutefois, chacune de ces fonctions de performance est optimisée successivement, ce qui signifie que la solution n'est pas nécessairement optimale globalement.

Bennis et al. [1997] ont tenté de répondre à cette lacune en développant un système d'aide à la décision qui optimise la planification des interventions de réhabilitation des réseaux d'assainissement en considérant simultanément les performances structurale, hydraulique et environnementale ainsi que les coûts sociaux et les coûts d'entretien. La solution du modèle suggère au décideur, pour un horizon de planification défini, l'ordre chronologique des interventions de réhabilitation et les méthodes à utiliser pour maximiser les fonctions objectives de performance, minimiser les coûts sociaux et d'entretien tout en respectant les budgets alloués. Le modèle de Bennis et al. n'est pas encore opérationnel.

Quant au système d'aide à la décision APOGEE [Rommel et al. 1989], il optimise la planification annuelle de l'entretien et de la réhabilitation d'un réseau d'égout en considérant la détérioration éventuelle du réseau. Contrairement aux deux modèles précédents, ce système présente donc un aspect prédictif. À partir d'une base de données détaillée contenant les observations des équipes d'inspection du réseau, le système expert d'APOGEE donne un diagnostic sur l'état du réseau. La connaissance de ce système expert intègre la prise en compte de cinq catégories de risques qui sont l'hydrologie et l'hydrogéologie, les charges excessives sur le réseau, l'agressivité de l'effluent,

les débits sous pression dans le collecteur et l'historique des modes de construction. Grâce à cette connaissance et à la base de données sur les observations effectuées sur le réseau, le système expert évalue l'état actuel du réseau et établit des projections sur l'état futur. L'intensité de chacun des cinq types de risque est donnée sur une échelle qualitative et est associée à un horizon de temps (long, moyen, court et très court terme) estimé pour l'occurrence de la dégradation. À l'aide de ces résultats, un module du système d'aide à la décision planifie les interventions de réparation sur le réseau. L'objectif de ce module est d'identifier pour une année particulière les sections à réparer ainsi que les méthodes de réparation à utiliser. Les aspects financiers sont pris en compte par le système APOGEE, mais non en tant que facteurs limitants. Le modèle évalue les conséquences de ne dépenser que le budget annuel prévu plutôt que le montant total correspondant aux réparations suggérées par le module de planification.

Jacobs et al. [1993] ont également développé un modèle de planification des activités de réhabilitation des réseaux d'égout qui prend en compte la détérioration des conduites. Le but de ce modèle est de planifier à long terme de façon optimale les activités de réhabilitation des égouts pluviaux municipaux. Le modèle recommande, pour chaque année de l'horizon de prédiction, les composantes du réseau à réhabiliter et les options de réhabilitation à employer. L'objectif est de minimiser les coûts totaux prévus pour la réhabilitation des conduites et les pertes éventuellement engendrées par l'usure des conduites et les inondations provoquées par les débordements.

Les trois contraintes de l'optimisation sont : limiter l'argent total dépensé pour la réhabilitation à un montant moindre ou égal au budget disponible, limiter les probabilités de débordement à une borne définie et suggérer un taux d'amélioration (réparation ou remplacement) inférieur au taux de détérioration. Ce taux de détérioration est établi en supposant que l'évolution de la probabilité de bris de chaque conduite peut être évaluée par une fonction linéaire. Les auteurs du modèle considèrent cette approximation linéaire valable pour des horizons de prédiction de 5 à 10 ans. Toutefois, ils admettent que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la condition actuelle des conduites ainsi que leur détérioration dans le temps.

Enfin, Zimmerman et Martin [1993] ont élaboré un modèle prédictif des besoins en réhabilitation de la ville de Moorhead au Minnesota. Leur approche débute par l'auscultation visuelle ou télévisuelle de certaines conduites du réseau auxquelles ils accordent une cote associée à leur état structural. De ces conduites, ils retiennent la longueur totale de celles nécessitant une réhabilitation, soient les conduites en très mauvais état. À partir de ces observations, ils établissent la relation suivante entre le pourcentage de longueur d'égout nécessitant une réhabilitation et l'âge des conduites :

$$Y = 0,00183^{0,070X}$$

avec : Y = pourcentage de la longueur totale du linéaire d'égout nécessitant une réhabilitation ;

X = âge de la conduite d'égout en années.

La Figure 2.1 illustre cette relation :

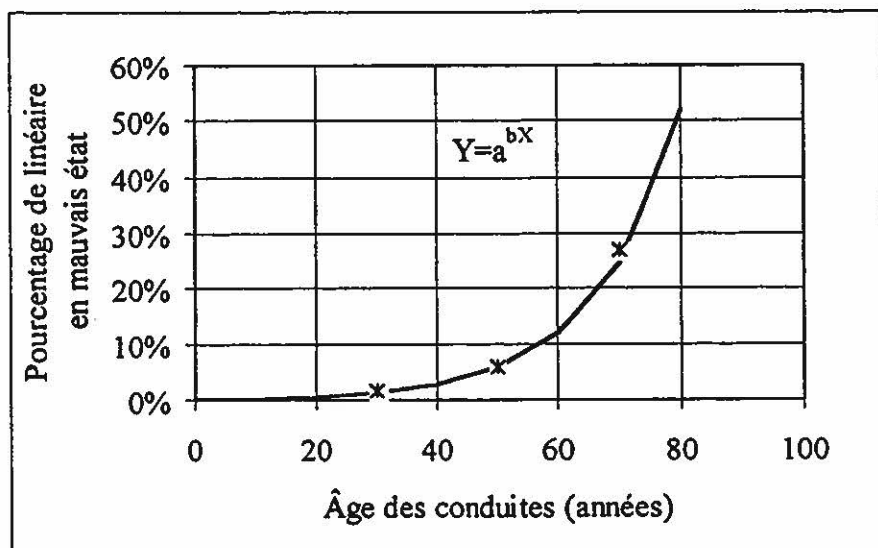


Figure 2.1 : Principe de modélisation retenu dans l'étude de Zimmerman et Martin [1993]

À l'aide de ce modèle, il est possible de prévoir le pourcentage de conduites à réhabiliter dans un nombre donné d'années. L'hypothèse est que les conduites de même âge ont la même probabilité d'être dans le même état. Le modèle est utilisé chaque année par la ville de Moorhead (Minnesota) pour prédire les besoins actuels et futurs en réhabilitation du réseau et estimer les coûts annuels correspondants.

2.3 Choix d'un modèle

Les objectifs de la présente étude sont de déterminer les besoins en réfection des conduites d'égout à l'échelle du Québec sur des horizons de 5, 10 et 20 ans. Nous devons donc choisir un modèle qui permet de tenir compte de la dégradation des conduites afin de prévoir leur état structural futur. De plus, l'acquisition des données nécessaires au développement du modèle (présentée au chapitre suivant) montre qu'on ne trouve que peu de données sur les réseaux d'égout dans les municipalités du Québec. Nous devons donc nous orienter vers un modèle simple qui ne nécessite qu'un minimum de données et qui ne considère que les facteurs de risque les plus importants.

On retiendra donc une approche semblable à celle de Zimmerman et Martin [1993] qui utilisent les observations télévisuelles d'une partie d'un réseau d'égout pour prédire l'état structural de l'ensemble du réseau. Ce type de modèle est particulièrement adapté à la présente étude. En effet, puisque nous ne pouvons appuyer nos prévisions sur l'étude détaillée des réseaux d'égout de toutes les municipalités du Québec, nous tenterons d'établir une relation entre l'âge des conduites et leur état structural d'après les informations recueillies dans quelques municipalités-témoins. Selon la nature et la quantité de l'information disponible, nous pourrions étudier l'influence du matériau ou du diamètre. La relation ainsi développée sera ensuite transposée aux autres municipalités du Québec.

Nous retiendrons donc comme hypothèse principale que toutes les conduites de même âge et de mêmes caractéristiques ont la même probabilité d'être dans le même état. Il est clair que d'autres

facteurs, tels la technique de pose, le sol encaissant ou le climat, peuvent influencer l'état des conduites. En particulier, la technique de pose est un facteur déterminant de la condition structurale des conduites d'égout, bien plus que de celle des conduites d'aqueduc. Comme les conduites enfouies au début du siècle ne reposent sur aucun remblai, le type de sol encaissant est également un facteur qui influence la structure de celles-ci. Toutefois, ces informations demeurent difficiles à obtenir en plus de ne pouvoir être utilisées lors de la transposition. De plus, le fait que le climat et les méthodes de pose soient relativement homogènes sur la partie habitée de la province de Québec vient appuyer l'hypothèse principale du modèle.

3 ACQUISITION DE L'INFORMATION DE BASE

3.1 Information à recueillir

Afin d'établir le modèle de prévision de l'état structural des conduites d'égout, il est nécessaire de recueillir des informations concernant l'âge des conduites, leur longueur ainsi que leur état structural dans quelques municipalités-témoins. L'indicateur retenu pour qualifier l'état structural est la présence de défauts observés lors d'auscultations visuelles ou télévisuelles des conduites. Puisque le modèle développé se base sur une relation statistique, il est nécessaire que ces auscultations aient été effectuées sur des portions représentatives de l'ensemble du réseau. De plus, les réparations réalisées sur les conduites seront récoltées afin de discerner si les conduites qui sont actuellement en bon état le sont depuis leur installation ou parce qu'elles ont déjà été réparées. Finalement, afin de s'assurer que les réseaux d'égout des municipalités-témoins soient représentatifs des réseaux des autres municipalités du Québec, il sera utile de connaître, outre l'âge et la longueur, le matériau et le diamètre de leurs conduites.

3.2 Choix des municipalités-témoins

Parmi les villes ayant répondu au questionnaire de l'INRS-Urbanisation, nous avons premièrement sélectionné celles qui disaient faire de l'inspection télévisuelle et qui, d'après leurs réponses, semblaient posséder une bonne connaissance de l'état structural de leur réseau d'égout. Nous avons fait parvenir aux 40 municipalités ainsi retenues un court questionnaire dans le but d'évaluer la connaissance des gestionnaires des réseaux d'égout sur l'état structural de leurs conduites et de connaître la longueur totale de conduites qu'ils avaient auscultées de façon télévisuelle.

Après examen des réponses au questionnaire, nous avons constaté que la principale faiblesse associée aux données d'auscultations télévisuelles provient du fait que la majorité des villes ne réalisent l'auscultation télévisuelle qu'en situation de crise (ex. : pour détecter la cause d'un refoulement) ou avant de procéder à la réfection de la chaussée au-dessus (afin de déterminer s'il serait souhaitable de remplacer la conduite du même coup). Par ailleurs, certaines municipalités

ont ausculté leur réseau d'égout sur seulement quelques kilomètres, ce qui offre un échantillon de conduites peu représentatif du stock québécois. De plus, plusieurs municipalités ayant réalisé des campagnes d'auscultation visuelles importantes ne conservent aucun résultat rigoureusement archivé de ces observations (rapports manquants ou éparpillés parmi plusieurs services, etc.). Une recherche plus approfondie a également dévoilé que peu de municipalités au Québec possèdent un relevé informatisé des caractéristiques et de la structure de leur réseau d'égout. Ces lacunes empêchent la mise en place efficace du modèle de prédiction et de fait élimine plusieurs villes comme municipalités-témoins. Le manque de disponibilité des gestionnaires est aussi une autre difficulté rencontrée lors du choix des municipalités-témoins.

Deux municipalités ont finalement été retenues comme municipalités-témoins, soit les villes que nous nommerons A et B dans ce rapport. Ces villes sont celles qui satisfont le mieux les critères de sélection. En effet, elles réalisent l'auscultation systématique de leur réseau d'égout, elles ont déjà ausculté plusieurs centaines de kilomètres de conduites, les résultats de ces auscultations sont compilés (sur papier ou sur support informatique) et les deux villes possèdent un fichier informatique contenant les caractéristiques des conduites auscultées. Toutefois, la représentativité des conduites auscultées à la ville A est quelque peu biaisée, puisque les premières auscultations, réalisées dans le cadre du projet EPIC, visaient à connaître l'état des conduites qui présentaient des problèmes d'infiltration ; les auscultations se concentraient donc sur les conduites en mauvais état. À l'opposé, on peut s'attendre à ce que les données de la ville de B sous-estiment la dégradation structurale des conduites puisque l'auscultation télévisuelle y a été réalisée avec la technique Aqua Zoom. Malgré ces limites, les données fournies par les villes A et B demeurent utiles au développement du modèle, d'autant plus qu'elles sont les plus complètes que nous ayons pu dénicher en sol québécois.

4 TRAITEMENT ET STRUCTURATION DE L'INFORMATION

Le traitement de l'information recueillie dans les municipalités-témoins consiste en la création d'une base de données regroupant, pour chaque tronçon ausculté, son matériau, sa date de pose, sa longueur et les défauts observés lors de l'inspection. D'autres informations disponibles ont pu être conservées comme le type de réseau, la rue concernée, etc.

4.1 Structuration des fichiers ÉGOUT des municipalités-témoins

4.1.1 La municipalité B

Nous avons utilisé trois sources d'informations :

- (1) un fichier informatique regroupant diverses données concernant le réseau d'égout (caractéristiques structurales du réseau d'égout, date de l'auscultation, intervention de nettoyage, etc.) ;
- (2) les rapports des inspections télévisuelles réalisées à la caméra Aqua Zoom ;
- (3) les fiches papiers décrivant les réparations réalisées sur le réseau par le service des Travaux Publics.

Le fichier informatisé concernant le réseau d'égout de la municipalité B contenait les informations suivantes pour environ 3 700 tronçons (portion de réseau comprise entre deux regards), soit environ 250 kilomètres de réseau :

- (1) le nom de la rue au-dessus du tronçon ;
- (2) le numéro du regard " DE " ;
- (3) le numéro du regard " À " ;
- (4) le type de tronçon (réseau combiné, sanitaire ou pluvial) ;
- (5) le diamètre du tronçon ;

- (6) la longueur du tronçon ;
- (7) le type de matériau ;
- (8) la date de la première inspection télévisée du tronçon (1993 à 1995) ;
- (9) un commentaire général sur le tronçon suite à la première inspection (OK pour en bon état, tronçon brisé, tronçon ayant été réhabilité lors du PNI, dépôt de graisse, ...) ;
- (10) les problèmes plus spécifiques de saleté ou de dépôts ;
- (11) les problèmes plus spécifiques de niveaux d'eau élevés ;
- (12) les problèmes plus spécifiques de racines ;
- (13) la date des interventions de nettoyage ;
- (14) la date des interventions d'alésage ;
- (15) la date des interventions de colmatage ;
- (16) la date des interventions de réparation ;
- (17) la date de la seconde inspection télévisée du tronçon (1996) ;
- (18) un commentaire général sur le tronçon suite à la seconde inspection (OK pour bon, tronçon brisé, dépôt de graisse, etc.).

Ce fichier a été structuré à l'origine pour le service des travaux publics de la municipalité B. Son objectif premier est de pouvoir planifier les travaux d'intervention sur le réseau. À l'heure actuelle, ceux-ci consistent principalement en l'alésage des racines et au nettoyage des tronçons. Dans un futur proche, il est prévu de remplacer les conduites identifiées comme en très mauvais état (tronçons en grès des rues X, Y et Z). Le second programme d'inspection a débuté en 1996 et a été mis en place pour vérifier l'efficacité des dispositions d'alésage et de nettoyage prises à la suite de la première inspection. Il concerne pour l'instant peu de tronçons et environ 10 % du linéaire total de réseau. Nous n'avons donc pas utilisé les résultats de cette seconde inspection.

Nous avons constaté que, dans ce fichier d'origine, certaines informations nécessaires à notre étude sont malheureusement quelquefois incomplètes, voire manquantes :

- (1) le matériau des tronçons (7) : il reste inconnu pour 60 % des tronçons ;
- (2) les défauts observés sur un tronçon (9) : 15 % du réseau n'a pas été inspecté. Il s'agit de la partie la plus récente de la municipalité. Par ailleurs, seuls les défauts importants comme les bris de conduite ont été saisis dans le fichier d'origine, les informations concernant les fissures ne l'ont pas été ;
- (3) les réparations faites sur les tronçons (16) : elles ne concernent que les remplacements de conduites effectués dans le cadre du projet national sur les infrastructures de 1995. Le choix des conduites remplacées s'est fait principalement en fonction de considérations hydrauliques ;
- (4) la date d'installation des tronçons n'est pas disponible dans le fichier original.

Pour compléter ce fichier original afin qu'il contienne toutes les données nécessaires à notre étude, nous avons utilisé plusieurs sources de données complémentaires. Pour connaître l'année d'installation des tronçons, nous avons fait appel à l'expertise de la ville B et avons utilisé un plan du service d'urbanisme représentant l'évolution du développement de la municipalité depuis le début du siècle. Sept grandes classes d'années de construction ont été identifiées : vers 1903, vers 1917, vers 1947, entre 1952 et 1964, entre 1965 et 1975, entre 1975 et 1985 et après 1985. Pour compléter les données concernant le matériau des tronçons, nous avons fait l'hypothèse que le matériau indéterminé d'un tronçon était de même nature que celui des tronçons voisins. Cette hypothèse est formulée lorsque le tronçon pour lequel le matériau est indéterminé est entouré de tronçons de matériau homogène. Dans le cas contraire, le matériau reste de type indéterminé. Cette démarche nous a permis d'abaisser le taux de tronçon de matériau indéterminé à environ 30 %. Pour compléter la connaissance sur l'état structural actuel du réseau d'égout de la municipalité B, nous avons tout d'abord exploité les quatre rapports d'inspections télévisées disponibles. Ceci nous a permis de compléter le fichier d'origine en incluant tous les défauts structuraux décelés sur le linéaire de chaque tronçon (les défauts relevés sur les regards n'ont pas été pris en compte). On distingue les défauts suivants : (1) armature apparente, (2) sol apparent, (3) tuyau brisé, (4) tuyau affaissé, (5) fissure circulaire, (6) fissure longitudinale, (7) fissures multiples.

Nous avons cherché à compléter notre connaissance sur l'état des tronçons à partir des fiches d'intervention sur le réseau. Comme expliqué dans le chapitre "Acquisition de l'information de base", si aucun défaut n'est observable lors de l'inspection, il se peut qu'une réparation ait été faite sur le tronçon quelques années auparavant. La date et la nature des réparations peuvent donc nous informer sur le mauvais état d'une conduite à un moment donné. Les réparations du réseau d'égout de la ville B (en moyenne 20 à 30 interventions par année) sont archivées depuis 1993. Ces fiches ne peuvent donc nous renseigner que sur les tronçons ayant eu besoin d'une intervention après 1993. En outre, l'adresse notée sur ces fiches est souvent trop imprécise pour pouvoir localiser avec certitude le tronçon sur lequel a été réalisée l'intervention. De plus, la nature de l'intervention, et donc du défaut réparé, n'est jamais rapportée sur les fiches. Il est impossible de distinguer les réparations faites sur un joint de celles réalisées sur la conduite. Dans le cas de conduites parallèles (par exemple, réseau pluvial et sanitaire), aucune précision n'est apportée quant à savoir laquelle a été réparée.

Nous avons finalement conclu que les informations apportées par les fiches de réparations étaient difficilement exploitables et nous n'en avons donc pas tenu compte dans l'évaluation finale de l'état des tronçons du réseau d'égout de la municipalité B. Elles nous renseignent tout au plus sur les quartiers de la municipalité où les interventions sont plus fréquentes, à savoir les quartiers anciens de la municipalité datant de 1903 et 1917 et le collecteur situé sous la rue W (problème de remontée de nappe phréatique identifié dans ce secteur).

La dernière étape dans le traitement de l'information récoltée consiste à attribuer à chaque tronçon un état (bon ou mauvais) en fonction des défauts observés. Comme nous le verrons aussi pour la ville A, le gestionnaire du réseau de la municipalité B tend à considérer que les fissures circulaires sont des défauts plutôt mineurs qui ne demandent pas d'intervention sur le réseau. Par contre, tous les autres défauts observés tels les trous, les fissures longitudinales ou multiples, les armatures apparentes, le sol apparent, les tuyaux affaissés ou brisés nécessiteraient, dans l'idéal, une intervention de réhabilitation.

L'état bon (noté 0) a donc été attribué lorsque aucun défaut n'a été observé ou que seules des fissures circulaires (défaut mineur) ont été décelées. Dans les autres cas, le tronçon a été considéré en mauvais état (noté 1). Finalement, nous avons obtenu une base de données structurée de la façon suivante :

Tableau 4.1 : Structuration de la base de données "ÉGOUT" de la ville B

Numéro de tronçon	Nom de la rue au-dessus	De	A	Diamètre	Type de réseau	Longueur	Matériau	Date d'installation	Date d'inspection	Type de défauts observés	État

Même si certaines données comme le diamètre ou le type de réseau n'ont pas d'utilité directe dans la méthodologie de modélisation, nous avons tenu à conserver le maximum d'informations afin de pouvoir étudier la représentativité de cette municipalité-témoin par rapport à l'ensemble des autres villes du Québec.

4.1.2 La municipalité A

La municipalité A possède une base de données utilisée dans le logiciel HANSEN (logiciel de gestion des infrastructures). Seules les informations concernant les tronçons auscultés de façon systématique ont été extraites. Elles concernent 4 900 tronçons (portion de réseau comprise entre deux regards), soit environ 320 kilomètres de réseau, ce qui représente environ 15 % du réseau total de la ville.

Nous mettrons tout de même un bémol quant au terme systématique utilisé pour décrire l'auscultation. En effet, après discussion avec les membres du service technique de la ville A, il s'est avéré que le programme d'auscultation du réseau, même s'il se veut aujourd'hui systématique, avait été quelque peu orienté au départ en fonction de certains critères. Dans ses débuts, en 1980, l'auscultation du réseau s'est faite dans le cadre des projets EPIC et visait avant tout à repérer les tronçons où les problèmes d'infiltration étaient importants. Elle a donc été

réalisée principalement sur des tronçons de type sanitaire ou combiné qui présentaient un fort taux d'infiltration et qui étaient donc, *a priori*, en mauvais état structural. Le programme d'auscultation a ensuite été poursuivi en s'orientant plutôt vers les parties du réseau les plus anciennes (de 20 à 50 ans) au-dessus desquelles la chaussée avait besoin d'être refaite. L'objectif est donc, dans ce dernier cas, de déterminer s'il est nécessaire d'intervenir sur le réseau au moment où la décision sera prise de refaire la chaussée. Par conséquent, nous pensons avoir une grande incertitude sur la représentativité de l'état du réseau ausculté par rapport à l'état de la totalité du réseau d'égout de la ville A.

Les informations suivantes ont été extraites de la base de données HANSEN :

- (1) le numéro du regard " DE " ;
- (2) le numéro du regard " À " ;
- (3) le type de tronçon (réseau combiné, sanitaire ou pluvial) ;
- (4) le diamètre du tronçon ;
- (5) la longueur du tronçon ;
- (6) le type de matériau ;
- (7) l'année de construction ;
- (8) l'année de l'inspection télévisée ;
- (9) le métrage (distance entre le numéro de regard " DE " et la caméra) ;
- (10) les fissures ou les trous observés à l'endroit où se situe la caméra ;
- (11) les autres défauts structuraux observés à l'endroit où se situe la caméra, tels les ovalisations ou les parois effondrées.

Pour certains tronçons, l'année de construction n'est pas très certaine. Elle est alors notée 9950, par exemple, pour signifier "installé dans les années 1950 environ". Par rapport à la municipalité B, on peut dire que l'information concernant les défauts est plus détaillée en ce sens qu'il est possible de connaître les défauts observés le long du tronçon au rythme de la progression de la caméra (voir Figure 4.1).

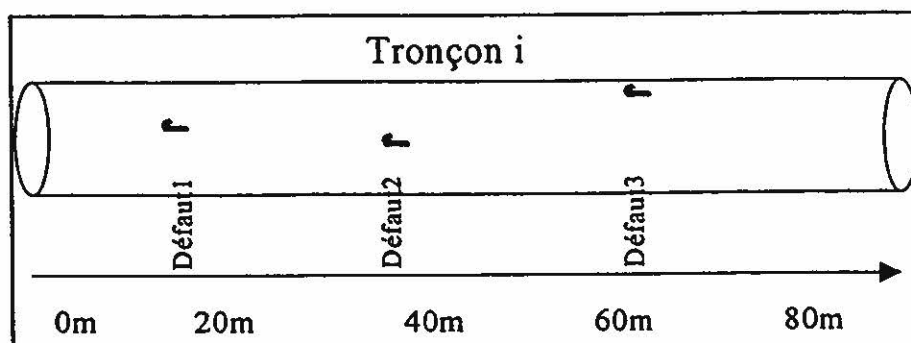


Figure 4.1 : Exemple d'informations sur les défauts disponibles sur un tronçon ausculté

Par ailleurs, l'analyse des défauts est aussi plus précise en ce sens qu'il nous est possible de distinguer plusieurs niveaux de fissures longitudinales (> 3 mm, < 3 mm), de trous (< 5 cm, de 6 à 15 cm, de 16 à 25 cm, > 25 cm), de fissures circulaires, etc. L'unité spatiale de travail étant pour nous le tronçon (portion de réseau entre deux regards), nous avons attribué tous les défauts observés le long du tronçon au tronçon entier. On obtient finalement une base de données semblable à celle de la ville B.

Tableau 4.2 : Structuration de la base de données "ÉGOUT" de la ville A

Numéro de tronçon	De	A	Diamètre	Type de réseau	Longueur	Matériau	Date d'installation	Date d'inspection	Type de défauts observés
i	100	101	200	S	80m	BA	1948	1987	Défaut1, défaut2, défaut3

De la même façon que pour la municipalité B, nous avons ensuite affecté un état à chaque tronçon ausculté. Comme nous venons de l'évoquer, nous disposons d'une caractérisation plus fine de chaque défaut. La difficulté consiste à définir à partir de quel point la gravité d'un défaut exige une réhabilitation. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les règles utilisées par le service d'assainissement de la municipalité A. Celui-ci associe à chaque défaut une note de 0 à 9 en fonction de la gravité du défaut. Par exemple, on remarque que toutes les fissures circulaires ($<$

3 mm, > 3 mm, décalée ou partielle) ont des notes qui s'échelonnent entre 1 et 4 ou encore que les fissures multiples sont notées 7. Afin d'être homogène dans la définition d'un défaut grave (qui nécessite une réhabilitation du tronçon), nous avons retenu comme majeurs les défauts de note supérieure à 4 :

- fissure longitudinale de 3 mm à 30 cm (noté 5) ;
- fissure longitudinale de largeur supérieure à 3 mm à la fin (noté 6) ;
- fissure longitudinale de largeur supérieure à 3 mm au début (noté 5) ;
- fissures multiples (noté 7) ;
- conduite manquante (noté 9) ;
- éclat supérieur à 15 cm de diamètre (noté 5) ;
- fissures longitudinales multiples de largeur supérieure à 3 mm (noté 8) ;
- trou de 6 à 15 cm de diamètre (noté 5) ;
- trou de 16 à 25 cm de diamètre (noté 7) ;
- trou de diamètre supérieur à 25 cm (noté 9) ;
- ovalisation de plus de 5 % (noté 9) ;
- conduite effondrée (noté 9).

On remarquera que la note limite retenue entre les défauts mineurs et les défauts majeurs a peu d'influence sur le linéaire total de réseau en mauvais état :

Tableau 4.3 : Influence de la note limite retenue entre défauts mineurs et défauts majeurs

Définition du défaut majeur	Note > 4	Note > 5	Note > 6
Pourcentage de réseau en mauvais état	27 %	21 %	21 %

Environ 15 % des tronçons ont été auscultés deux fois. Trois cas se sont alors présentés :

(1) le tronçon est en bon état lors des deux inspections (environ 7 % des cas) : nous travaillons pour ce tronçon avec les résultats de la seconde inspection ;

- (2) le tronçon est en mauvais état lors des deux inspections (environ 6 % des cas) : c'est le cas lorsque aucune réparation n'a été faite entre les deux inspections. Nous travaillons pour ce tronçon avec les résultats de la première inspection ;
- (3) le tronçon est en bon état lors de la première inspection et apparaît en mauvais état lors de la seconde inspection (environ 2 % des cas). Nous travaillons pour ce tronçon avec les résultats de la seconde inspection.

4.2 Analyses statistiques de base

Quelques analyses statistiques de base ont été réalisées sur les données des municipalités-témoins. Elles vont nous permettre de juger de leur représentativité quant à l'ensemble des municipalités québécoises.

4.2.1 La municipalité B

Le linéaire total de réseau étudié est de 250 km, découpé en environ 3 700 tronçons d'une longueur moyenne de 70 m. Les analyses ont été réalisées par rapport au nombre de tronçons et par rapport au linéaire des tronçons. Les résultats étant similaires, nous ne présenterons ici que ceux relatifs au linéaire des tronçons.

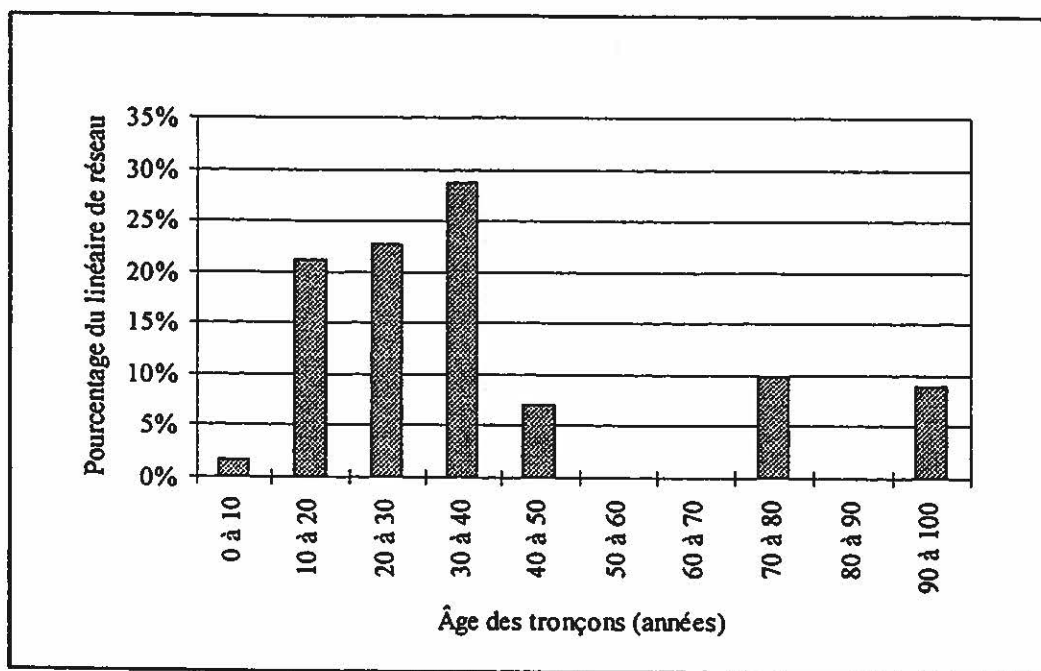


Figure 4.2 : Analyse statistique de l'âge du réseau de la ville B

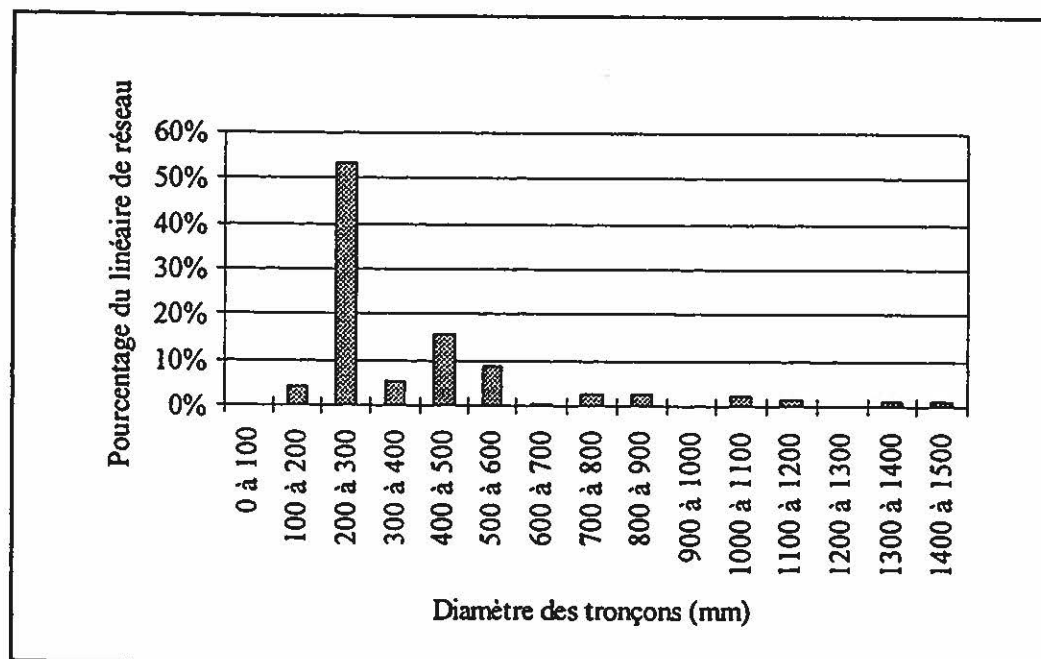


Figure 4.3 : Analyse statistique des diamètres du réseau de la ville B

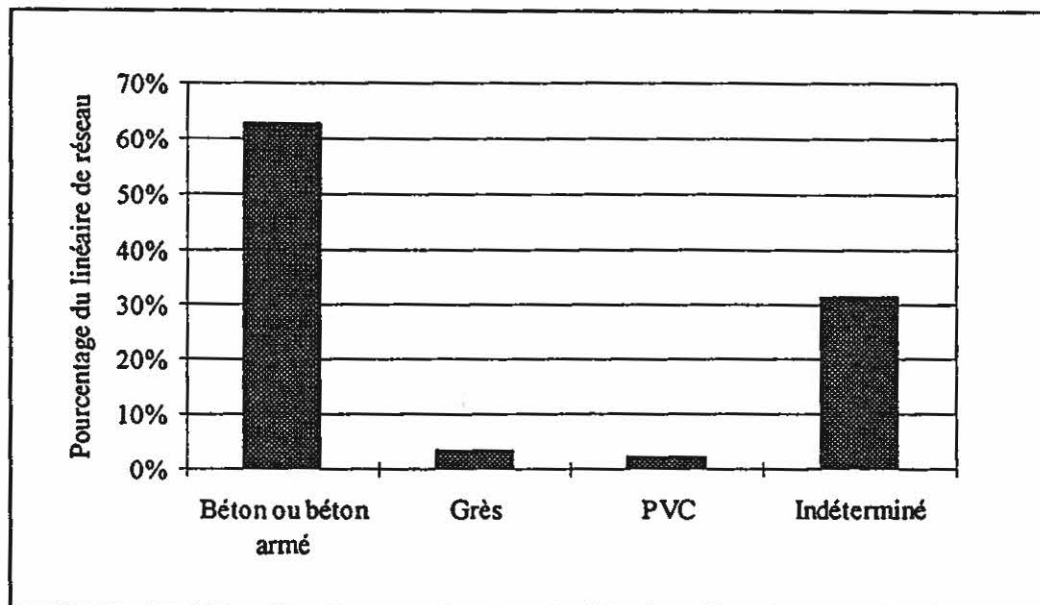


Figure 4.4 : Analyses statistique du matériau du réseau de la ville B

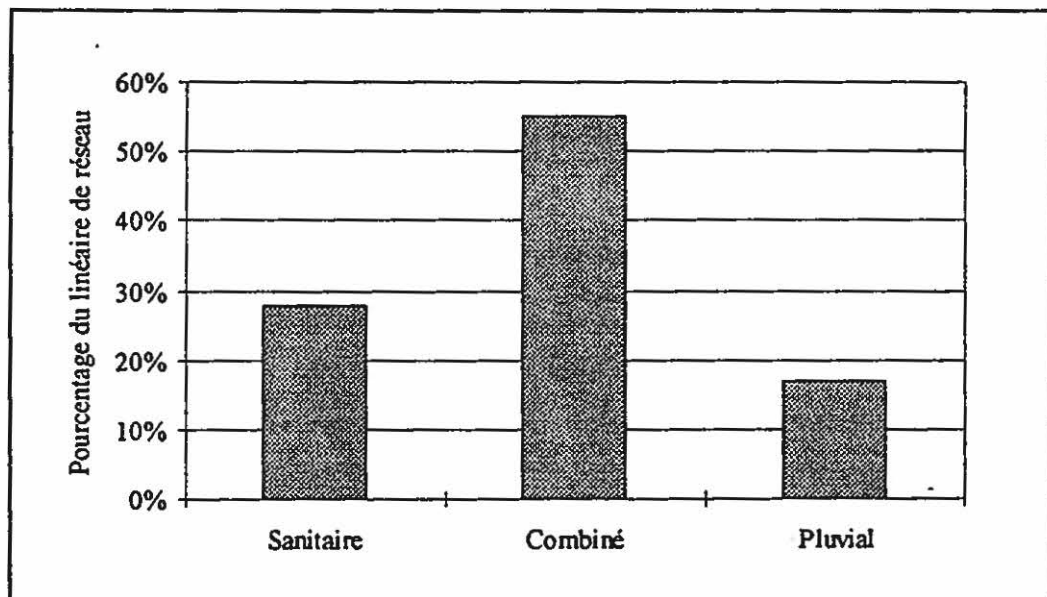


Figure 4.5 : Analyse statistique du type de réseau de la ville B

Le graphique 4.2 montre que près de 75 % du linéaire du réseau a été installé il y a 40 ans ou moins. L'échantillon de vieux tronçons (plus de 50 ans) n'est pas très important (moins de 20 %). Plus de 50 % du linéaire du réseau a un diamètre entre 200 et 300 mm et plus de 90 % a un diamètre inférieur à 600 mm. Le linéaire de réseau de gros diamètres est donc relativement en petit nombre (moins de 10 %). Plus de 60 % du linéaire de réseau est en béton ou béton armé. Il reste tout de même 30 % de linéaire de réseau dont on ne connaît pas le matériau. Les 10 % de linéaire de réseau restants sont en grès, PVC ou encore acier. Le PVC a fait son apparition depuis une quinzaine d'années et est utilisé lors de la construction de tronçons de type sanitaire. Le béton est préféré pour les diamètres plus importants du réseau pluvial. Le réseau d'assainissement est majoritairement de type combiné (50 %), l'autre partie étant de type sanitaire et pluvial. Une information complémentaire concernant la nature du sol nous a été donnée. Celui-ci serait constitué essentiellement de sable (plus de 90 %).

Le Tableau 4.4 compare les données relatives aux caractéristiques du réseau d'égout de la ville B avec celles compilées par l'INRS-Urbanisation pour l'ensemble des villes du Québec ayant répondu au questionnaire.

Tableau 4.4 : Analyse de la représentativité de la ville B

Analyse statistique	Ensemble des municipalités québécoises	Ville B
Conduites de moins de 35 ans	71 %	Près de 75 %
Conduites posées avant 1945	12 %	Près de 17 %
Diamètres pour 50 % des tronçons	200 mm et moins	200 mm à 300 mm
Principaux matériaux utilisés	Béton et béton armé	Béton et béton armé
Pourcentage de réseau sanitaire	45 %	25 %
Pourcentage de réseau pluvial	32 %	25 %
Pourcentage de réseau combiné	23 %	50 %

On remarque que la ville B est assez représentative de l'ensemble des municipalités québécoises bien que les diamètres des conduites semblent en moyenne légèrement supérieurs. Ceci peut s'expliquer par le type de réseau majoritairement combiné présent à la ville B.

4.2.2 La municipalité A

Le linéaire total de réseau étudié est de 320 km, découpé en environ 4 900 tronçons d'une longueur moyenne de 65 m, cette dernière valeur étant du même ordre de grandeur que celle de la ville B. Les graphiques suivants montrent que près de 65 % du réseau a été installé il y a 40 ans ou moins. L'échantillon de vieux tronçons (de plus de 50 ans) n'est pas très important (moins de 10 %).

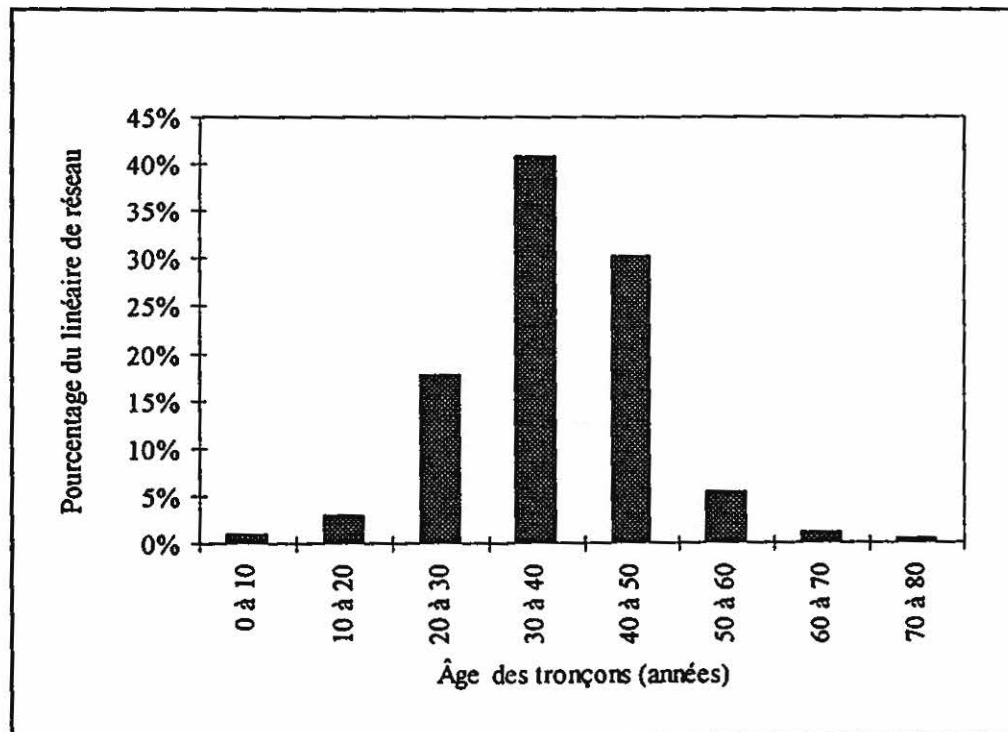


Figure 4.6 : Analyse statistique de l'âge du réseau ausculté de la ville A

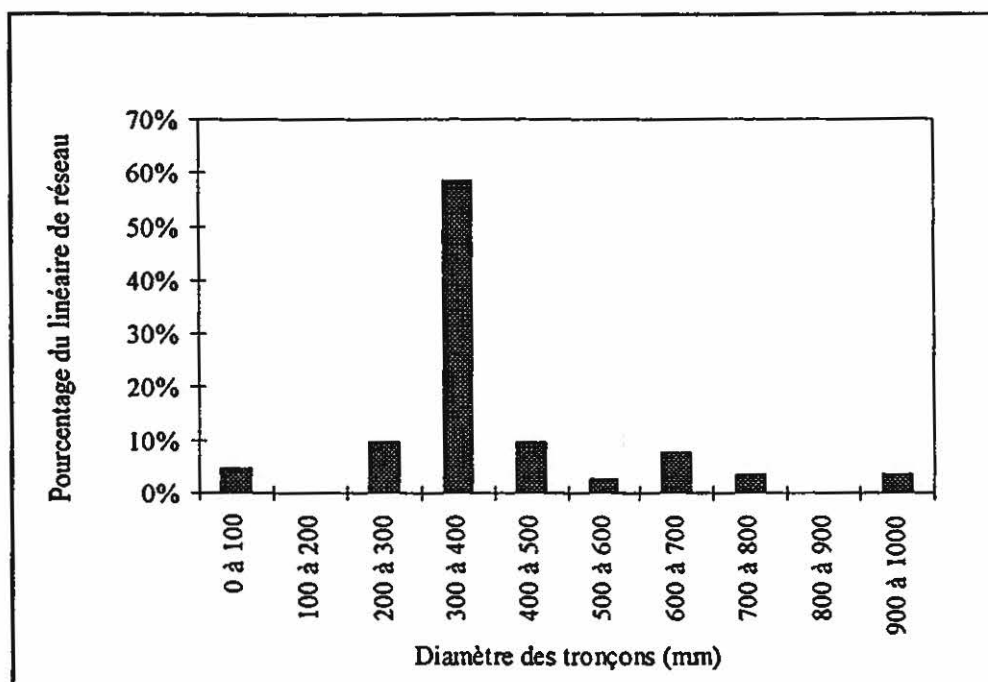


Figure 4.7 : Analyse statistique des diamètres du réseau ausculté de la ville A

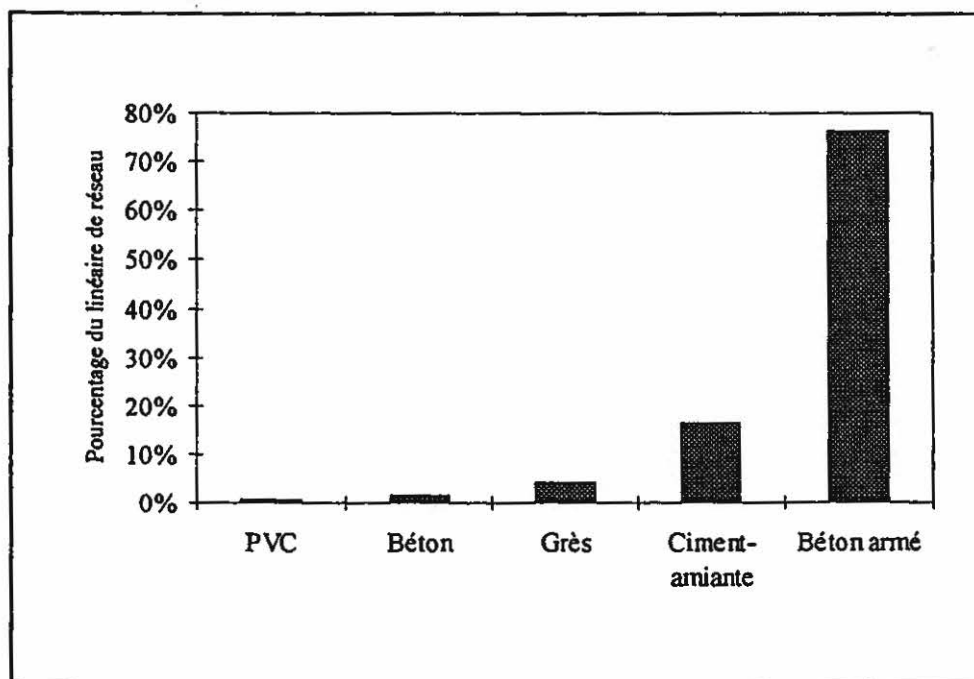


Figure 4.8 : Analyse statistique du matériau du réseau ausculté de la ville A

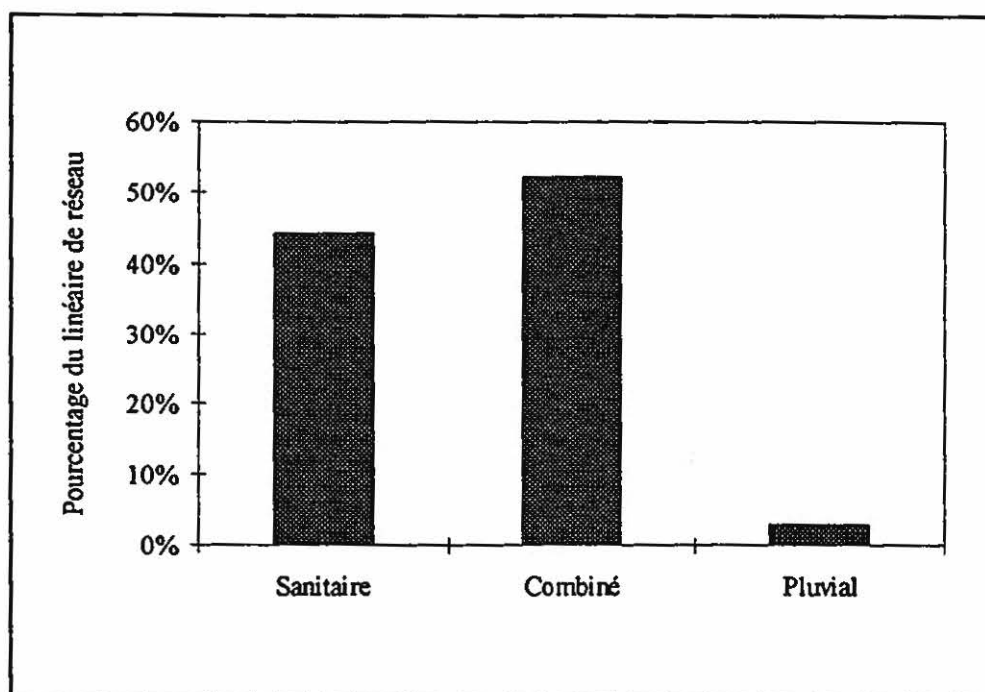


Figure 4.9 : Analyse statistique du type de réseau ausculté de la ville A

On constate que plus de 50 % des tronçons ont des diamètres de 300 à 400 mm et que plus de 85 % ont un diamètre inférieur à 600 mm. Les tronçons de gros diamètres sont donc en très faible nombre. Plus de 75 % des conduites sont en béton ou béton armé. Les 25 % de tronçons restants sont en grès (4 %), ciment amiante (16 %), PVC ou autre (5 %). Comme pour la municipalité B, le PVC a fait son apparition depuis une quinzaine d'années et est utilisé lors de la construction de tronçons de type sanitaire. Le béton armé est préféré pour les diamètres plus importants du réseau pluvial. Le grès est le matériau des tronçons les plus anciens. Le réseau d'assainissement est majoritairement de type combiné (50 %), le reste est essentiellement de type sanitaire (40 %). Le sol est constitué essentiellement de till (mélange de sable, d'argile et de galets).

Le Tableau 4.5 compare les données relatives aux caractéristiques du réseau d'égout de la ville A avec celles compilées par l'INRS-Urbanisation pour l'ensemble des villes du Québec ayant répondu au questionnaire.

Tableau 4.5 : Analyse de la représentativité de la ville A

Analyse statistique	Ensemble des municipalités québécoises	Ville A
Conduites de moins de 35 ans	71 %	Près de 65 %
Conduites posées avant 1945	12 %	Près de 6 %
Diamètres pour 50 % des tronçons	200 mm et moins	300 mm à 400 mm
Principaux matériaux utilisés	Béton et béton armé	Béton et béton armé
Pourcentage de réseau sanitaire	45 %	40 %
Pourcentage de réseau pluvial	32 %	10 %
Pourcentage de réseau combiné	23 %	50 %

On remarque donc que la ville A est, tout comme la municipalité B, assez représentative de l'ensemble des municipalités québécoises. Ces deux municipalités-témoins possèdent des réseaux d'égout aux caractéristiques assez semblables. Cependant, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, les facteurs structuraux ne sont pas les seuls qui puissent intervenir dans la dégradation des réseaux d'assainissement. En toute rigueur, comparer les réseaux d'assainissement des villes A et B nécessiterait une connaissance des facteurs non liés aux caractéristiques du réseau (le trafic au-dessus des conduites, les conditions de pose, la nature précise du sol, ...). Ainsi, il est fort possible que ces réseaux d'assainissement ne vieillissent pas de la même façon, tout simplement parce qu'ils ne sont pas dans le même environnement. C'est pourquoi, pour la suite de notre étude, nous n'agrégerons pas les données de ces municipalités-témoins et effectuerons une analyse distincte pour chacune d'elle.

4.3 Conclusion

La structuration des données recueillies sur les réseaux d'égout des municipalités A et B nous permet de disposer des données nécessaires à la mise en oeuvre de la modélisation, soit l'âge des tronçons à l'instant t , l'état structural de chacun de ces tronçons observé en un instant t et la nature du matériau pour près de 70 % à 90 % des tronçons. Compte tenu de l'incertitude associée au type de matériau des tronçons de la ville B, mais aussi de la faible proportion de matériaux

autre que "béton ou béton armé", nous démontrerons (cf. Chapitre 6) qu'il n'est pas possible, dans le cadre de cette étude, de prendre en compte la nature du matériau dans le modèle final.

L'analyse statistique de l'ensemble des données disponibles nous permet de conclure que les réseaux d'égout des deux municipalités-témoins retenues sont assez représentatifs des réseaux d'égout de l'ensemble des municipalités québécoises, tout au moins pour les données recensées par le questionnaire de l'INRS-Urbanisation. Toutefois, rien ne nous permet de juger de leur représentativité quant aux facteurs environnementaux qui interviennent dans la dégradation des réseaux d'égout.

Enfin, des difficultés que nous avons rencontrées lors de la récolte ou du traitement des données, nous tirons les observations suivantes. Afin d'améliorer la connaissance sur les réseaux d'égouts, il serait intéressant que les municipalités colligent les données en leur disposition dans une même base de données. Celle-ci devrait être structurée de façon à ce que pour chaque tronçon de réseau, on soit capable de connaître les caractéristiques structurales du tronçon (date de construction, matériau, diamètre, etc.) ainsi que les interventions dont il a fait l'objet (date et résultats de l'inspection TV, date et nature des réparations, etc.). Si certaines informations sont difficiles à acquérir, telle la date exacte de pose des conduites, la nature du matériau des tronçons peut facilement être déterminée dès lors que l'on réalise l'auscultation du réseau. Par ailleurs, nous avons contacté plusieurs villes nous disant qu'elles commençaient à noter les interventions faites sur leur réseau d'égout. Il serait souhaitable que cette information soit notée de façon détaillée et qu'elle permette notamment de localiser précisément la portion de réseau réparée (entre le regard i et j) ainsi que de déterminer la nature de l'intervention (réparation d'un trou sur la conduite, etc.).

5 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE

L'objectif premier du modèle développé est de prédire l'évolution du linéaire de réseau d'égout québécois en mauvais état pour des périodes de 5 à 20 ans. Dans un second temps, ce modèle pourra être utilisé pour évaluer différents scénarios de remplacement de tronçons et/ou de croissance du réseau. Comme évoqué dans le chapitre "Revue de littérature", nous nous sommes orientés vers une modélisation très simple des phénomènes pour deux raisons essentielles :

- (1) la méconnaissance des phénomènes fait qu'à l'heure actuelle, il n'existe aucun modèle prédictif prenant en compte les différents facteurs de risque intervenant dans la dégradation des égouts ;
- (2) les données concernant les égouts sont peu nombreuses, très souvent incomplètes ou approximatives. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, les données concernant l'environnement des conduites ne sont pas disponibles et les seules informations que nous avons pu recueillir sont les caractéristiques structurales et l'âge des conduites.

5.1 Principe de modélisation retenu

L'hypothèse principale du modèle proposé est qu'il existe une relation entre l'état du tronçon et son âge. L'état du tronçon sera défini de façon binaire : 0 pour "en bon état" et 1 pour "en mauvais état et nécessitant une réhabilitation". Nous tenons un raisonnement un peu similaire à celui développé dans la modélisation aqueduc, c'est-à-dire que nous faisons l'hypothèse qu'un tronçon en bon état au temps T , a une probabilité λ de se trouver en mauvais état au temps $T+1$. La fonction λ peut bien évidemment dépendre de nombreux facteurs : temps écoulé depuis la pose du tronçon, caractéristiques physiques du tronçon, environnement du tronçon, etc. Dans le cadre de cette étude, où les données disponibles concernant les différents facteurs de risque sont peu nombreuses, nous avons fait l'hypothèse que λ dépend uniquement du temps écoulé depuis la pose. Ainsi, un ensemble de tronçons de linéaire total L_0 , installés au temps T_0 a une probabilité $\lambda(\Delta T=1)$ de se trouver en mauvais état (M_1) au temps T_0+1 , le reste du linéaire restant en bon état (B_1). De même, le linéaire de tronçon en bon état B_1 au temps T_0 , puis T_0+1 , a une probabilité

$\lambda(\Delta T=2)$ de se trouver en mauvais état (M_2) au temps T_0+2 , le reste du linéaire restant en bon état (B_2). La Figure 5.1 illustre la démarche utilisée.

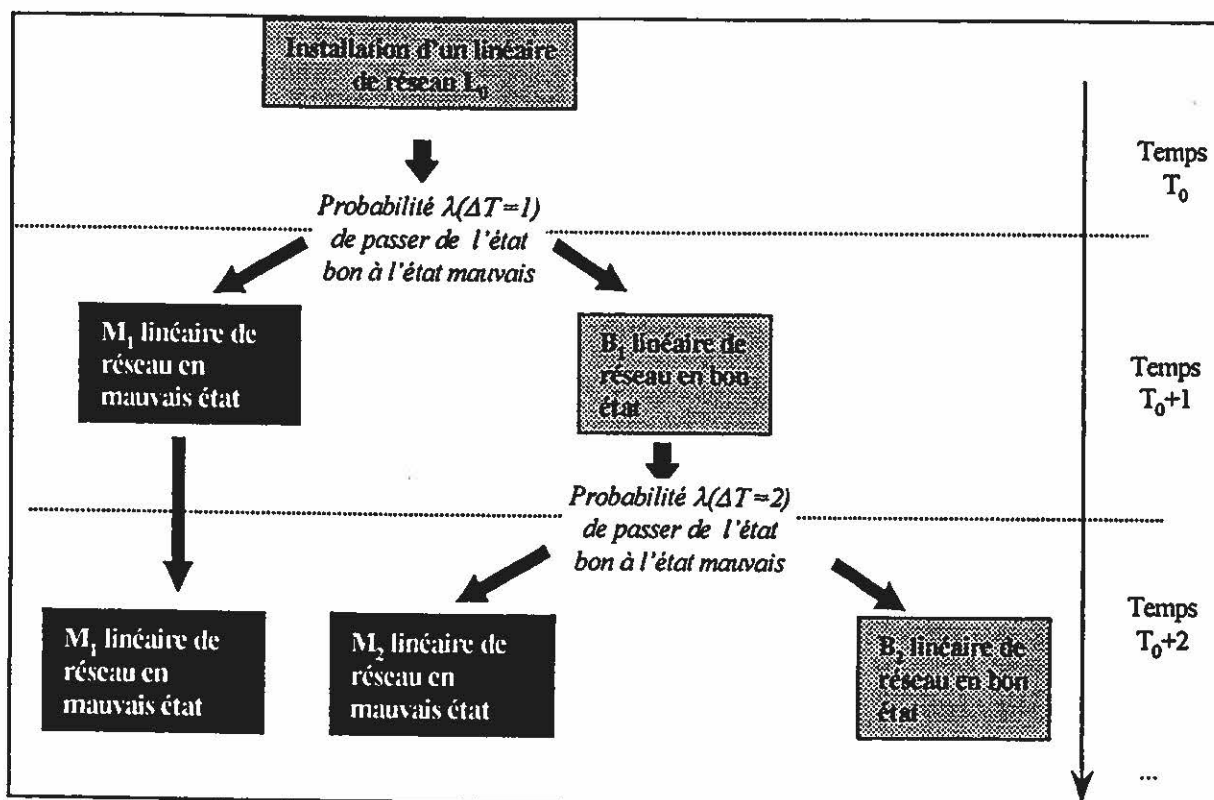


Figure 5.1 Principe de modélisation

5.2 Développement du modèle

Afin d'utiliser ce principe de modélisation dans la présente étude, plusieurs hypothèses complémentaires ont dû être formulées.

5.2.1 Prise en compte de scénarios de croissance

Dans la réalité, la construction d'un réseau d'assainissement se fait en plusieurs étapes au rythme de la croissance de la ville. Il est donc possible qu'un ensemble de tronçons de linéaire total L_i soit

installé au temps T_0+i . Nous ferons l'hypothèse que ce linéaire neuf de réseau vieillit comme celui installé au temps T_0 , c'est-à-dire qu'il a une probabilité $\lambda(\Delta T=1)$ de se trouver en mauvais état (M'_{i+1}) au temps T_0+i+1 , le reste restant en bon état (B'_{i+1}). La Figure 5.2 illustre ce raisonnement.

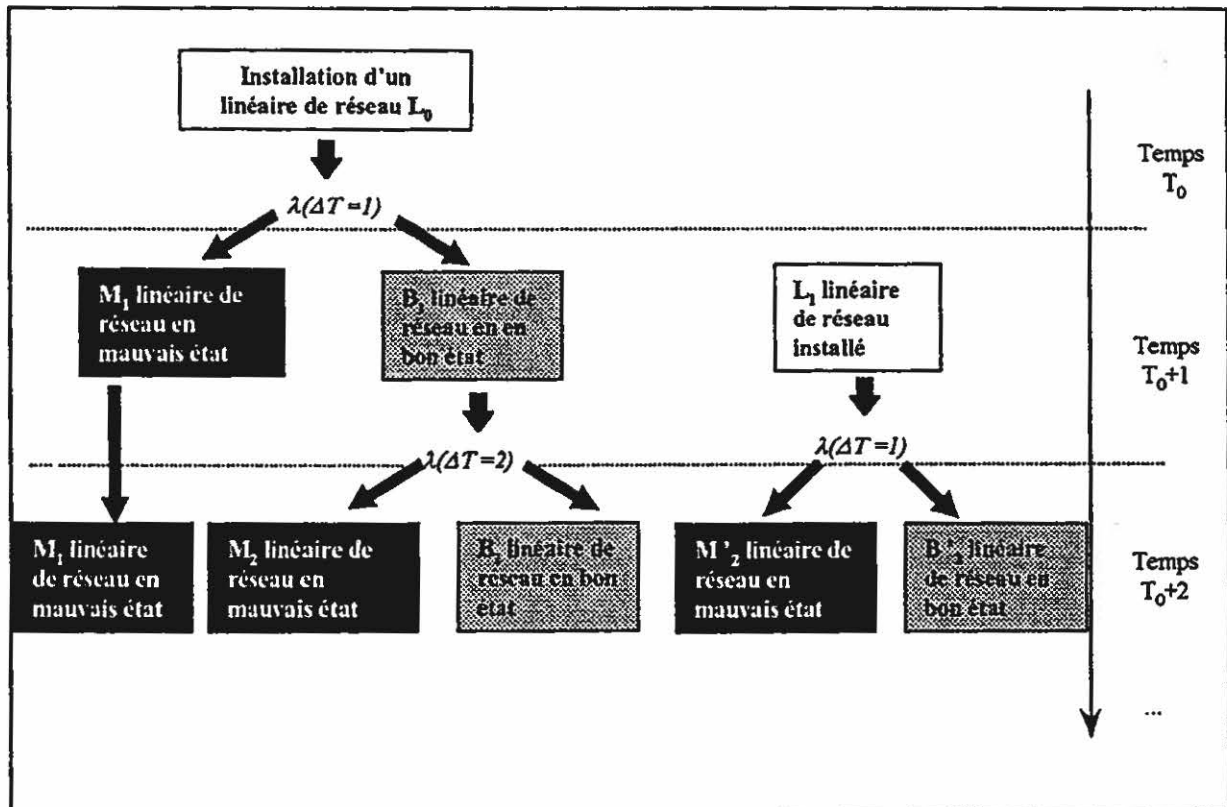


Figure 5.2 : Prise en compte de scénarios de croissance dans le modèle

Les données nécessaires au modèle sont le linéaire de réseau installé au cours du temps et la date à partir de laquelle le réseau a commencé à être construit (T_0). Le paramètre à caler est $\lambda(\Delta T=i)$, la probabilité qu'un tronçon passe de la classe "bon état" à la classe "mauvais état".

5.2.2 Discrétisation du temps

Nous avons vu que pour les municipalités-témoins, les dates d'installation des tronçons pouvaient être très imprécises. Par ailleurs, le modèle devra être appliqué aux autres municipalités du Québec. La seule information que nous avons pour ces autres villes est la répartition de leur réseau

d'égout selon quatre classes d'âge : plus de 51 ans, entre 50 et 36 ans, entre 35 et 21 ans, moins de 20 ans [INRS-Urbanisation 1997]. L'objectif de l'étude est de prévoir le linéaire de réseau d'égout en mauvais état dans 5, 10 et 20 ans. Il nous faut donc choisir un pas de temps de discrétisation d'au plus 5 ans. Compte tenu de l'imprécision des données avec lesquelles nous travaillons, nous retiendrons le plus grand pas de discrétisation possible, soit $\Delta T=5$ ans. Nous ferons de plus l'hypothèse qu'au cours d'une période donnée, le linéaire installé est réparti de façon uniforme. Par exemple, pour une ville dont on sait que le réseau a commencé à être construit en 1900 et que 45 km de réseau ont plus de 50 ans, nous ferons l'hypothèse qu'entre 1900 et 1945, 5 km de réseau ont été installés tous les 5 ans.

5.2.3 Prise en compte de scénarios de remplacement

Il est possible que le gestionnaire d'un réseau d'égout décide de remplacer une partie du réseau pour diverses raisons. Nous avons donc également retenu la possibilité de simuler le remplacement de tronçons. Dans le cadre de cette étude, où nous nous intéressons essentiellement aux besoins en réhabilitation liés au vieillissement des structures, nous ferons l'hypothèse que la décision de remplacer un taux annuel R % du linéaire total du réseau concerne en priorité les parties en mauvais état du réseau. Ainsi, à chaque période T_0+i , une partie du linéaire en mauvais état R_i est remplacée. Ceci revient à installer un linéaire R_i de réseau neuf. Nous ferons l'hypothèse que ce linéaire de réseau neuf vieillit comme celui installé au temps T_0 , c'est-à-dire qu'il a une probabilité $\lambda(\Delta T=1)$ de se trouver en mauvais état (M''_{i+1}) au temps T_0+i+1 , le reste restant en bon état (B''_{i+1}). La Figure 5.3 illustre ce raisonnement.

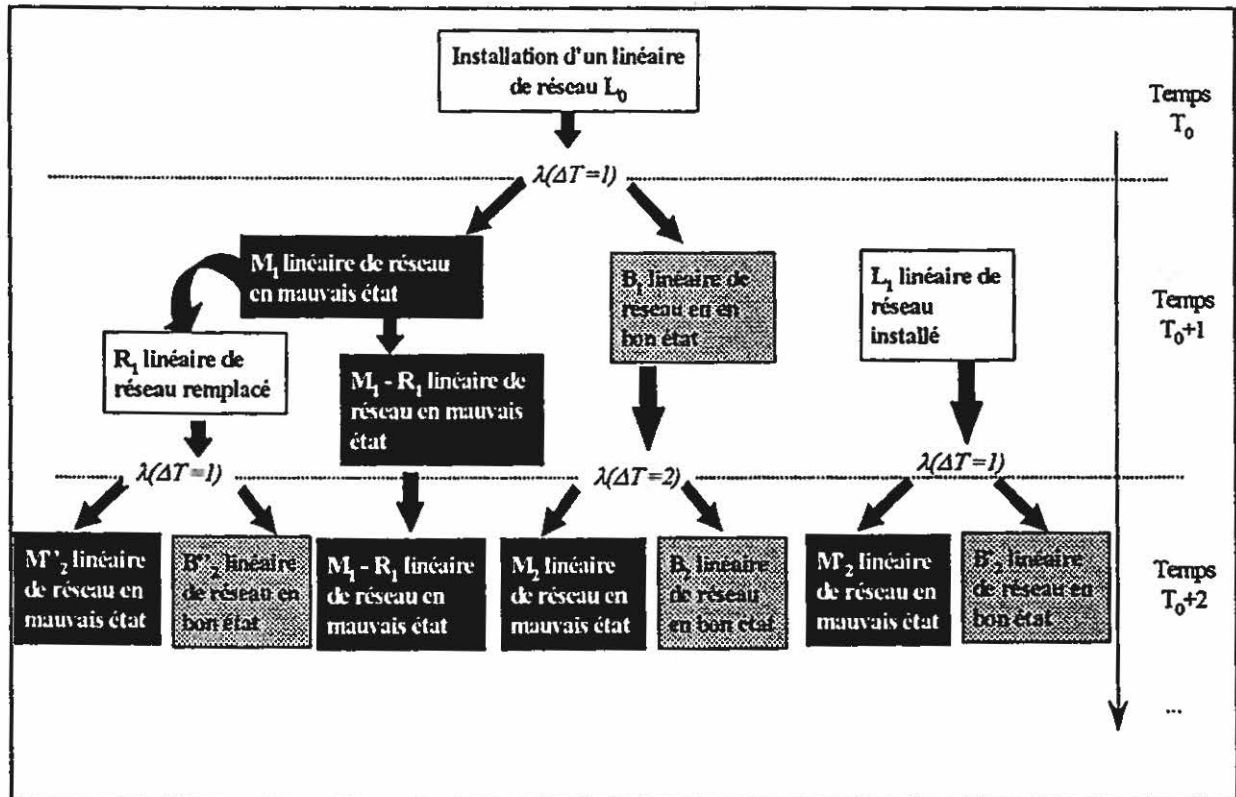


Figure 5.3 : Prise en compte de scénarios de remplacement

5.2.4 Hypothèse concernant le paramètre λ

Nous avons fait l'hypothèse que la fonction $\lambda(t)$ reste constante dans le temps, c'est-à-dire que $\lambda(\Delta T=1) = \lambda(\Delta T=2) = \dots = \lambda(\Delta T=N)$. En d'autres termes, cela signifie que la probabilité qu'un tronçon en bon état au temps T , devienne en mauvais état au temps $T+1$ est la même quel que soit le temps écoulé depuis sa pose, c'est-à-dire que le tronçon soit "jeune ou vieux". Ceci revient à dire que la fonction de survie caractérisant l'évolution du pourcentage de linéaire de réseau en bon état dans le temps $B(t)$ suit une loi exponentielle de type $B(t) = e^{-\lambda t}$. L'évolution du pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état dans le temps $M(t)$ suit alors une loi de type : $M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$. Nous verrons au Chapitre 6 que l'exploitation des données fournies par les deux municipalités-témoins permet de vérifier qu'il existe une relation linéaire significative entre le "pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état" et "l'âge du réseau" pendant la période d'observation.

Cependant, il est assez facile d'assumer qu'à l'infini le pourcentage de linéaire en mauvais état de n'importe quel réseau d'égout tendra vers 100 %. Les données disponibles ne nous permettraient en fait d'observer que la partie quasi-linéaire de la fonction $M(t)$.

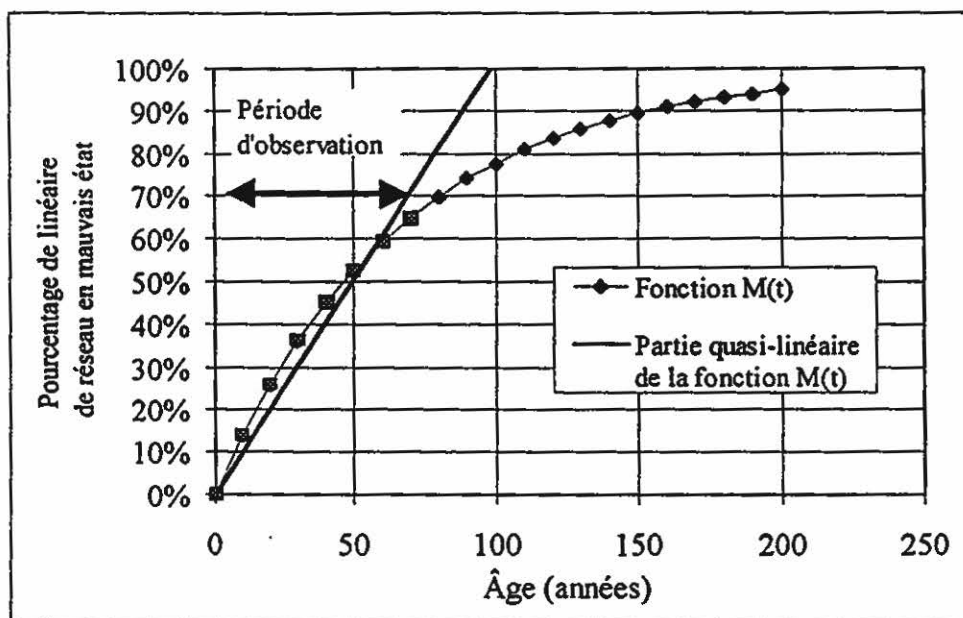


Figure 5.4 : Conséquences de l'hypothèse $\lambda(t) = \text{constante}$

La pente de la droite estimée à partir des données recueillies auprès des municipalités-témoins s'avère donc une bonne estimation du paramètre λ .

5.3 Conclusion

Le modèle proposé permet de prédire l'évolution du linéaire de réseau en mauvais état, c'est-à-dire qui nécessite une réhabilitation. L'hypothèse de base est que la probabilité qu'un linéaire de réseau en bon état au temps T_0+i soit en mauvais état au temps T_0+i+1 ne dépend pas du temps écoulé depuis la date de pose des tronçons.

Le modèle développé s'exprime comme suit :

$$M(T_0+(n+1)\Delta T) = [M(T_0+n\Delta T) - R] + \lambda \Delta T [B(T_0+n\Delta T) + L(T_0+n\Delta T) + R]$$

Avec : $M(T_0+n\Delta T)$ et $M(T_0+(n+1)\Delta T)$: le linéaire de réseau en mauvais état au temps $T_0+n\Delta T$ et $T_0+(n+1)\Delta T$;

R : le linéaire de réseau en mauvais état remplacé entre $T_0+n\Delta T$ et $T_0+(n+1)\Delta T$;

$B(T_0+n\Delta T)$: le linéaire de réseau en bon état au temps $T_0+n\Delta T$;

$L(T_0+n\Delta T)$: le linéaire de réseau installé au temps $T_0+n\Delta T$;

λ : la probabilité qu'un linéaire de réseau en bon état devienne en mauvais état entre $T_0+n\Delta T$ et $T_0+(n+1)\Delta T$.

6 CALAGE ET APPLICATION AUX MUNICIPALITÉS-TÉMOINS

L'objectif est ici de caler le modèle, c'est-à-dire de trouver la valeur représentative du paramètre λ pour les municipalités-témoins A et B.

6.1 Calage et application à la municipalité B

6.1.1 Calage du paramètre λ

Pour caler le paramètre λ , nous avons étudié la relation entre le linéaire en mauvais état et l'âge des tronçons du réseau de la ville B (cf. Figure 6.1). Notons qu'une grande incertitude est associée à la définition de l'âge auquel est apparu le défaut. En effet, l'auscultation nous renseigne sur l'état actuel des conduites. Or il se peut très bien qu'un défaut observé lors de l'auscultation soit présent sur la conduite depuis des années. Le Tableau 6.1 présente les données utilisées.

Tableau 6.1 : Données concernant l'état du réseau de la ville B

Âge approximatif lors de l'auscultation (années)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Âge moyen lors de l'auscultation (années)	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Pourcentage de linéaire en mauvais état	0,82 %	2,76 %	1,36 %	2,40 %	5,42 %	-	7,44 %	-	-	1,1 %
Linéaire total	32 km	18 km	53 km	64 km	13 km	-	22 km	-	-	19 km
Effectif de l'échantillon	15 %	8 %	24 %	29 %	6 %	-	10 %	-	-	8 %

Nous pouvons évaluer à partir de ces données qu'à l'heure actuelle environ 3,5 % du réseau de la ville B (7,5 km sur 220 km) est en mauvais état.

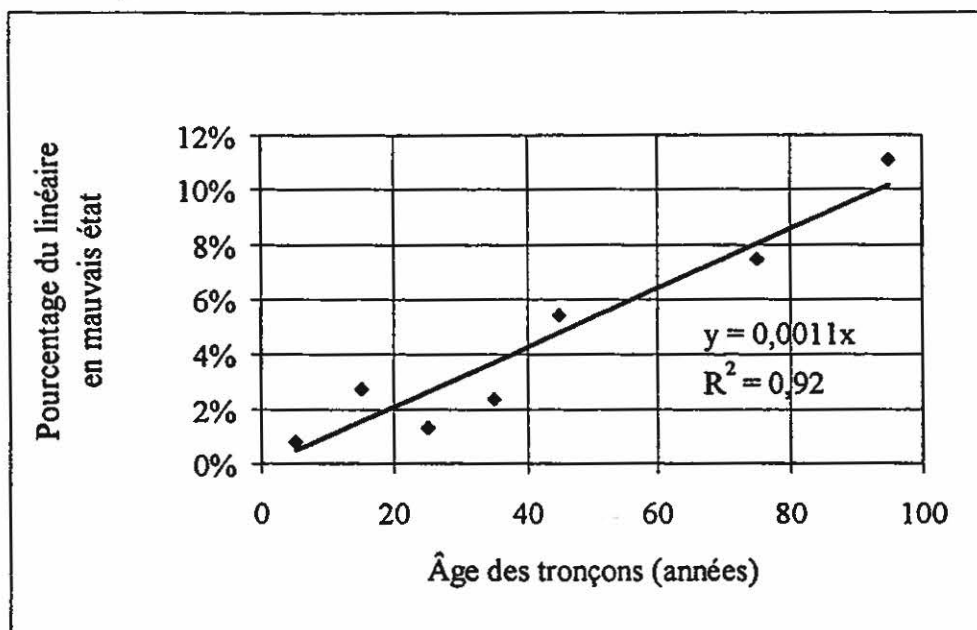


Figure 6.1 : Relation du linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge pour la ville B

Comme indiqué au chapitre précédent, nous observons qu'il existe une relation linéaire significative entre l'état du réseau et son âge. Nous rappelons que nous avons fait l'hypothèse que le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état suit une loi de type $M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$. Les données de la ville B nous permettraient d'observer uniquement la partie linéaire de $M(t)$ (cf. Figure 5.4). La pente de la droite obtenue est une bonne approximation du paramètre λ que l'on cherche à caler. Nous estimons ici cette pente à $\lambda = 0,0011 \text{ an}^{-1}$. Par ailleurs, si $M(t)$ suit une loi de type $1 - e^{-\lambda t}$, nous pouvons évaluer l'âge pour lequel la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état soit d'environ 75 %. On évalue cet âge à plus de 1000 ans ! Or les gestionnaires de réseau avancent un ordre de grandeur de la durée de vie d'un réseau d'environ 100 ans. La valeur trouvée pour la ville B est donc beaucoup trop importante. Nous pouvons formuler deux hypothèses pour expliquer cet écart :

(1) La première est que le pourcentage en mauvais état du réseau de la ville B, qui semble très faible (moins de 5 % au total), est sous-estimé. En effet, la technique utilisée pour l'auscultation du réseau de cette municipalité est l'Aqua Zoom. Comme nous l'avons évoqué au chapitre "Introduction", la caméra reste alors stationnaire dans le regard et est considérée comme efficace en moyenne sur 35 m à chacune des extrémités du tronçon, soit sur 70 m au total. Ceci dit, la longueur inspectée sera beaucoup plus faible dès lors que le tronçon est courbe ou encore que des joints décalés empêchent la bonne visibilité du linéaire de la conduite. Si aujourd'hui le laser est utilisé pour la pose des conduites, il est fort probable que les anciennes conduites ne soient pas disposées de façon très rectiligne. Par ailleurs, certains défauts sont difficilement repérables avec la technique Aqua Zoom. Par exemple, si le débit d'eau dans le tronçon ausculté n'est pas détourné (cas de la ville B), une éventuelle dégradation du radier de la conduite ne peut être repérée. Un trou dans la voûte ou une armature apparente assez éloigné du regard pourra apparaître comme une tache au plafond. Nous pensons donc que la technique utilisée pour ausculter le réseau de la ville B favorise une sous-estimation du nombre et de la gravité des défauts affectant un tronçon. Il est donc probable que la pente de la droite obtenue (0.0011) sous-estime la valeur réelle du paramètre λ .

(2) La seconde hypothèse est que le modèle retenu est peut-être inadéquat et que la courbe $M(t)$ ne tendrait pas vers 100 % selon la loi exponentielle proposée, mais plutôt selon une loi en forme de "S", comme le présente la Figure 6.2. En effet, il est impossible que le réseau continue à vieillir selon la relation linéaire trouvée ou encore selon la loi exponentielle proposée, car on aboutirait à la conclusion que sa durée de vie est supérieure à 1000 ans ! Il semble donc justifiable de penser que le vieillissement de ce réseau va s'accélérer dans les prochaines années pour atteindre 100 % de linéaire en mauvais état pour les conduites ayant entre 100 et 200 ans.

Finalement, nous pensons que la ville B constitue un cas très à part et que les résultats relatifs à cette municipalité-témoin devront être considérés avec prudence, notamment lors de l'utilisation prédictive du modèle.

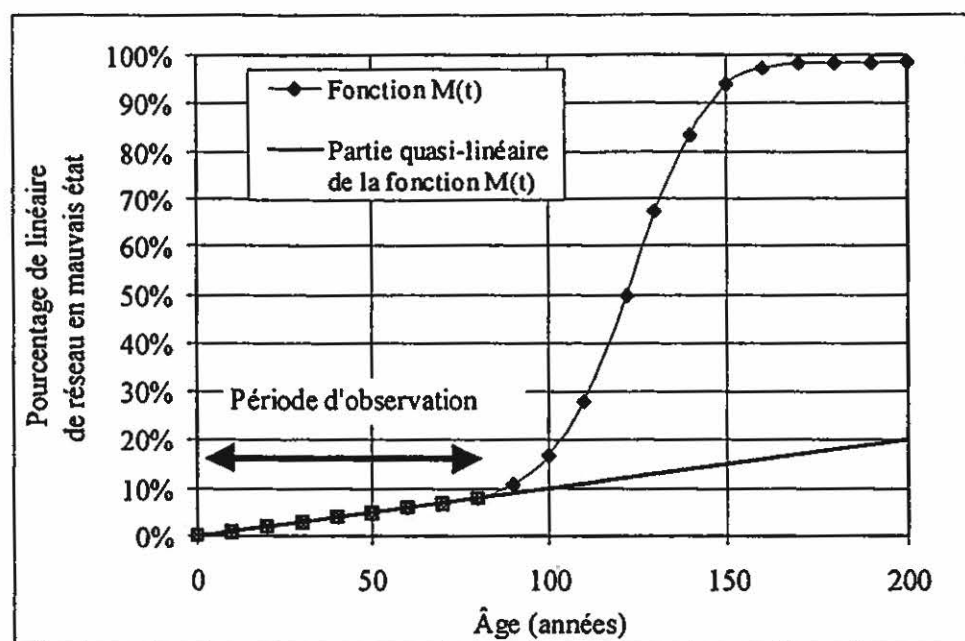


Figure 6.2 : Hypothèse de vieillissement du réseau d'égout de la ville B

6.1.2 Les résultats du modèle

Nous avons retenu pour le cas de la ville B $\lambda = 0,0011 \text{ an}^{-1}$. Pour appliquer le modèle, il nous faut connaître le linéaire de réseau installé au cours du temps, ainsi que la date de pose des premières conduites. Les données obtenues auprès de la municipalité peuvent être classées de la même façon que les données provenant des réponses au questionnaire de l'INRS-Urbanisation, soit en quatre classes selon leur période d'installation (cf. Tableau 6.2).

Tableau 6.2 : Caractéristiques du réseau de la ville B

Période d'installation	Classe d'âges	Linéaire
T1 : 1900 - 1945	> 50 ans	40 km
T2 : 1945 - 1960	Entre 50 ans et 35 ans	45 km
T3 : 1960 - 1975	Entre 35 ans et 20 ans	85 km
T4 : 1975 - 1997	Moins de 20 ans	50 km
TOTAL		220 km

Comme déjà évoqué, nous avons retenu un pas de discrétisation temporelle de 5 ans. Nous avons fait l'hypothèse que pour chaque grande classe d'âges, le linéaire de tronçons installés était uniformément réparti dans le temps. Le premier groupe de conduites a été installé dans les années 1900. Nous avons également fait l'hypothèse que jusqu'à nos jours, le remplacement des conduites d'égout a été négligeable. Cette hypothèse s'appuie sur l'avis d'experts, ainsi que sur la compilation des réponses au questionnaire de l'INRS-Urbanisation (cf. section 8.3). Le modèle permet alors de déterminer l'évolution du linéaire de réseau d'égout en mauvais état de la ville B depuis la pose des premières conduites.

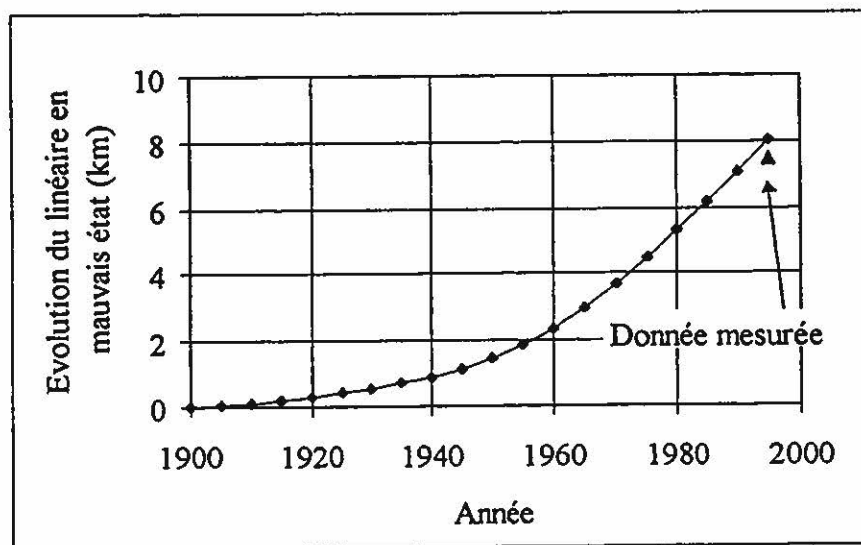


Figure 6.3 : Résultats donnés par le modèle pour la ville B

Le pourcentage actuel de linéaire de réseau en mauvais état est évalué par le modèle à 3,7 %, les données mesurées donnent 3,5 %. L'écart entre les valeurs mesurée et simulée reflète l'incertitude associée à l'approximation par une droite de la relation "linéaire en mauvais état en fonction de l'âge".

6.1.3 Influence du matériau

Nous avons tenté d'étudier l'influence du matériau sur la détermination du paramètre λ (cf. Figure 6.4). Compte tenu de la répartition des tronçons par type de matériau (plus de 60 % en béton, moins de 5 % en grès, moins de 5 % en PVC), on peut s'attendre à ce que les tronçons en béton influencent fortement la relation trouvée pour "tout matériau confondu". Par ailleurs, le nombre de conduites en grès ou en PVC est très petit et difficilement exploitable statistiquement. Il ne nous est donc pas possible de déterminer un paramètre λ pour ces matériaux.

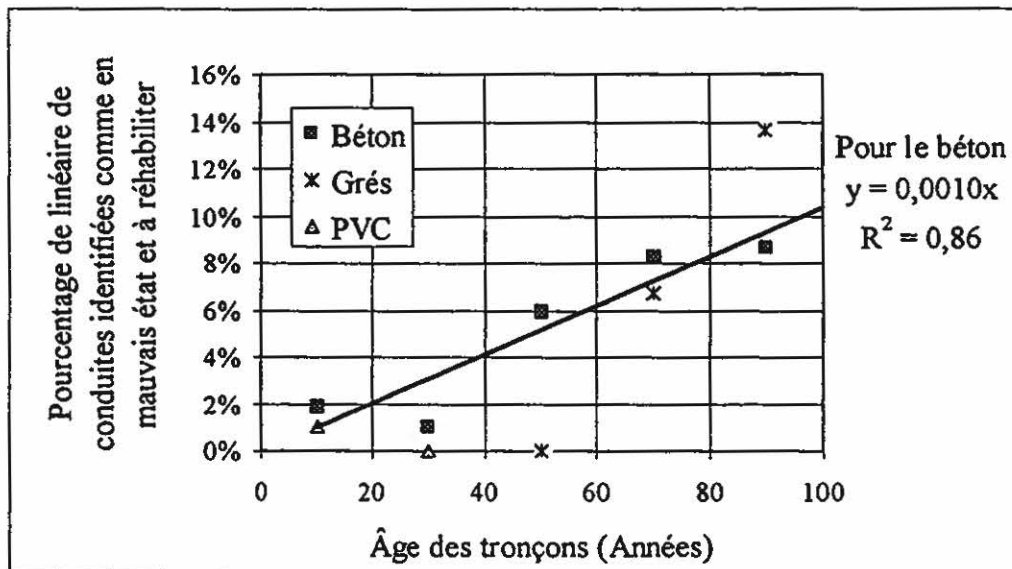


Figure 6.4 : Influence du matériau sur la relation du linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge pour la ville B

La Figure 6.4 montre que pour le béton, on obtient comme attendu une droite de pente proche de $\lambda = 0,0011 \text{ an}^{-1}$, soit $\lambda = 0,0010 \text{ an}^{-1}$.

6.2 Calage et application à la municipalité A

6.2.1 Calage du paramètre λ

Comme pour la ville B, nous avons étudié la relation entre le linéaire en mauvais état et l'âge des tronçons du réseau de la ville A. Notons qu'ici aussi une grande incertitude est associée à la définition de l'âge auquel est apparu le défaut, pour les mêmes raisons qu'à ville B (cf. section 6.1.1). Le Tableau 6.3 présente les données utilisées.

Tableau 6.3 : Données concernant l'état du réseau de la ville A

Âge lors de l'auscultation (années)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
Âge moyen lors de l'auscultation (années)	5	15	25	35	45	55	65	75
Pourcentage de linéaire en mauvais état	2 %	12 %	18 %	29 %	34 %	72 %	78 %	72 %
Linéaire	7 km	29 km	103 km	97 km	70 km	10 km	4 km	0,3 km
Effectif de l'échantillon	2 %	9 %	32 %	30 %	21,9 %	3 %	1 %	0,1 %

Pour cette municipalité, nous pouvons évaluer le taux actuel de linéaire de réseau en mauvais état à environ 25 % (80 km sur 320 km de réseau). Compte tenu des similitudes entre les municipalités A et B (cf. section 4.2), on pourrait penser que les réseaux de ces deux villes se comportent de la même façon. La Figure 6.5 montre que les pentes des droites "pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge" sont pourtant très différentes.

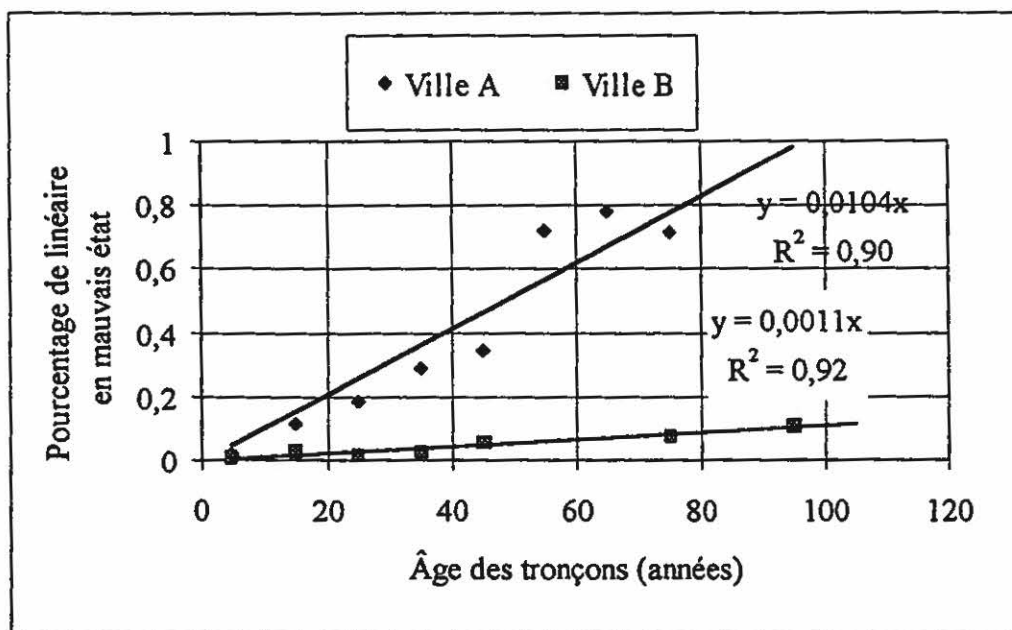


Figure 6.5 : Comparaison des relations entre le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état et l'âge des tronçons obtenues pour les villes A et B

Appliquer à la ville A le paramètre $\lambda = 0,0011 \text{ an}^{-1}$, calé sur la municipalité B, conduirait à sous-estimer fortement le pourcentage de linéaire en mauvais état observable en 1997 : 5 % au lieu de 27 %. Nous avons donc dans un premier temps retenu $\lambda = 0,0104 \text{ an}^{-1}$, pente de la droite "pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge" obtenue pour cette ville. Nous évaluons avec ce paramètre que la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état est de 75 % lorsque ce tronçon a atteint l'âge de 130 ans. Cet ordre de grandeur est beaucoup plus raisonnable que celui trouvé pour la ville B, ce qui nous laisse penser que les résultats de la ville A nous fournissent une image beaucoup plus réaliste.

6.2.2 Les résultats du modèle

Les données d'entrée du modèle sont présentées au Tableau 6.4. Concernant la répartition dans le temps du linéaire de réseau construit et les remplacements de tronçons, nous avons fait les mêmes hypothèses que pour la ville B.

Tableau 6.4 : Caractéristiques du réseau de la ville A

Période d'installation	Classe d'âges	Linéaire
T1 : 1900 - 1945	> 50 ans	11 km
T2 : 1945 - 1960	entre 50 ans et 35 ans	111 km
T3 : 1960 - 1975	entre 35 ans et 20 ans	158 km
T4 : 1975 - 1997	moins de 20 ans	40 km
	TOTAL	320 km

La Figure 6.7 montre que le modèle est ici mal calé et surestime le pourcentage de linéaire en mauvais état observable en 1997 (33 % au lieu de 27 %). Il est intéressant de remarquer que l'équation de la droite que nous utilisons pour caler λ a été établie à partir de peu de points et que par ailleurs les points extrêmes influencent fortement l'équation de cette droite. Or, on remarque que dans le cas précis de la ville A, l'effectif des trois dernières classes d'âge est très petit (moins de 5 %). Si on ne tient pas compte de ces trois derniers points, la valeur de λ est proche de 0,0077 an^{-1} (cf. Figure 6.6). On estime avec ce paramètre que la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état est de 75 % lorsque ce tronçon a atteint l'âge de 180 ans, ce qui semble peu élevé devant l'ordre de grandeur de 100 ans avancé. Nous pouvons donc penser que pour la ville A, la valeur représentative de λ se trouve entre 0,0077 et 0,0104.

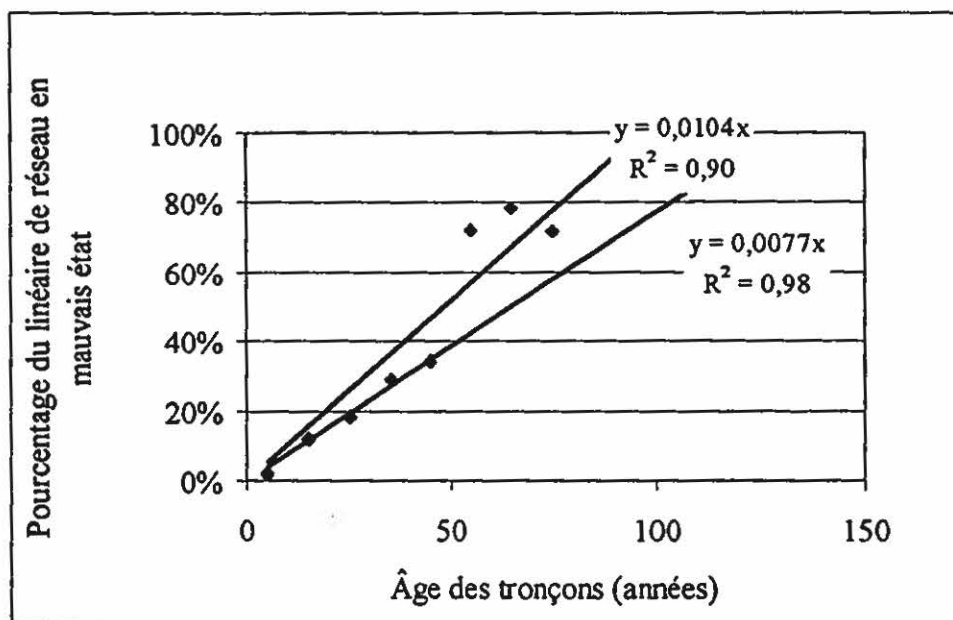


Figure 6.6 : Amélioration du calage de λ dans le cas de la ville A

La Figure 6.7 montre qu'avec cette nouvelle valeur de λ , le modèle donne une évaluation du linéaire de réseau en mauvais état en 1997 tout à fait acceptable.

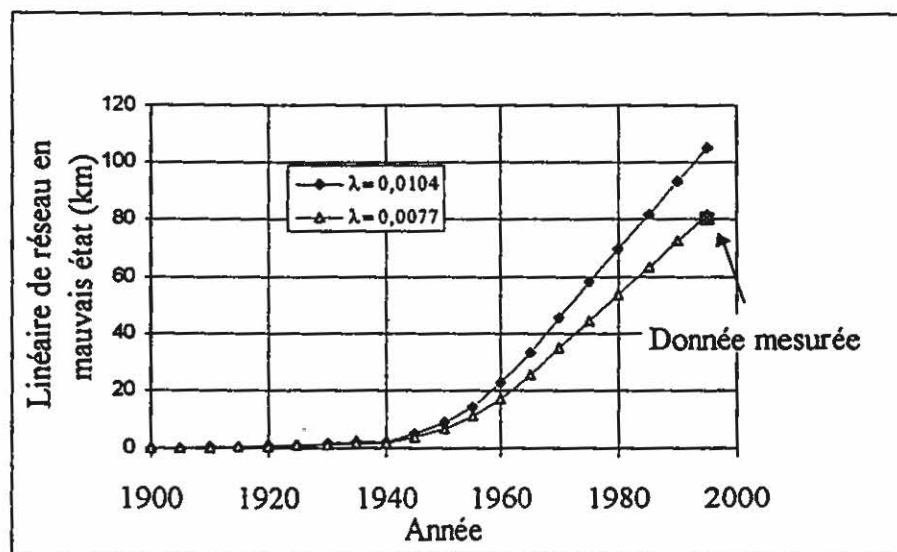


Figure 6.7 : Résultats obtenus par modélisation pour la ville A

Ces résultats montrent dans un premier temps que la valeur de λ , telle que nous pouvons l'évaluer, dépend fortement du nombre de données disponibles dans chaque classe d'âge et peut être très sensible aux valeurs extrêmes (cas des très vieux réseaux faiblement représentés dans l'échantillon de données de la ville A). Par ailleurs, nous venons aussi de montrer qu'il serait discutable d'extrapoler la valeur de λ calée pour une des municipalités-témoins à toutes les autres municipalités du Québec. Nous nous sommes donc orientés vers la définition d'une fourchette de valeurs dans laquelle il semble raisonnable que λ varie. Concernant la borne inférieure de cet intervalle, la valeur de λ obtenue pour la ville B est le seul ordre de grandeur que nous ayons. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, le cas de la ville B est sans doute un cas très à part et $\lambda = 0,0011 \text{ an}^{-1}$ constitue sûrement une borne inférieure "extrême" (cf. section 6.1.1). Nous verrons dans la section 6.3, comment à partir de données complémentaires sur la ville C, nous avons opté pour une borne inférieure de l'intervalle de variation de λ qui semble plus réaliste. Pour ce qui est de la borne supérieure, la valeur de λ obtenue pour la ville A constitue le seul ordre de grandeur que nous ayons. Comme nous venons de le remarquer, il est fort probable que cette valeur se trouve entre 0,0077 et 0,0104. Ce raisonnement s'appuie sur une estimation réaliste de l'âge pour lequel la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état soit de 75 %, à partir du modèle développé ($M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$) et calé. Les gestionnaires de réseau avancent comme durée de vie d'un réseau un ordre de grandeur de 100 ans. Nous retiendrons donc une borne supérieure de λ telle que la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état soit de 75 % lorsque le tronçon a atteint l'âge de 100 ans, c'est-à-dire $\lambda = 0,014 \text{ an}^{-1}$.

6.2.3 Influence du matériau

Comme pour la ville B, nous avons tenté d'évaluer l'influence du type de matériau (cf. Figure 6.8).

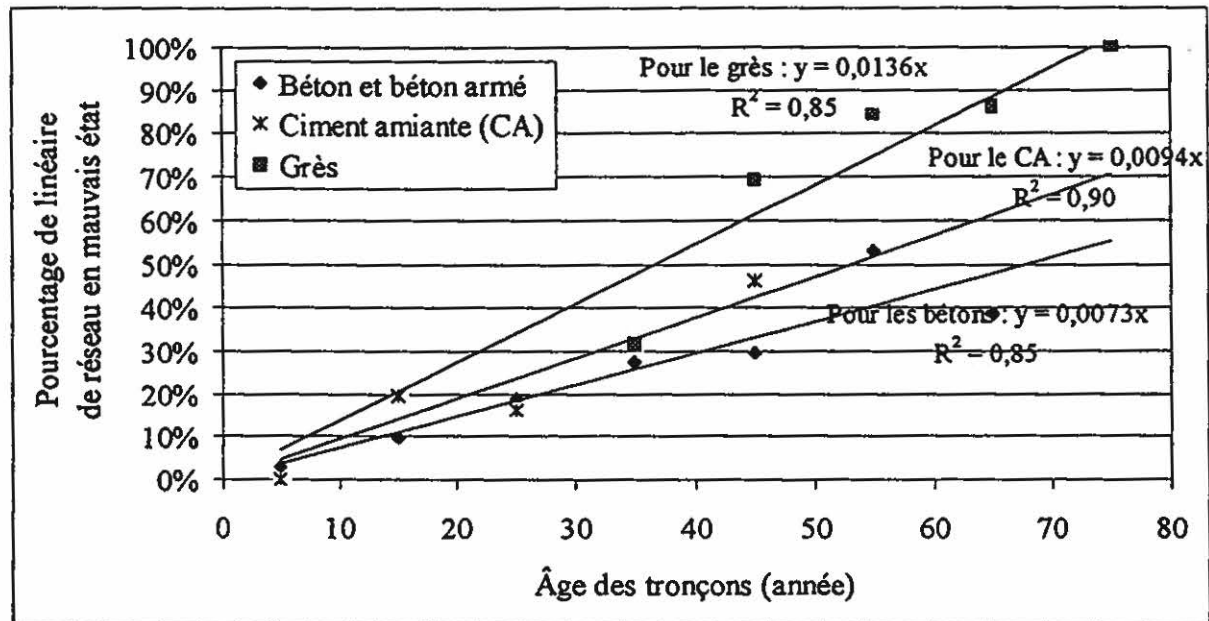


Figure 6.8 : Influence du matériau sur la relation "linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge" dans le cas de la ville A

Il semble, dans ce cas précis, qu'on observe un comportement linéaire quel que soit le type de matériau étudié (grès, béton ou ciment amiante). Prendre le matériau en compte nécessiterait de distinguer une valeur du paramètre λ pour chacune des classes de matériau. On observe ici que pour le grès, λ tendrait à être plus important ($\lambda = 0,0109 \text{ an}^{-1}$). Dans la classe d'âge 70-80 ans, on observe que tous les tronçons auscultés et en mauvais état sont en grès. Ceci explique la forte influence de cette classe d'âge sur la régression trouvée pour "tout matériau confondu". Il semble donc qu'il soit souhaitable de travailler par classe de matériau. Cependant, compte tenu des données disponibles aussi bien pour les municipalités-témoins que pour les villes auxquelles nous devons transposer le modèle, nous n'avons pas d'autre choix que de travailler avec un modèle "tout matériau confondu".

6.3 Comparaison avec la ville C

Des données complémentaires fournies par la ville C permettent d'appuyer le raisonnement tenu pour établir la plage de variation de λ . Ces données n'ont pas pu être traitées comme celles des villes A et B, car il n'a pas été possible de faire le lien entre la base "tronçons" (repérés uniquement par un identificateur unique) et les défauts observés (non informatisés, repérés par 2 numéros de tronçons non présents dans la base "tronçons" et un nom de rue entre deux intersections). Cependant, il nous a été possible d'obtenir par classe d'âges, le total du linéaire ausculté et le total du linéaire que l'étude d'auscultation suggérait de réhabiliter. Le linéaire de réseau à réhabiliter a été estimé sur les mêmes critères que ceux utilisés dans cette étude, c'est-à-dire en fonction des défauts majeurs observés sur les tronçons. Dans l'étude spécifique de la ville C, les défauts majeurs sont les tuyaux brisés, les tuyaux affaissés, les trous, le sol apparent, les armatures apparentes et les fissures longitudinales. Les données de la ville C concernent sept secteurs. Le secteur de la rue V n'a pas été pris en compte car il a fait l'objet d'une inspection en raison d'une demande spécifique. Au total, nous avons considéré les données de six secteurs qui ont été inspectés de façon non sélective, c'est-à-dire que ces inspections n'ont pas été réalisées à des endroits posant des problèmes spécifiques connus. Les deux méthodes d'auscultation (Aqua Zoom et caméra télévisuelle, CTV) ont été utilisées selon les secteurs. Le Tableau 6.5 présente les données fournies "tout matériau confondu" (essentiellement brique et béton armé).

Tableau 6.5 : Données concernant l'état du réseau ausculté de la ville C

Secteur	Type et année d'inspection	Âge du secteur	Longueur totale inspectée	Longueur totale présentant des défauts majeurs	Taux à réhabiliter
D	CTV 93	90 ans et plus	2800 m	1050 m	38 %
E	CTV 93	80 ans et plus	4400 m	1150 m	26 %
F	Aqua Zoom 93	30 à 40 ans	36880 m	440 m	4 %
G	Aqua Zoom 95	80 ans et plus	42404 m	13450 m	32 %
H	Aqua Zoom 96	50 ans et moins	9067 m	1467 m	16 %
I	Aqua Zoom 96	40 ans et moins	5299 m	1333 m	25 %

Nous pouvons, à partir de ces informations, situer la ville C sur le graphique "pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état en fonction de l'âge". L'âge du réseau étant très approximatif, nous avons fait les hypothèses présentées au Tableau 6.6 :

Tableau 6.6 : Hypothèses faites sur les âges des conduites auscultées de la ville C

Secteurs utilisés	Âge approximatif du secteur	Taux à réhabiliter
D	95 ans	38 %
E et G	85 ans	31 %
H	45 ans	16 %
F et I	35 ans	7 %

La Figure 6.9 présente les résultats obtenus et permet de les comparer à ceux trouvés pour les deux municipalités-témoins. Nous avons représenté une plage d'incertitude de ± 10 ans pour les âges des secteurs inspectés à la ville C.

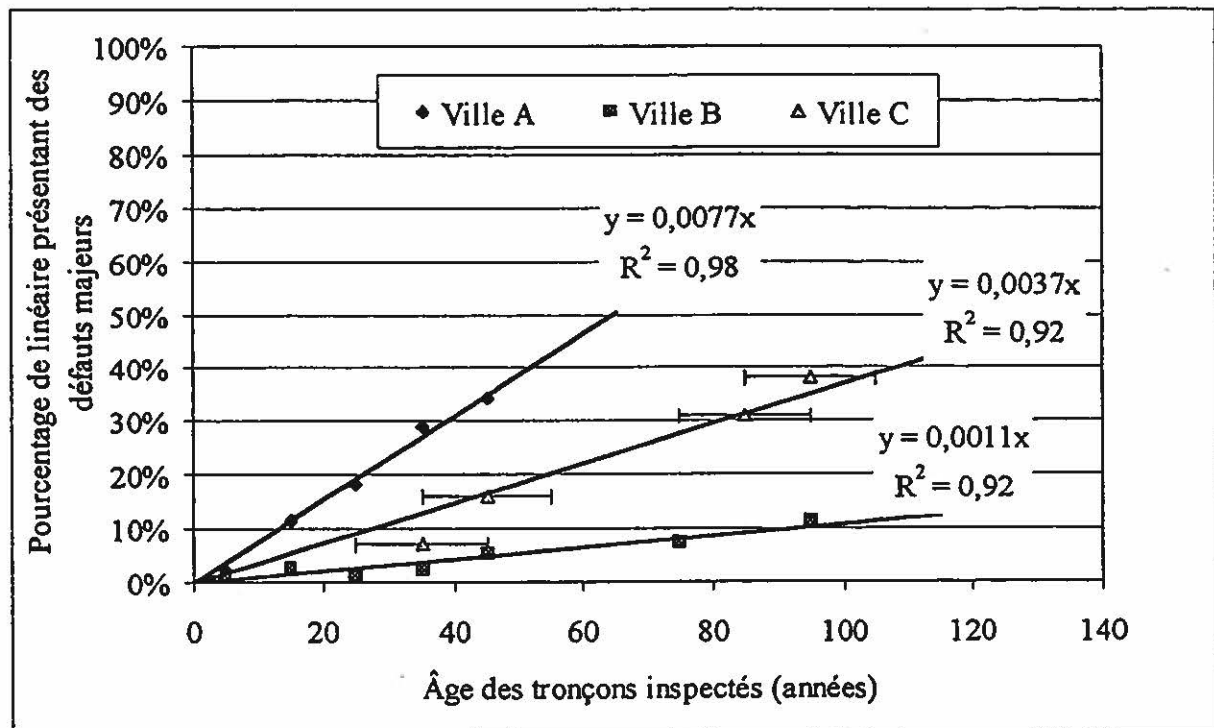


Figure 6.9 : Comparaison des relations “pourcentage de linéaire en mauvais état en fonction de l’âge des conduites” pour les villes A, B et C

Nous constatons que la ville C se situe entre les villes B et A et ce même en tenant compte de la grande incertitude associée aux âges des tronçons inspectés à la ville C. On estime que pour la ville C, 75 % des conduites seront en mauvais état lorsqu’elles auront atteint l’âge de 350 ans. Cette valeur reste encore importante mais déjà plus réaliste que celle trouvée pour la ville B. C’est pourquoi nous retiendrons comme borne inférieure du domaine de variation du paramètre λ , la valeur $\lambda = 0,0037$ estimée pour la ville C.

6.4 Conclusions

Le modèle que nous avons développé ne considère qu’un paramètre, λ , la probabilité qu’un tronçon passe de la classe “bon état” à la classe “mauvais état”. Celui-ci peut être calé à partir de l’étude de la relation “pourcentage de linéaire en mauvais état” en fonction de “l’âge des

tronçons". Nous avons vu que pour les deux municipalités-témoins avec lesquelles nous travaillons, les valeurs de λ pouvaient être très différentes. L'étude de plusieurs municipalités-témoins aurait été utile afin de déterminer des valeurs de λ plus représentatives. Par ailleurs, il serait souhaitable de disposer de données plus rigoureuses, car il semble évident que la ville B sous-estime le linéaire en mauvais état de son réseau (utilisation de la technique Aqua Zoom), comme la ville A le surestime un peu (auscultation des tronçons où existent des problèmes d'infiltration). Nous pensons néanmoins que les résultats de la ville A fournissent une image beaucoup plus réaliste que ceux de la ville B qui, à notre avis, reste un cas très marginal. Finalement, il ne nous est pas possible de donner une valeur de λ unique et nous suggérons plutôt de travailler avec une plage de valeurs dans laquelle il est probable que λ varie : $0,0037 \text{ an}^{-1}$ à $0,0140 \text{ an}^{-1}$. Cette plage de valeurs sera utilisée lors de la transposition du modèle aux autres municipalités du Québec.

7 TRANSPOSITION DU MODÈLE

L'objectif de cette étude est de prévoir les besoins en réfection des réseaux d'égout à l'échelle du Québec. Ceci demande, dans un premier temps, la transposition du modèle développé à partir des municipalités-témoins aux différentes municipalités qui ont répondu au questionnaire de l'INRS-Urbanisation. Dans un second temps, les résultats obtenus pour ces quelques municipalités devront être généralisés à l'ensemble de la province de Québec.

7.1 Méthodologie proposée

7.1.1 Transposition du modèle aux municipalités ayant répondu au questionnaire de l'INRS-Urbanisation

Nous distinguerons deux cas :

- (1) les villes ayant répondu de façon satisfaisante au questionnaire de l'INRS-Urbanisation et auxquelles on peut appliquer le modèle développé ;
- (2) les villes n'ayant pas répondu de façon satisfaisante au questionnaire de l'INRS-Urbanisation et qui ne nous ont donc pas fourni l'information minimale nécessaire pour permettre d'appliquer le modèle développé.

Pour les premières municipalités, l'analyse des réponses au questionnaire nous permettra de connaître, pour chacune d'entre elles, une des données d'entrée nécessaires au modèle : la répartition du linéaire du réseau en classes d'âges. Comme nous l'avons expliqué, les données dont nous disposons nous ont uniquement permis d'établir une fourchette de valeurs possible de λ (de $0,0037 \text{ an}^{-1}$ à $0,0140 \text{ an}^{-1}$). Afin de situer un peu plus précisément les municipalités par rapport aux municipalités-témoins, nous proposons d'exploiter les réponses au questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant le niveau d'infiltration dans le réseau. En effet, nous pouvons penser que cette information est un indice de l'état structural du réseau qui permet de supposer que le vieillissement du réseau d'assainissement d'une municipalité est plus proche de celui de la ville C (réseau qui a plutôt bien vieilli) ou de celui de la ville A (réseau qui a plutôt mal vieilli). La

question relative aux refoulements/débordements n'a pas été retenue car ce type de dysfonctionnement est plutôt lié à des problèmes de design ou d'insuffisance actuelle du réseau liée à la croissance de la ville.

La date de pose des premières conduites constitue aussi une donnée d'entrée du modèle. Nous avons fait l'hypothèse que pour les villes dont la date de fondation est antérieure à 1900, les premières conduites ont été posées vers 1900. Pour les villes dont la date de fondation est postérieure à 1900, nous avons supposé que le premier groupe de conduites a été posé dès la date de constitution de la ville. Celle-ci est obtenue à partir du Répertoire des municipalités du Québec [Québec 1994].

Nous ferons également l'hypothèse que, jusqu'à nos jours, les remplacements de conduites d'égout sont négligeables. Cette hypothèse s'appuie sur l'avis général des gestionnaires, ainsi que sur l'exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation (cf. section 8.3) qui montre qu'en moyenne, seulement 0,3 % du linéaire est remplacé chaque année pour des raisons qui ne sont pas toujours liées au mauvais état structural du réseau (dysfonctionnement hydraulique, opportunité de réfection de la chaussée, effondrement de chaussée, etc.). La mise en oeuvre du modèle nous donnera, pour ces municipalités, le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état à l'heure actuelle. L'évolution de cet état actuel selon plusieurs scénarios de remplacement sera abordée dans le chapitre suivant. Nous donnerons les résultats des simulations pour trois valeurs de λ :

- **Scénario "borne supérieure"** : tous les réseaux des villes du Québec vieillissent un peu comme celui de la ville A (réseau qui vieillit mal), le modèle sera appliqué avec un paramètre $\lambda_{\max} = 0,0140 \text{ an}^{-1}$.
- **Scénario "borne inférieure"** : tous les réseaux des villes du Québec vieillissent un peu comme celui de la ville C (réseau qui vieillit bien), le modèle sera appliqué avec un paramètre $\lambda_{\min} = 0,0037 \text{ an}^{-1}$.
- **Scénario "moyen"** : le modèle sera appliqué avec une valeur moyenne de $\lambda_{\text{moy}} = 0,0090 \text{ an}^{-1}$.

Pour les villes n'ayant pas répondu de façon satisfaisante au questionnaire de l'INRS-Urbanisation et qui n'ont finalement pas une bonne connaissance de leur réseau, nous ne pouvons appliquer le modèle à cette étape. Leur prise en compte se fera lors de la transposition des résultats à l'ensemble de la province.

7.1.2 Transposition des résultats à l'échelle de la province de Québec

Nous considérerons que les municipalités ayant répondu de façon satisfaisante au questionnaire de l'INRS-Urbanisation constituent un échantillon représentatif de l'ensemble des villes du Québec. Pour cet ensemble de municipalités, nous pouvons estimer la population représentée (à partir du Répertoire des municipalités du Québec), le linéaire total de réseau concerné (à partir du questionnaire de l'INRS-Urbanisation) et le linéaire actuel de réseau en mauvais état qui serait à réhabiliter (à partir du modèle). Nous supposerons que la proportion moyenne en mauvais état du linéaire total de ces villes est la même pour la totalité du linéaire du Québec. Le linéaire total du réseau d'égout au Québec sera estimé au prorata de la population, c'est-à-dire que nous ferons l'hypothèse que le linéaire moyen de réseau d'égout par habitant est constant. Nous supposerons également que 85 % de la population québécoise est raccordée à un réseau d'égout. En excluant la ville de Montréal, la population québécoise raccordée à un réseau d'égout est donc estimée à 5 millions d'habitants.

7.2 Résultats

7.2.1 Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant le linéaire de réseau d'égout

350 municipalités ont été interrogées et 221 ont répondu au questionnaire. Nous nous sommes dans un premier temps intéressés à la cohérence des réponses relativement aux questions suivantes :

- répartition du linéaire de réseau par classes de diamètres ;
- répartition du linéaire par classes d'âges.

La somme des linéaires pour chaque question doit être la même. On s'aperçoit ici que sur les 221 villes qui ont répondu au questionnaire :

- (1) 37 villes n'ont pas donné de réponse à ces 2 questions. Ces villes ont donc été éliminées de notre analyse.
- (2) 12 villes n'ont pas donné la répartition par âge. Ces villes ont été éliminées de notre analyse puisque le modèle ne peut être utilisé dans ce cas.
- (3) 33 villes présentent des incohérences importantes (plus de 5 % et plus de 10 km) entre les deux réponses. Ces villes ont aussi été éliminées de notre étude.
- (4) 16 villes n'ont pas donné la répartition par diamètres. Nous avons fait l'hypothèse que leurs données concernant la répartition du réseau par âge étaient justes.
- (5) 123 semblent avoir une bonne connaissance de leur réseau d'égout.

Nous avons retenu dans un premier temps un ensemble de 139 (123 + 16) villes. Une analyse plus détaillée de la liste des villes retenues nous permet de relever des cas un peu marginaux qui nous ont amenés à nous interroger sur la pertinence des réponses données par ces villes :

- (1) des villes de peu d'habitants avec un très grand linéaire de réseau (ex. : la ville K de 4 000 habitants et 190 km de réseau alors que la plupart des villes de cette taille ont entre 20 et 80 km de réseau) ;
- (2) des villes importantes avec peu de linéaire de réseau (ex. : la ville L de 5 000 habitants qui est très dense et n'a que 1 km de réseau alors que la plupart des villes de cette taille ont entre 20 et 80 km de réseau) ;
- (3) des villes dont la date de fondation est plus récente que la date de pose des premières conduites (ex. : la ville M fondée en 1976 et dont les premières conduites ont plus de 50 ans) ;
- (4) des villes dont la date de fondation est très ancienne (avant 1900) et où les premières conduites n'ont été installées qu'il y a au plus 20 ans (ex. : la ville N fondée en 1855 et dont tout le réseau date de moins de 20 ans).

Afin d'éclaircir ce type d'interrogation nous avons contacté quelques-unes de ces villes. Le Tableau 7.1 présente les réponses obtenues.

Tableau 7.1 : Exemples de villes marginales quant au linéaire de réseau d'égout par habitant

Ville	Anomalie	Réponse de la ville
L	5 000 habitants, moins de 1 km de réseau	Il y a en fait beaucoup plus de kilomètres de réseau mais on ne sait pas combien, rien n'est informatisé, des plans ont été perdus, etc.
O	11 000 habitants, 2 km de réseau	En fait, il y a 120 km de réseau dont plus de 50 % ont été posés dans les années 1960 au moment du regroupement de 6 villages.
K	4 000 habitants, 190 km de réseau	En fait, la ville ne dispose que de 30 km de réseau et rien n'a été construit avant 1950.
P	7 000 habitants, 40 km de réseau	La ville P est une ville très dense, donc le réseau est peu étendu.
Q	7 000 habitants, 3 km de réseau	Le système d'assainissement utilisé est essentiellement la fosse septique, il y a donc très peu de linéaire de réseau.
M	Fondée en 1976, possède des conduites de plus de 50 ans	Fusion d'une ville proche de la vieille ville M (plus de 100 ans).
R	Fondée en 1993, possède des conduites de plus de 50 ans	La date de constitution est la date de fusion de plusieurs villages.
N	Fondée il y a plus de 100 ans, l'âge du réseau est de moins de 20 ans	Il n'existe aucune donnée concernant le réseau d'égout de la ville, la réponse au questionnaire vient d'une déduction faite par l'ingénieur des travaux publics qui a constaté qu'aucune conduite en grès n'existait et que la plupart étaient en ciment amiante, donc dataient de moins de 20 ans.
S	40 000 habitants, 10 km de réseau	En fait, il y a environ 330 km de réseau, mais la plupart des données ont été perdues lors de l'incendie qui a eu lieu à l'hôtel de ville en 1996.

Il s'avère donc que certaines municipalités ont fourni des données incomplètes ou encore que des erreurs de saisies des réponses se sont produites. Ces cas particuliers nous permettent d'apprécier l'incertitude associée aux données utilisées. Au total, nous avons encore écarté quelques villes de l'échantillon : 133 villes ont finalement été retenues. La liste de ces villes ainsi que les caractéristiques de leur réseau d'égout sont données en annexe E1.

7.2.2 Application du modèle

Le modèle a été appliqué à cet ensemble de villes afin de déterminer dans un premier temps le pourcentage de linéaire en mauvais état en 1997. Les résultats obtenus pour chacune de ces villes et pour les trois valeurs du paramètre λ sont donnés en annexe E2. Ces résultats nous permettent de définir quatre classes de villes (Tableau 7.2) :

Tableau 7.2 : Définition de quatre classes de villes

Classe de villes	Définition
C1 : réseau très jeune	En moyenne, près de 80 % du réseau a moins de 20 ans
C2 : réseau jeune	En moyenne, près de 50 % du réseau a entre 20 et 35 ans et près de 30 % du réseau a moins de 20 ans
C3 : réseau vieux	En moyenne près de 60 % du réseau a entre 20 et 50 ans et près de 20 % du réseau a plus de 50 ans
C4 : réseau très vieux	En moyenne, près de 70 % du réseau a plus de 50 ans

Le Tableau 7.3 donne les résultats des simulations pour ces quatre classes de ville :

Tableau 7.3 : Résultats des simulations pour les 4 classes de villes définies

Classe de villes	Scénario "Borne inférieure" Pourcentage de linéaire en mauvais état avec $\lambda_{\min} = 0,0037$	Scénario "Moyen" Pourcentage de linéaire en mauvais état avec $\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$	Scénario "Borne supérieure" Pourcentage de linéaire en mauvais état avec $\lambda_{\max} = 0,0140$	Nombre de villes
C1	De 3,5 % à 10 %	De 8 % à 20 %	De 14 % à 35 %	54 villes
C2	De 10 % à 15 %	De 20 % à 35 %	De 35 % à 55 %	48 villes
C3	De 15 % à 21 %	De 35 % à 45 %	De 55 % à 75 %	24 villes
C4	De 21 % à 30 %	De 45 % à 70 %	De 75 % à 100 %	7 villes

On constate que plus les villes ont un réseau jeune, plus le pourcentage de linéaire en mauvais état est faible. La valeur de λ a une grande influence sur les résultats des villes dont le réseau est majoritairement vieux, c'est pourquoi on observe un écart important entre les résultats des scénarios "Borne supérieure" et "Borne inférieure" pour les 7 villes dont plus de 50 % du réseau ont été installés avant 1950. La difficulté est de déterminer, pour chaque ville simulée, s'il est plus vraisemblable que le pourcentage de linéaire en mauvais état de son réseau soit plus proche de la borne supérieure ($\lambda_{\max} = 0,0140$) que de la borne inférieure ($\lambda_{\min} = 0,0037$). Pour ce faire, nous avons exploité les données relatives à l'infiltration dans les réseaux d'égout provenant du questionnaire de l'INRS-Urbanisation.

7.2.3 Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant l'infiltration

Nous avons compilé les réponses relatives à l'infiltration pour les 133 villes retenues. Celles-ci consistaient en une note de 1 à 4 (1 : infiltration intolérable, 2 : infiltration tolérable, 3 : infiltration négligeable, 4 : ne sait pas ou non répondu). Cette note était disponible pour chaque type de

réseau (sanitaire, pluvial, combiné), pour chaque classe d'âges (moins de 20 ans, entre 21 et 35 ans, entre 36 et 51 ans, plus de 50 ans) et pour chaque classe de diamètres (inconnu, petit, moyen grand, très grand). Comme indiqué dans le rapport de l'INRS-Urbanisation, on s'aperçoit que les notes d'infiltration sont principalement fonction de l'âge du réseau, c'est-à-dire qu'elles ne diffèrent généralement pas selon le diamètre pour une même classe d'âge. Cette observation nous a permis d'affecter une note d'infiltration globale au réseau d'égout de chaque ville étudiée, au prorata du linéaire de réseau de chaque classe d'âges. Ainsi, si une ville a une note 1 pour quelques kilomètres de son réseau et une note 3 pour le reste, on peut dire qu'en moyenne cette ville n'a pas d'importants problèmes d'infiltration (note globale de 3). Les résultats de cette compilation sont donnés en annexe E3. Le Tableau 7.4 indique le nombre de villes recensées pour chaque note d'infiltration.

Tableau 7.4 : Nombre de villes recensées pour chaque note d'infiltration

Note globale d'infiltration	Nombre de villes concernées
1 : infiltration jugée intolérable dans l'ensemble	4
2 : infiltration jugée tolérable dans l'ensemble	33
3 : infiltration jugée négligeable dans l'ensemble	78 (dont la ville B)
4 : information inconnue	18

On remarque que la ville B se trouve dans la classe des villes où les problèmes d'infiltration sont jugés négligeables, ce qui va dans le sens de ce que les données décrites précédemment nous indiquaient (réseau vieux qui semble avoir bien vieilli).

Ce type d'information peut nous aider à estimer l'état actuel du réseau d'égout des municipalités. Nous pensons cependant qu'il faut l'utiliser avec précaution. D'une part les notions de "tolérable" et "intolérable" restent très subjectives et dépendent fortement du gestionnaire de réseau. D'autre part, une ville dont le taux d'infiltration est jugé négligeable peut correspondre :

- (1) à un réseau jeune ou très jeune qui n'a pas eu le temps de vieillir. Dans ce cas, il est difficile de dire que le paramètre $\lambda_{\min}$ ou $\lambda_{\max}$ est mieux adapté.
- (2) à un réseau vieux ou très vieux qui a très bien vieilli. Dans ce cas, il est probable que le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état de cette ville soit plus proche de la borne inférieure.

De même, un réseau dont l'infiltration est jugée intolérable peut correspondre :

- (3) à un réseau vieux ou très vieux qui a mal vieilli. Dans ce cas, il est probable que le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état de cette ville soit plus proche de la borne supérieure.
- (4) à un réseau jeune ou très jeune qui est déjà en mauvais état (problèmes de pose, facteurs de risques particuliers, etc.).

Le Tableau 7.5 résume les différents cas que l'on peut rencontrer. Ces données nous permettent de tirer des informations complémentaires uniquement pour les villes dont le réseau est à peu près réparti par classes d'âge comme celui des villes A (réseau né il y a plus de 50 ans et qui a mal vieilli), B ou C (réseau né il y a plus de 50 ans et qui a bien vieilli), soit pour environ 12 municipalités. Ainsi, pour la majorité des municipalités, **les données relatives à l'infiltration ne sont pas exploitables**, car il est difficile de tirer des conclusions chiffrables quant à la valeur du paramètre λ qu'il serait plus réaliste d'appliquer. La fourchette de valeurs $0,0037 \text{ an}^{-1}$ à $0,0140 \text{ an}^{-1}$ reste l'information la plus précise que l'on peut donner.

Tableau 7.5 : Synthèse des résultats concernant l'infiltration

Type de réseau	Taux d'infiltration	Nombre de villes
Réseau très jeune	Intolérable (I=1)	1
Réseau très jeune	Tolérable ou méconnue (I=2 ou 4)	14 (I=2) 5 (I=4)
Réseau très jeune	Négligeable (I=3)	34
Réseau jeune	Intolérable (I=1)	3
Réseau jeune	Tolérable ou méconnue (I=2 ou 4)	6 (I=2) 10 (I=4)
Réseau jeune	Négligeable (I=3)	29
Réseau vieux	Intolérable (I=1)	0
Réseau vieux	Tolérable ou méconnue (I=2 ou 4)	9 (I=2) 3 (I=4)
Réseau vieux	Négligeable (I=3)	12
Réseau très vieux	Intolérable (I=1)	0
Réseau très vieux	Tolérable ou méconnue (I=2 ou 4)	7 (I=2)
Réseau très vieux	Négligeable (I=3)	0

7.2.4 Transposition à l'échelle du Québec

Nous pouvons constater sur la Figure 7.1 que pour la grande majorité des villes retenues qui ont moins de 100 000 habitants, l'hypothèse d'un linéaire moyen constant de réseau d'égout par habitant raccordé est une approximation très acceptable.

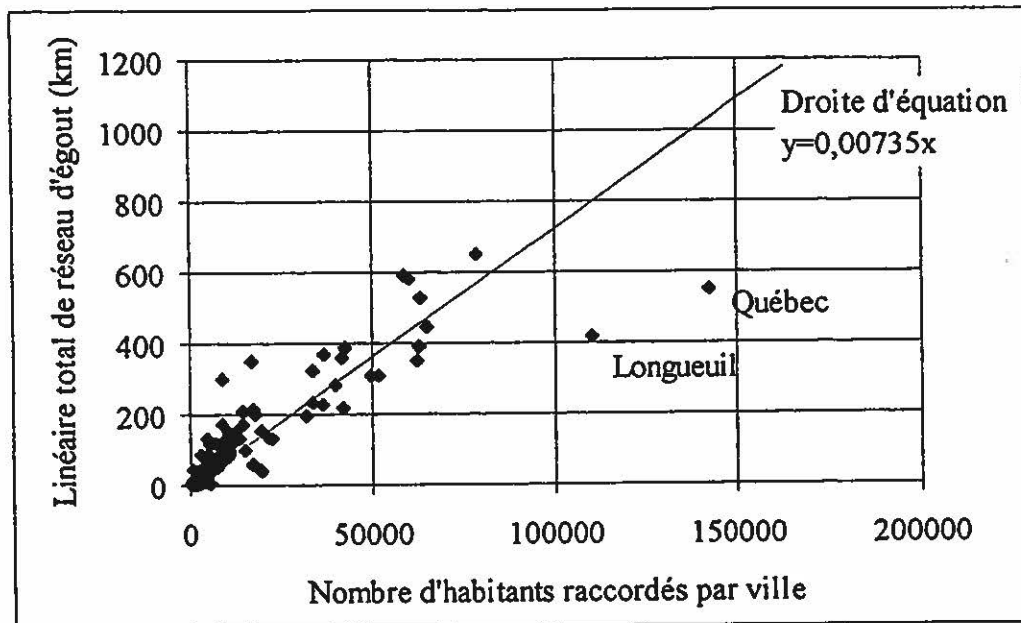


Figure 7.1 : Relation entre le nombre d'habitants raccordés (considérant un taux de raccordement de 85 %) et le linéaire de réseau d'égout pour 133 villes du Québec

Pour les villes de plus de 100 000 habitants, cette hypothèse tendra à surestimer le linéaire. Ceci s'explique par le fait que ces villes sont généralement plus denses, sans pour autant être plus étendues. Ces villes n'étant pas majoritaires au Québec, l'erreur commise en moyenne à l'échelle de la province sera faible. Le linéaire moyen par habitant raccordé est donc estimé à 7,35 m (pente de la droite représentée sur la Figure 7.1). Les simulations lancées dans un premier temps sur les 133 villes retenues peuvent donc être généralisées à l'ensemble de la province de Québec. Les résultats sont donnés au Tableau 7.6.

Tableau 7.6 : Transposition des résultats à l'échelle de la province de Québec

	Pour les 133 villes étudiées	Pour la province de Québec (excluant Montréal)
Population totale concernée	2 310 421 habitants dont 85 % sont raccordés	5 000 000 habitants
Linéaire total de réseau	14 434 km de réseau, soit 7,35 m par habitant raccordé	36 500 km de réseau
Pourcentage de linéaire total en mauvais état en 1997 ($\lambda_{\min} = 0,0037$)	13 % soit environ 1 900 km	13 % soit environ 4 700 km
Pourcentage de linéaire total en mauvais état en 1997 ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	30 % soit environ 4 300 km	30 % soit environ 11 000 km
Pourcentage de linéaire total en mauvais état en 1997 ($\lambda_{\max} = 0,00140$)	48 % soit environ 6 900 km	48 % soit environ 17 500 km

On évalue donc qu'en moyenne environ 30 % $\pm$ 15 % du linéaire de réseau d'égout québécois serait actuellement en mauvais état et nécessiterait un programme de réhabilitation.

7.3 Conclusion

Pour les villes qui ont une connaissance suffisamment bonne de leur réseau, le modèle développé a été appliqué avec une valeur supérieure ($0,0140 \text{ an}^{-1}$), inférieure ($0,0037 \text{ an}^{-1}$) et moyenne ($0,0090 \text{ an}^{-1}$) du paramètre λ . Cette modélisation a permis, dans un premier temps, d'établir pour chacune des 133 municipalités retenues, une plage de valeurs dans laquelle il est probable que se situe le pourcentage du linéaire de réseau en mauvais état à l'heure actuelle. Dans la majorité des cas, l'exploitation des données relatives à l'infiltration ne nous permet pas de conclure que le

comportement est mieux décrit par la valeur inférieure ou supérieure du paramètre. Les résultats obtenus pour l'ensemble de ces villes nous ont permis d'estimer le linéaire actuel total en mauvais état à l'échelle de la province de Québec. Travailler avec seulement deux municipalités-témoins nous permet de déterminer une fourchette de valeurs possibles du linéaire de réseau québécois en mauvais état. Il semblerait qu'à l'heure actuelle, le linéaire de réseau en mauvais état soit de l'ordre de $30 \% \pm 15 \%$. Dans le chapitre suivant, nous allons estimer l'évolution future de ce linéaire total en mauvais état en fonction de plusieurs scénarios de remplacement.

8 SCÉNARIOS DE REMPLACEMENT

Jusqu'à ce jour, la méconnaissance de l'état des réseaux d'égout a fait en sorte que les gestionnaires décident des programmes de réhabilitation en fonction de critères qui ne sont pas directement liés à la dégradation structurale du réseau à proprement parler. Les raisons qui justifient un remplacement sont la réfection d'une rue, l'insuffisance hydraulique du réseau ou encore des problèmes de refoulement. Ainsi, les interventions sur les réseaux d'égout directement causées par la dégradation structurale sont généralement jugées négligeables. Pourtant, même si dans l'état actuel des connaissances il est difficile de donner la durée de vie précise d'un réseau d'assainissement, le seuil des 100 ans est le plus souvent retenu [Weil 1990 ; Thomson 1991 ; Zimmerman et Martin 1993]. Par ailleurs, pour reprendre l'opinion de l'"American Water Association" [INRS-Urbanisation 1997], aucune conduite ne durerait plus de 200 ans. Il paraît donc important de commencer à considérer la réhabilitation des vieux réseaux d'égout si on ne veut pas tendre dans le futur vers une dégradation généralisée des réseaux.

Face à l'apparition d'un défaut majeur sur un tronçon, la décision du gestionnaire de réseau peut être la réparation locale du tronçon ou le remplacement complet du tronçon présentant un défaut. Tel qu'expliqué dans l'introduction, nous ne nous intéressons, dans le cadre de cette étude, qu'au remplacement des tronçons en mauvais état. Pour simuler l'évolution du linéaire de réseau d'égout en mauvais état jusqu'à l'heure actuelle (cf. Chapitre 7), nous avons fait l'hypothèse que dans les pratiques passées, les remplacements de tronçons étaient négligeables. Pour simuler l'évolution dans les 20 prochaines années de l'état structural du réseau d'égout de la province de Québec, nous allons considérer plusieurs scénarios de remplacement annuel afin d'évaluer l'impact de chacun de ceux-ci sur l'état structural global du réseau.

8.1 Scénarios de remplacement simulés

Compte tenu de la faible croissance actuelle des villes québécoises, nous ferons l'hypothèse que la croissance des villes sera nulle dans les 20 prochaines années, c'est-à-dire qu'aucune nouvelle conduite d'égout ne sera posée. Le linéaire total de réseau restera donc le même que celui évalué à l'heure actuelle. Nous proposons de simuler l'évolution jusqu'en 2020 du pourcentage en mauvais état du linéaire total de réseau d'égout de la province de Québec en fonction des divers scénarios de remplacement annuel suivant :

- (1) taux de remplacement annuel nul ;
- (2) taux de remplacement annuel permettant de maintenir le réseau dans l'état actuel ;
- (3) taux de remplacement annuel permettant d'améliorer à long terme l'état du réseau par rapport à la situation actuelle (par exemple, amélioration de 50 % de l'état du réseau dans 20 ans) ;
- (3) taux de remplacement annuel permettant d'améliorer à court terme l'état du réseau par rapport à la situation actuelle (par exemple, amélioration de plus de 50 % de l'état du réseau dans 20 ans).

Nous avons fait l'hypothèse que les tronçons remplacés étaient choisis dans le stock des tronçons en mauvais état. Comme souligné dans l'introduction de ce chapitre, cette hypothèse ne correspond pas forcément à la réalité où on s'aperçoit souvent que le choix des tronçons à remplacer est conditionné par les travaux de voirie ou par d'autres facteurs relatifs à des dysfonctionnements hydrauliques du réseau.

8.2 Résultats des simulations

Le modèle est d'abord appliqué aux villes A et C (municipalités dont les résultats nous semblent plus réalistes) puis aux 133 villes retenues. Les résultats sont ensuite étendus à l'ensemble du Québec par la stratégie de transposition décrite à la section 7.2. Les résultats complets sont présentés en annexe E4.

8.2.1 Résultats des simulations pour la ville A

Les différents scénarios simulés sont présentés au Tableau 8.1.

Tableau 8.1 : Différents scénarios de remplacement simulés pour la ville A

Scénario (avec $\lambda = 0,0077 \text{ an}^{-1}$)	Taux de remplacement annuel correspondant
S1 : Aucun travail de remplacement n'est entrepris	0 %
S2 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour maintenir le réseau dans son état actuel	0,6 %
S3 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à long terme l'état du réseau	1 %
S4 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à court terme l'état du réseau	1,5 %

La Figure 8.1 présente les résultats obtenus pour la ville A.

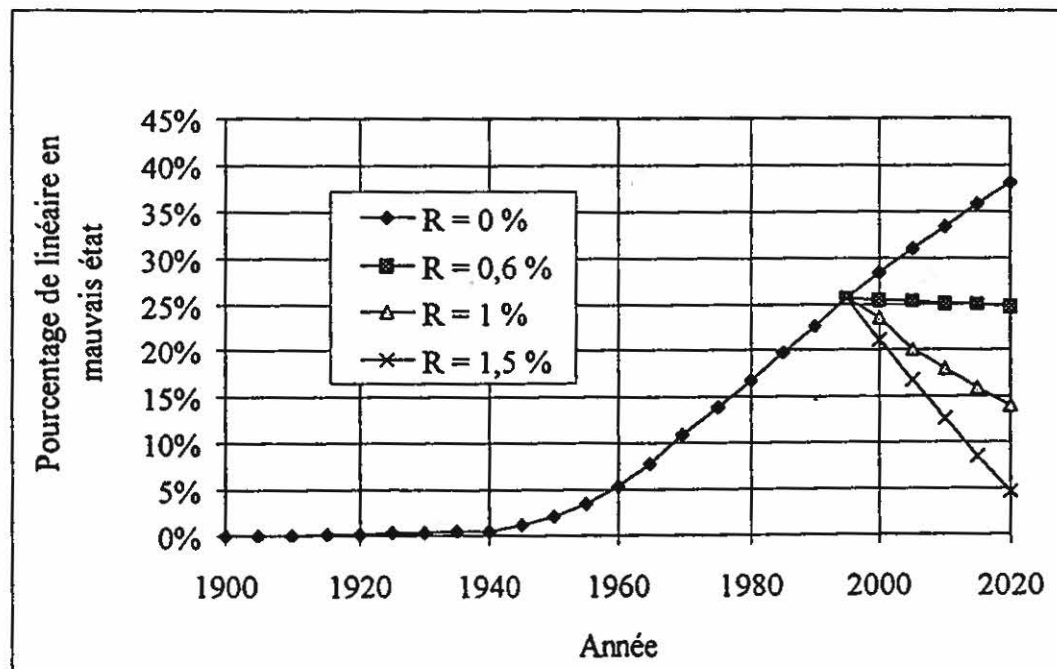


Figure 8.1 : Résultats obtenus pour la ville A selon différents scénarios de remplacement ($\lambda = 0,0077 \text{ an}^{-1}$)

On constate donc que, si aucune mesure n'est prise pour remplacer le linéaire de réseau en mauvais état, celui-ci va continuer à augmenter dans les prochaines années et passera de 26 % à 38 % en 2020. Un taux de remplacement annuel de l'ordre de 0,6 % serait nécessaire pour maintenir le réseau dans son état actuel. Appliquer un taux de remplacement annuel de 1 % permettrait de diviser par deux le pourcentage de linéaire de réseau d'égout en mauvais état. Enfin, appliquer un taux de remplacement annuel de 1,5 % permettrait de diminuer d'un facteur six le pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état dans les vingt prochaines années.

Le choix d'un scénario de remplacement va, bien entendu, dépendre du pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état considéré comme acceptable. En fait, la définition d'un tel seuil est difficile, car la réhabilitation d'une portion de réseau ne se fait généralement pas uniquement en fonction de son état structural. Des considérations hydrauliques, environnementales ou encore l'opportunité de travaux sur la chaussée, constituent aujourd'hui les principaux critères de décision. Généralement, cette appréciation est très subjective et est laissée à chaque gestionnaire de réseau qui définit la situation acceptable pour son réseau et le service "assainissement" qu'il doit assurer. Si on considère par exemple que 30 % de linéaire de réseau en mauvais état constitue le seuil acceptable, il paraît alors nécessaire d'envisager un programme de remplacement d'une partie du linéaire de réseau d'égout en mauvais état, afin de ne pas passer dans les 20 prochaines années d'une situation encore acceptable à une situation inacceptable.

8.2.2 Résultats des simulations pour la ville C

Les données d'entrée au modèle ont été estimées à partir des données fournies par la ville (cf. Tableau 8.2). Nous avons fait l'hypothèse que le premier groupe de conduites avait été posé en 1850.

Tableau 8.2 : Caractéristiques du réseau de la ville C

Année	Classe d'âges	Linéaire
T1 : 1900 - 1945	> 50 ans	1250 km
T2 : 1945 - 1960	entre 50 ans et 35 ans	598 km
T3 : 1960 - 1975	entre 35 ans et 20 ans	282 km
T4 : 1975 - 1997	moins de 20 ans	270 km
TOTAL		2 400 km

Les différents scénarios simulés sont présentés au Tableau 8.3.

Tableau 8.3 : Différents scénarios de remplacement simulés pour la ville C

Scénario (avec $\lambda = 0,0037 \text{ an}^{-1}$)	Taux de remplacement annuel correspondant
S1 : Aucun travail de remplacement n'est entrepris	0 %
S2 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour maintenir le réseau dans son état actuel	0,3 %
S3 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à long terme l'état du réseau	0,8 %
S4 : Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à court terme l'état du réseau	1,5 %

La Figure 8.2 présente les résultats obtenus pour la ville C.

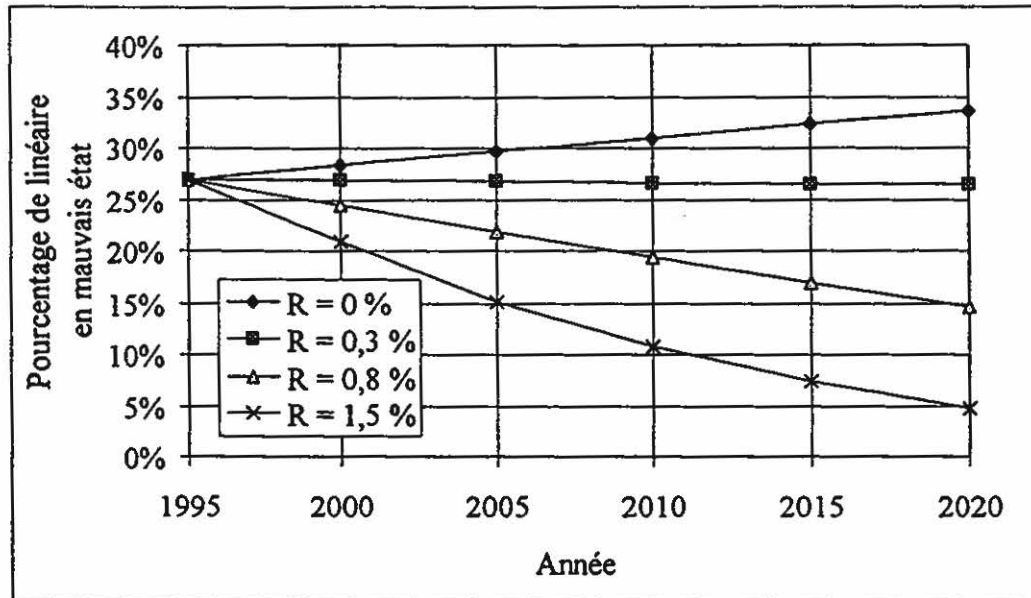


Figure 8.2 : Résultats obtenus pour la ville C selon différents scénarios de remplacement ($\lambda = 0,0037 \text{ an}^{-1}$)

On constate donc que si aucune mesure n'est prise pour remplacer le linéaire de réseau en mauvais état, celui-ci va continuer à augmenter dans les prochaines années et passera de 27 % à 34 % en 2020. Un taux de remplacement annuel de l'ordre de 0,3 % serait nécessaire pour maintenir le réseau dans son état actuel. Appliquer un taux de remplacement annuel de 0,8 % permettrait de diviser par deux le pourcentage de linéaire de réseau d'égout en mauvais état. Enfin, appliquer un taux de remplacement annuel de 1,5 % permettrait d'améliorer sensiblement l'état du réseau dans les vingt prochaines années.

8.2.3 Résultats obtenus à l'échelle du Québec

Le modèle a d'abord été appliqué aux 133 villes retenues. Les résultats ont été extrapolés à l'ensemble de la province de Québec comme décrit à la section 7.2. Nous avons donc considéré que les pourcentages de linéaire en mauvais état obtenus pour l'ensemble des 133 villes, selon les scénarios simulés, étaient les mêmes pour l'ensemble du linéaire québécois (cf. Tableau 7.6). Les différents scénarios de remplacement simulés sont présentés au Tableau 8.4.

Tableau 8.4 : Différents scénarios de remplacement simulés pour les 133 villes retenues

Scénarios	Scénario "Borne supérieure" ($\lambda_{\max} = 0,0140$)	Scénario moyen ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	Scénario "Borne inférieure" ($\lambda_{\min} = 0,0037$)
S1 Aucun travail de remplacement n'est entrepris	Taux de remplacement annuel nul	Taux de remplacement annuel nul	Taux de remplacement annuel nul
S2 Des travaux de remplacement sont entrepris pour maintenir le réseau dans son état actuel	Taux de remplacement annuel de 0,75 %	Taux de remplacement annuel de 0,6 %	Taux de remplacement annuel de 0,3 %
S3 Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à long terme l'état du réseau	Taux de remplacement annuel de 1,5 %	Taux de remplacement annuel de 1 %	Taux de remplacement annuel de 0,5 %
S4 Des travaux de remplacement sont entrepris pour améliorer à court terme l'état du réseau	Taux de remplacement annuel de 2 %	Taux de remplacement annuel de 1,5 %	Taux de remplacement annuel de 1 %

Le Tableau 8.5 présente l'évolution du pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état selon les différents scénarios de remplacement et vieillissement simulés.

Tableau 8.5 : Pourcentage de linéaire de réseau en mauvais état pour les 133 villes retenues selon les scénarios de vieillissement et de remplacement simulés

Scénario de remplacement	Scénario de vieillissement du réseau	1995	2000	2010	2020
S1	Scénario "Borne supérieure" ($\lambda_{\max} = 0,0140$)	48 % 20 900 km	53 % 23 200 km	63 % 27 400 km	72 % 31 300 km
	Scénario moyen ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	31 % 13 500 km	35 % 15 100 km	42 % 18 400 km	49 % 21 500 km
	Scénario "Borne inférieure" ($\lambda_{\min} = 0,0037$)	13 % 5 500 km	14 % 6 300 km	18 % 7 900 km	21 % 9 400 km
S2	Scénario "Borne supérieure" ($\lambda_{\max} = 0,0140$)	48 % 20 900 km	49 % 21 300 km	50 % 21 900 km	51 % 22 500 km
	Scénario moyen ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	31 % 13 500 km	31 % 13 400 km	30 % 13 200 km	30 % 13 100 km
	Scénario "Borne inférieure" ($\lambda_{\min} = 0,0037$)	13 % 5 500 km	13 % 5 600 km	13 % 5 700 km	13 % 5 800 km
S3	Scénario "Borne supérieure" ($\lambda_{\max} = 0,0140$)	48 % 20 900 km	42 % 18 600 km	33 % 14 500 km	25 % 10 700 km
	Scénario moyen ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	31 % 13 500 km	27 % 11 600 km	20 % 8 600 km	14 % 6 100 km
	Scénario "Borne inférieure" ($\lambda_{\min} = 0,0037$)	13 % 5 500 km	11 % 4 900 km	9 % 3 800 km	7 % 2 900 km
S4	Scénario "Borne supérieure" ($\lambda_{\max} = 0,0140$)	48 % 20 900 km	36 % 15 600 km	15 % 6 800 km	9 % 3 900 km
	Scénario moyen ($\lambda_{\text{moy}} = 0,0090$)	31 % 13 500 km	20 % 8 600 km	6 % 2 700 km	5 % 2 300 km
	Scénario "Borne inférieure" ($\lambda_{\min} = 0,0037$)	13 % 5 500 km	6 % 2 700 km	2 % 900 km	2 % 900 km

Les Figures 8.3, 8.4 et 8.5 synthétisent les résultats obtenus pour l'ensemble du Québec.

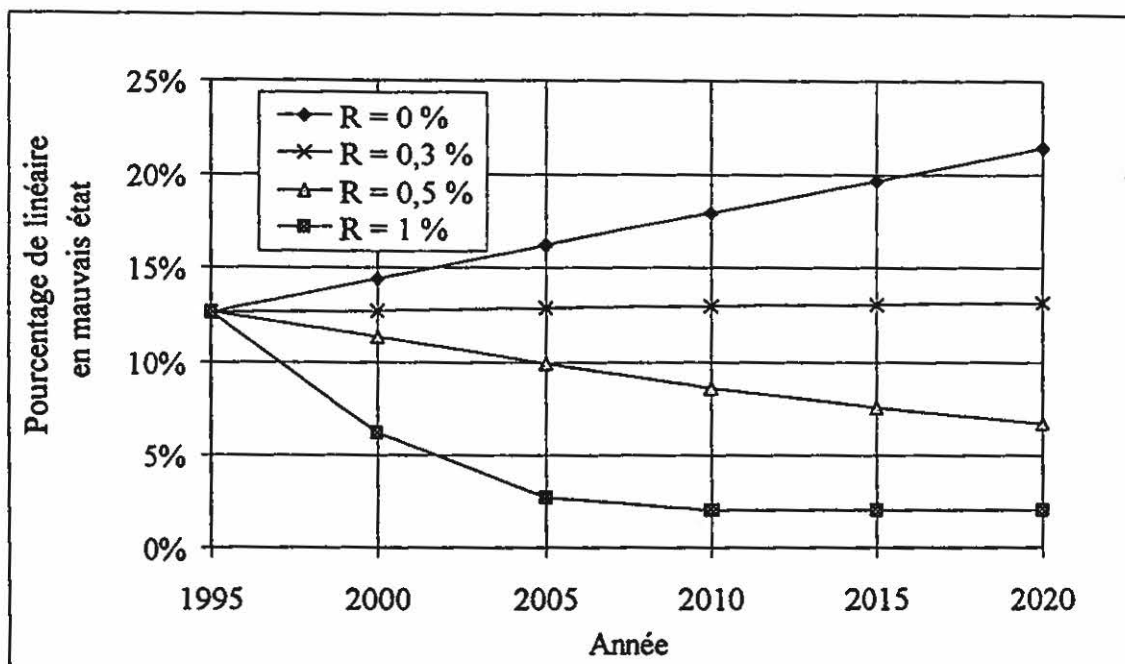


Figure 8.3 : Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario "Borne inférieure" ($\lambda = 0,0037 \text{ an}^{-1}$)

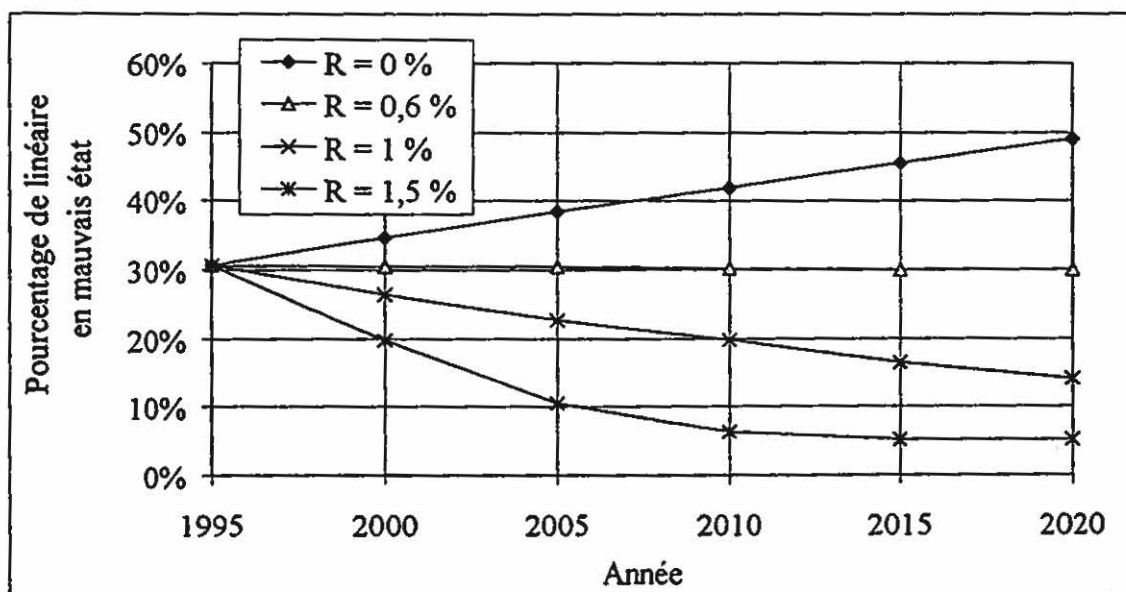


Figure 8.4 : Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario moyen ($\lambda = 0,0090 \text{ an}^{-1}$)

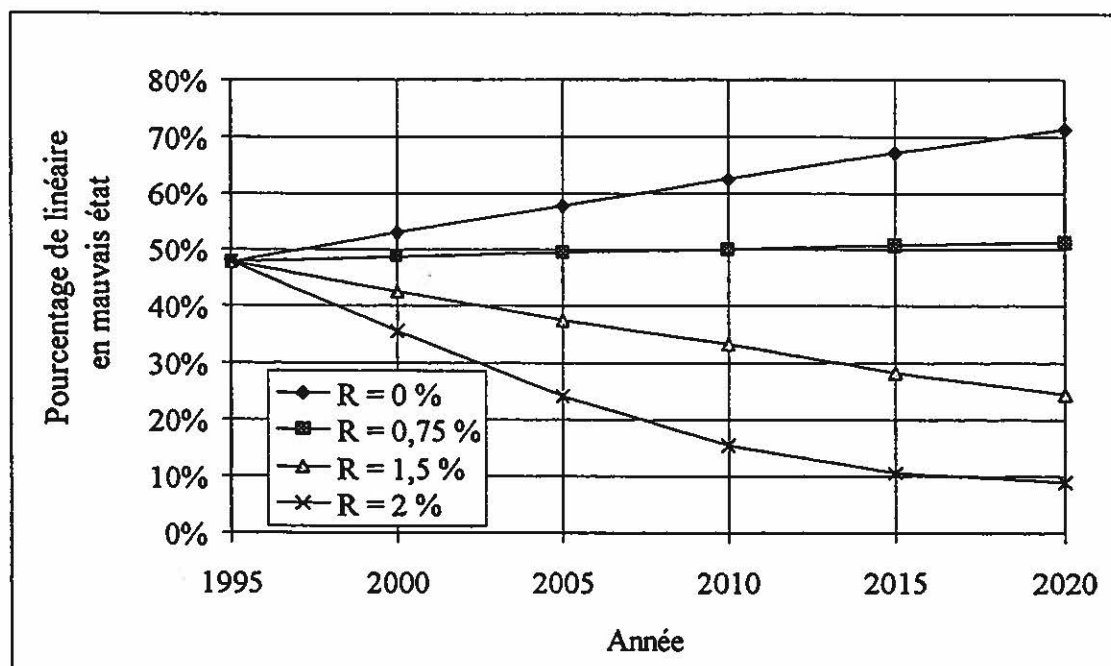


Figure 8.5 : Résultats obtenus à l'échelle du Québec pour le scénario "Borne supérieure" ($\lambda = 0,0140 \text{ an}^{-1}$)

Comme nous l'avons déjà souligné, travailler avec seulement deux municipalités-témoins ne nous permet de déterminer qu'une fourchette de valeurs probables du linéaire de réseau québécois en mauvais état. Dans le cas du scénario "Borne supérieure", c'est-à-dire le cas où les réseaux des municipalités du Québec vieillissent mal, un peu comme la partie de réseau auscultée de la ville A, le pourcentage de linéaire en mauvais état, qui serait aujourd'hui de l'ordre de 50 %, atteindrait environ 70 % d'ici une vingtaine d'années si aucun remplacement du linéaire en mauvais état n'est entrepris. Dans le cas du scénario "Borne inférieure", c'est-à-dire le cas où les réseaux des municipalités du Québec vieillissent bien, un peu comme celui de la ville C, le pourcentage de linéaire en mauvais état, qui serait aujourd'hui de l'ordre de 13 %, atteindrait environ 22 % d'ici une vingtaine d'années si aucun remplacement du linéaire en mauvais état n'est entrepris. Comme il est peu probable que les réseaux des municipalités du Québec vieillissent tous selon le scénario "Borne inférieure" ou "Borne supérieure", nous retiendrons les résultats du scénario moyen. En moyenne, le pourcentage de linéaire en mauvais état, qui serait aujourd'hui de l'ordre de 30 % $\pm$

15 %, atteindrait environ $50 \% \pm 20 \%$ d'ici une vingtaine d'années si aucun remplacement du linéaire en mauvais état n'est entrepris.

Selon les scénarios, adopter un taux de remplacement annuel d'environ 0,3 % à 0,8 %, soit remplacer chaque année 130 à 350 km au Québec, permettrait de maintenir la situation actuelle. En moyenne, le taux de remplacement annuel nécessaire au maintien de la situation actuelle serait d'environ 0,6 %, soit environ 260 km par an. Quel que soit le scénario de vieillissement simulé, il apparaît que renouveler 1 % à 1,5 % du réseau en mauvais état chaque année, soit environ 440 km à 660 km par an pour la province, permettrait d'améliorer très sensiblement l'état structural du linéaire québécois dans les 20 prochaines années. Il est intéressant de comparer les chiffres obtenus avec les informations qu'ont données les municipalités au sujet du remplacement de leurs conduites de réseau d'égout. Nous avons donc compilé les réponses du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant la longueur totale de conduites remplacées ou remises à neuf durant ces dernières années.

8.3 Exploitation du questionnaire de l'INRS-Urbanisation concernant les travaux de remplacement des conduites d'égout effectués ces dernières années

Nous avons exploité les réponses aux questions suivantes :

- (1) linéaire total de réseau remplacé en moyenne chaque année sans tenir compte des années 1994 à 1996, où le programme TICQ a pu permettre une augmentation des travaux ;
- (2) linéaire total de réseau à remplacer idéalement chaque année ;
- (3) linéaire total de réseau remplacé et/ou remis à neuf durant les années 1994, 1995, et 1996 (programme TICQ).

8.3.1 Taux de remplacement annuel moyen

Parmi les 133 villes retenues, 67 villes ont répondu à cette question et ont fourni un linéaire moyen de réseau d'égout remplacé (hors programme particulier). Il est important de remarquer que ce taux de remplacement annuel moyen de linéaire de réseau d'égout peut concerner aussi bien des travaux entrepris suite à la constatation effective d'une dégradation structurale des conduites que des travaux entrepris suite à la constatation d'une défaillance hydraulique du réseau ou de l'opportunité de réfection de la chaussée. Il est donc difficile d'apprécier la part du taux de remplacement uniquement liée à la dégradation structurale des réseaux.

Nous ferons l'hypothèse que les 67 villes étudiées sont représentatives de l'ensemble des villes du Québec. Dans l'idéal, le taux de remplacement annuel moyen obtenu devrait être supérieur à celui strictement nécessaire à la réhabilitation structurale du linéaire de réseau d'égout québécois. On évalue que plus de la moitié des municipalités étudiées ont appliqué des taux de remplacement annuel nul ou inférieur à 0,25 % durant ces dernières années (cf. Figure 8.6).

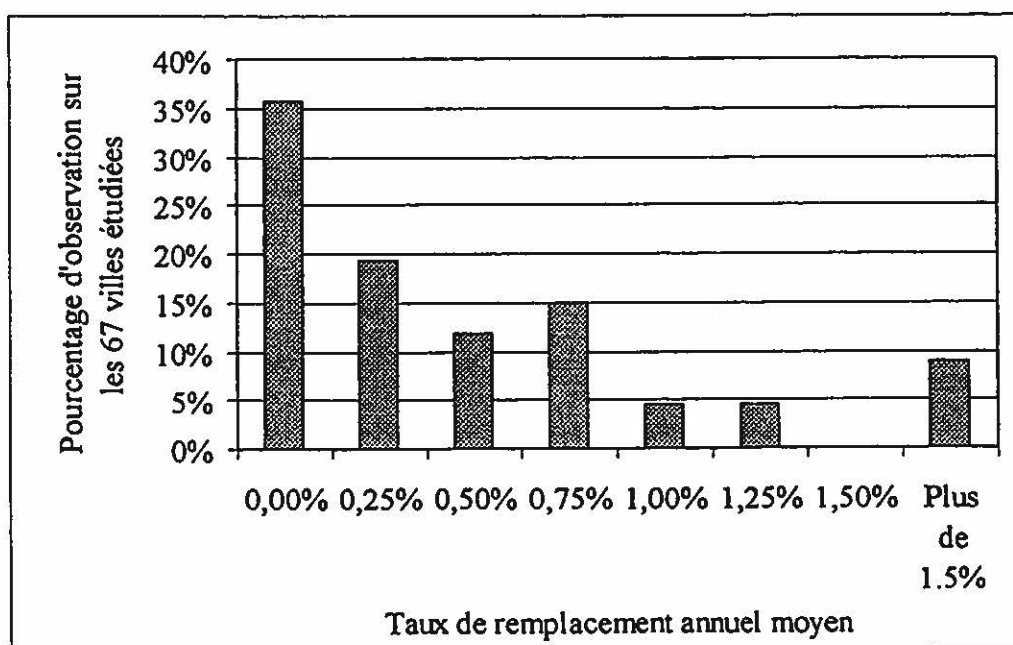


Figure 8.6 : Taux de remplacement annuel moyen

Parmi l'autre moitié des municipalités, certaines montrent des taux de remplacement annuel moyen très important (plus de 5 %). Ce sont généralement de petites municipalités avec un faible linéaire de réseau

À l'échelle de ces 67 villes, nous pouvons évaluer un taux annuel de remplacement moyen de 0,3 % (environ 25 km remplacés sur une longueur totale de 8 000 km de réseau) durant ces dernières années (excluant les années où des programmes spécifiques ont permis d'augmenter le volume des travaux). Ainsi, si nous considérons l'ensemble des 67 villes étudiées comme représentatives de l'ensemble des municipalités québécoises, on peut observer que tout critère confondu (mauvais état structural, insuffisance hydraulique, opportunité d'accéder au réseau, etc.), le taux moyen annuel de remplacement à l'échelle québécoise est inférieur au taux de remplacement nécessaire pour compenser le vieillissement des structures. De plus, compte tenu des pratiques actuelles de remplacement des tronçons, nous savons que ce ne sont pas toujours les tronçons en mauvais état qui sont remplacés. Il paraît donc nécessaire, si on ne veut pas aggraver l'état structural global du réseau québécois dans les années à venir, de prévoir un programme de remplacement plus important des conduites en mauvais état. Ceci nécessite bien entendu de déterminer concrètement quelle partie du réseau québécois est concernée, c'est-à-dire de favoriser les programmes d'inspection des réseaux d'égout. Sur les 133 villes retenues pour cette étude, 39 villes ont répondu à la question leur demandant quel serait le taux de remplacement annuel idéal pour que le réseau soit dans un état jugé satisfaisant. On estime qu'en moyenne, ce taux serait d'environ 1,5 %. Ceci montre donc qu'il semble y avoir une prise de conscience des gestionnaires quant aux besoins importants de remplacement des conduites de leur réseau d'égout.

8.3.2 Taux de remplacement annuel moyen durant le programme TICQ (1994 à 1996)

Parmi les 133 villes retenues, 93 villes ont répondu au questionnaire et ont fourni un linéaire de réseau d'égout remplacé durant les trois années du programme TICQ. On évalue que plus de la moitié des municipalités étudiées ont eu un programme de remplacement supérieur à 0,5 % par

an durant ces trois dernières années. A l'échelle de ces 93 villes, nous pouvons évaluer un taux annuel global de remplacement de 0,5 % (environ 145 km remplacés sur une longueur totale de 10 350 km de réseau) durant les 3 dernières années.

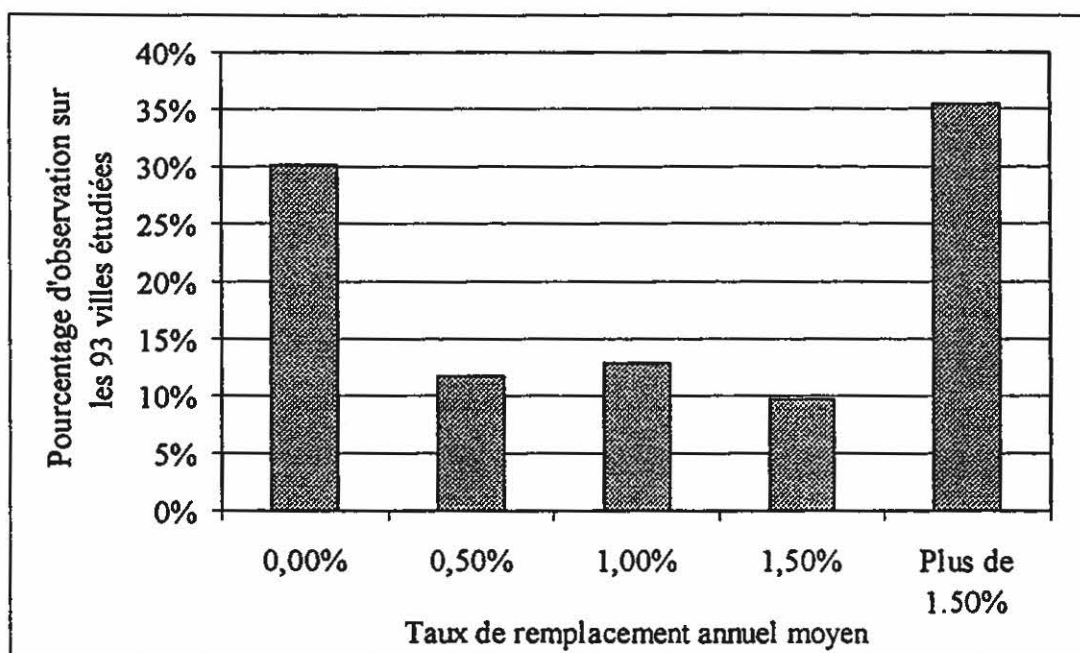


Figure 8.7 : Taux de remplacement annuel moyen pendant le programme TICQ

Parmi ces municipalités, certaines montrent des taux de renouvellement annuel moyen très importants (plus de 10 %). Ces villes ont généralement de très faibles linéaires de réseau (moins de 20 km). Nous avons contacté quelques-unes de ces villes pour comprendre les motivations de ces importants travaux.

Tableau 8.6 : Contexte des travaux de remplacement de conduites d'égout pendant le programme TICQ pour quelques villes du Québec

Municipalité	Taux de remplacement annuel durant les années 1994 à 1996	Contexte de l'intervention
T	33 % (de 21 km de réseau)	Projet pilote de mise en place d'un réseau d'assainissement sous vide.
U	20 % (de 6 km de réseau)	Nécessité de réhabiliter la chaussée au-dessus.
V	66 % (de 3 km de réseau)	Vieux réseau très endommagé qui a été changé.
W	20 % (5 km de réseau)	Travaux de remplacement des vieilles conduites.
X	60 % (2,5 km de réseau)	Remplacement des vieilles conduites en grès en très mauvais état.

On constate, tout au moins pour ces quelques municipalités, que certains grands travaux ont été consacrés au remplacement de vieilles conduites en mauvais état. Cependant, il apparaît que même dans le cadre de projets comme le TICQ, le taux annuel moyen de remplacement à l'échelle québécoise pour tout critère confondu (mauvais état structural, insuffisance hydraulique, opportunité d'accéder au réseau, etc.) est encore inférieur à celui nécessaire pour compenser le vieillissement des structures.

8.4 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre plusieurs scénarios de remplacement des conduites en mauvais état du réseau québécois. L'objectif était de montrer l'évolution du linéaire de réseau en mauvais état selon les différents scénarios de remplacement moyen retenus. Compte tenu des données dont nous disposions, nous avons travaillé tout au long de cette étude avec un scénario de vieillissement "supérieur", "inférieur" et "moyen". Cependant, la probabilité que les réseaux

d'égout des municipalités du Québec vieillissent tous selon le scénario "Borne inférieure" ou le scénario "Borne supérieure" est faible. Dans l'état actuel des connaissances, nous pensons que le scénario moyen donne une très bonne estimation de l'état structural du réseau à l'échelle de la province de Québec. Pour ce scénario de vieillissement, on estime à 75 % la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état lorsque qu'il atteint l'âge de 150 ans, ordre de grandeur raisonnable devant les chiffres annoncés (environ 100 ans et pas plus de 200 ans). Nous retiendrons l'ordre de grandeur des taux de remplacement annuel pour ce scénario, soit environ 0,6 % pour maintenir l'état global du réseau, 1 % pour diminuer de moitié le linéaire de réseau en mauvais état dans les 20 prochaines années et 1,5 % pour diminuer d'un facteur six le linéaire de réseau en mauvais état dans les 20 prochaines années. Ceci reviendrait alors à remplacer à l'échelle québécoise (en excluant Montréal) un linéaire total d'environ 220 km par an pour maintenir l'état du réseau (30 % en moyenne en mauvais état), 365 km par an pour améliorer de moitié l'état du réseau dans les 20 prochaines années (15 % en moyenne en mauvais état en 2020) et 550 km par an pour améliorer d'un facteur six l'état du réseau dans les 20 prochaines années (près de 5 % en moyenne en mauvais état en 2020). Le Tableau 8.7 synthétise ces résultats.

Tableau 8.7 : Synthèse des résultats obtenus à l'échelle de la province de Québec (excluant Montréal)

	Linéaire	Pourcentage
Linéaire total de réseau d'égout québécois (excluant Montréal)	36 500 km	100 %
Linéaire en mauvais état à l'heure actuelle	11 000 km $\pm$ 5 500 km	30 % $\pm$ 15 %
Remplacement annuel nécessaire pour maintenir l'état actuel	220 km	0,6 %
Remplacement annuel nécessaire pour améliorer de moitié l'état du réseau dans les 20 prochaines années	365 km	1 %
Remplacement annuel nécessaire pour améliorer d'un facteur six l'état du réseau dans les 20 prochaines années	550 km	1,5 %

9 ESTIMATION DES COÛTS

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les besoins en capitaux pour la réfection des réseaux d'égout de la province de Québec. Nous avons exploité plusieurs sources d'informations afin de trouver un ordre de grandeur moyen des coûts de remplacement des conduites d'égout :

- (1) le tableau des coûts de remplacement d'un mètre linéaire de réseau d'égout selon son diamètre et sa profondeur estimés pour la ville A ;
- (2) le tableau des coûts de remplacement d'un mètre linéaire de réseau d'égout selon son diamètre et le type de réseau estimés pour la ville C.

Pour les données de la ville A, nous avons pris une profondeur moyenne de réseau de 4,2m. Pour les données de la ville C, nous avons estimé une moyenne des coûts des différents types de réseau (sanitaire, pluvial et combiné) par diamètre. Pour ces deux villes, les montants correspondent à l'intervention complète (travaux de voirie compris). Le Tableau 9.1 compare les coûts obtenus par classe de diamètres pour ces deux villes.

Tableau 9.1 : Coûts du remplacement d'un mètre linéaire de réseau d'égout selon son diamètre

Données de la ville A		Données de la ville C	
Diamètre	Coût (\$ / m)	Diamètre	Coût (\$ / m)
155	685	-	-
205	690	-	-
255	715	-	-
305	730	300	667
355	740	-	-
380	760	375	750
405	785	-	-
455	810	450	847
535	845	-	-
610	905	600	953
685	965	-	-
760	1035	760	1063
915	1130	910	1325
1065	1275	1050	1650
1220	1400	-	-
1370	1525	1350	2000
1525	1670	-	-

Nous remarquons une différence importante de coût pour les plus gros diamètres. Nous savons cependant que ce ne sont pas des diamètres très fréquents sur l'ensemble du territoire de la province de Québec. Le rapport de l'INRS-Urbanisation a en effet montré que plus de la moitié du linéaire des réseaux d'égout québécois a un diamètre de 200 à 300 mm (cf. Tableau 4.4).

Afin d'estimer le coût moyen par mètre linéaire d'une intervention de remplacement de réseau d'égout, nous avons appliqué ces coûts à des répartitions de linéaire de réseau par diamètre connues et représentatives de l'ensemble des villes du Québec :

- (1) la répartition par diamètre du linéaire de réseau d'égout ausculté de la ville A ;
- (2) la répartition moyenne par diamètre du linéaire de réseau d'égout québécois (données issues du rapport de l'INRS-Urbanisation).

Lorsque des travaux de remplacement de réseau d'égout sont entrepris, il est possible qu'on choisisse par la même occasion de changer le réseau d'aqueduc situé sous la même rue. Néanmoins, nous ne nous intéressons ici qu'au remplacement de l'égout seul puisque les coûts correspondants à un remplacement combiné de l'aqueduc et de l'égout sont présentés au chapitre "Conclusion générale". L'ensemble de ces estimations est présenté en annexe E5. Le Tableau 9.2 synthétise les résultats obtenus.

Tableau 9.2 : Estimation d'un coût moyen par mètre linéaire d'une intervention de remplacement de réseau d'égout

Source d'informations	Tableau de coûts utilisé	Répartition du linéaire par diamètre utilisé	Coût (\$ / m) ÉGOUT
Ville A	Ville A	Ville A	799
INRS-Urbanisation et ville A	Ville A	INRS-Urbanisation	731
INRS-Urbanisation et ville C	Ville C	INRS-Urbanisation	713
Coût moyen par mètre linéaire			\$ 750 / m

Nous constatons peu de différences entre les coûts moyens par mètre linéaire estimés. Ceci s'explique par le fait que le linéaire dans la classe des grands diamètres est faible et que par ailleurs la ville A est représentative de l'ensemble des municipalités québécoises (cf. Section 4.2.2). Nous travaillerons donc avec la valeur moyenne estimée, soit un coût de remplacement du mètre linéaire

de réseau d'égout seul d'environ \$ 800. Le coût du remplacement combiné égout-aqueduc est abordé au chapitre " Conclusion générale".

Le chapitre précédent nous a permis d'estimer le linéaire de réseau à remplacer chaque année selon que l'on veut maintenir l'état du réseau d'égout ou l'améliorer :

- (1) scénario de remplacement annuel $R = 0,6 \%$: remplacement nécessaire pour maintenir l'état actuel (30 % en moyenne de linéaire de réseau d'égout en mauvais état) ;
- (2) scénario de remplacement annuel $R = 1 \%$: remplacement nécessaire pour améliorer de moitié l'état du réseau dans les 20 prochaines années ;
- (3) scénario de remplacement annuel $R = 1,5 \%$: remplacement nécessaire pour améliorer d'un facteur six l'état du réseau dans les 20 prochaines années.

Le Tableau 9.3 présente les capitaux nécessaires à la réalisation de ces différents scénarios.

Tableau 9.3 : Estimation des besoins en capitaux pour l'ensemble de la province (en excluant Montréal)

	$R = 0,6 \%$	$R = 1 \%$	$R = 1,5 \%$
Linéaire de réseau en mauvais état à remplacer chaque année	220 km	365 km	550 km
Coût annuel du remplacement	\$ 175 000 000	\$ 290 000 000	\$ 440 000 000
Besoins en capitaux dans les 5 prochaines années	\$ 875 000 000	\$ 1 450 000 000	\$ 2 200 000 000
Besoins en capitaux dans les 10 prochaines années	\$ 1 750 000 000	\$ 2 900 000 000	\$ 4 400 000 000
Besoins en capitaux dans les 20 prochaines années	\$ 3 500 000 000	\$ 5 800 000 000	\$ 8 800 000 000

En conclusion, nous retiendrons que les coûts annuels de remplacement s'élèvent à \$ 175 millions pour maintenir l'état moyen du réseau dans son état actuel, \$ 290 millions pour diminuer de moitié

le linéaire en mauvais état dans les 20 prochaines années et \$ 440 millions pour diminuer d'un facteur six le linéaire en mauvais état dans les 20 prochaines années. Si on choisit de maintenir l'état moyen du réseau dans son état actuel, les besoins en capitaux s'élèvent alors à près de \$ 875 millions sur 5 ans, \$ 1,75 milliards sur 10 ans et \$ 3,5 milliards sur 20 ans.

10 CONCLUSION

Nous avons développé dans cette étude un modèle simple applicable au contexte québécois qui permet de prédire l'état structural des conduites d'égout dans un futur proche (de 0 à 20 ans). L'hypothèse principale de ce modèle est que toutes les conduites de même âge et de mêmes caractéristiques ont la même probabilité de se retrouver en mauvais état.

Nous n'avons pu travailler qu'avec deux municipalités-témoins. Il aurait été utile de pouvoir collaborer avec plus de municipalités afin de trouver des valeurs plus représentatives du paramètre du modèle, ainsi que de procéder à une phase de validation. À l'heure actuelle, ceci n'est guère envisageable à l'échelle du territoire québécois du fait d'un manque de connaissances évident des caractéristiques mais surtout de l'état structural des réseaux d'égout. Il paraît donc important que les municipalités québécoises fassent un effort d'acquisition et d'organisation de cette information.

Le modèle calé a été appliqué aux municipalités ayant répondu de façon satisfaisante au questionnaire de l'INRS-Urbanisation, puis les résultats ont été transposés à l'ensemble de la province de Québec. De cette façon, nous estimons qu'à l'heure actuelle, la proportion du linéaire de réseau d'égout en mauvais état dans la province de Québec (en excluant Montréal) est de l'ordre de $30 \% \pm 15 \%$, ce qui représente $11\,000 \text{ km} \pm 5\,500 \text{ km}$. D'après un scénario de vieillissement moyen qui estime à 75 % la probabilité qu'un tronçon soit en mauvais état lorsqu'il atteint l'âge de 150 ans, le taux de remplacement annuel nécessaire pour maintenir constant cet état global est d'environ 0,6 %, alors que le taux pour l'améliorer dans les 20 prochaines années (réduction du linéaire en mauvais état de moitié) est de 1 % et que le taux pour l'améliorer sensiblement dans les 20 prochaines années (réduction du linéaire en mauvais état d'un facteur six) est de 1,5 %. Ceci revient à remplacer à l'échelle québécoise un linéaire total d'environ 220 km par an pour maintenir l'état du réseau (30 % en moyenne en mauvais état), 365 km par an pour améliorer de moitié l'état du réseau dans les 20 prochaines années (15 % en moyenne en mauvais état en 2020) et 550 km par an pour améliorer encore plus l'état du réseau dans les 20 prochaines années (près de 5 % en moyenne en mauvais état en 2020).

En appliquant un coût de remplacement moyen du réseau d'égout de \$ 800 par mètre linéaire, les montants annuels nécessaires au renouvellement des conduites pour les 20 prochaines années s'élèvent à \$ 175 millions pour maintenir l'état moyen du réseau dans son état actuel, \$ 290 millions pour améliorer de moitié l'état du réseau dans les 20 prochaines années et \$ 440 millions pour améliorer d'un facteur six l'état du réseau dans les 20 prochaines années. Si on choisit de maintenir l'état moyen du réseau dans son état actuel (en moyenne 30 % de linéaire en mauvais état), les besoins en capitaux s'élèvent alors à près de \$ 875 millions sur 5 ans, \$ 1,75 milliards sur 10 ans et \$ 3,5 milliards sur 20 ans.

11 BIBLIOGRAPHIE

Aqua Data Consultant (1996). *Les spécialistes du diagnostic*. Dépliant publicitaire.

Augarde, J. (1993a). *Diagnostic des réseaux d'assainissement*. Nanterre, France, Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et Centre de Recherche et d'Essais Appliqués aux Techniques de l'Eau (CREATE).

Augarde, J. (1993b). *La réhabilitation des réseaux d'assainissement*. Nanterre, France, Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et Centre de Recherche et d'Essais Appliqués aux Techniques de l'Eau (CREATE).

Bennis, S., J. Bengassem et K. Lagacé (1997). Développement d'un système d'aide à la décision pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement. Dans : *11^e Colloque sur le drainage urbain*, M. Osseyrane éd., 6.1-6.23. Montréal, Juin 1997. Montréal : Association Québécoise des Techniques de l'Environnement.

Bergue, J.-M. (1994). Le projet national RERAU de réhabilitation des réseaux d'assainissement. *Travaux*, no. 695 : 37-42.

Berrebi, R. et S. Ledru (1994). L'entretien du réseau d'assainissement - L'exemple de la Seine-Saint-Denis. *Courants*, no. 26 : 16-20.

Bible, D. W. et J. B. Hinte (1993). Total System Solution. *Public Works*, 124(12) : 35-38.

Chocat, B. et al. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Paris, Tec & Doc, 1124 p.

Clegg, D., A. R. Eadon et D. Fiddes (1989). UK State-of-the-Art - Sewerage Rehabilitation. *Water Science and Technology*, 21 : 1101-1112.

Delleur, J.W. (1994). Sewerage Failure, Diagnosis and Rehabilitation. Dans : *Urban Drainage Rehabilitation and Techniques*, W. Macaitis éd., 11-29. New-York, N.-Y. : American Society of Civil Engineers.

Hersch, P. (1985). Evaluating Utility System Conditions. *Water/Engineering and Management*, 132(5) : 43-49.

Hurley, R. (1994). Urban Sewerage Rehabilitation in the UK. *Journal of the Institution Water and Environmental Management (JIWEM)*, 8(4) : 425-431.

INRS-Urbanisation (1997). *Évaluation des besoins des municipalités québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux*. Rapport remis au Ministère des Affaires municipales, Juillet 1997, 188 p.

Jacobs, T. L., M. A. Jr. Medina, N. Kaufman et D. M. Wood (1993). Optimal Long-Term Scheduling of Stormwater Drainage Rehabilitation. *Water Resources Bulletin*, 29(1) : 47-54.

Nacer, N. (1992). *État des lieux de la robotique urbaine dans des infrastructures non visitables*. Strasbourg, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 24 p.

Québec (1994). *Répertoire des municipalités du Québec*. Sainte-Foy, Québec : Publications du Québec.

- Reyna, S. M. (1993). *Optimal Planning of Sewer Systems Rehabilitation*. Thèse de doctorat. West Lafayette, Indiana, USA, Purdue University, 236 p.
- Rommel, Y., D. Bouyssou et R. MacGilchrsit (1989). Planning Rehabilitation Works on a Sewer Network. Dans : *Proceedings of the 6th Conference on Computing in Civil Engineering - Computers in Engineering Practice*, T. O. Jr. Barnwell éd., 108-115. New-York, N.-Y.: American Society of Civil Engineers.
- Schrock, B. J. (1988). Pipeline Infrastructure Rehabilitation. Dans : *Proceedings of the Conference on Pipeline Infrastructure*, B. A. Bennett éd., 400-408. New-York, N.-Y. : American Society of Civil Engineers.
- Thomson, J. C. (1991). Pipeline rehabilitation : underground option. *Civil engineering, ASCE*, Mai : 64-66. U. S. Department of Housing and Urban Development (1984). *Utility Infrastructure Rehabilitation*. Office of Policy Development and Research, Building Technology Division.
- Weil, G. J. (1990). Remote infrared thermal sensing of sewer voids. *Proceedings of the 17th Annual Conference, Water Ressources Planning and Management Division, ASCE*, Houston, Forth Woth, Texas.
- Weissert, T. (1989). Don't Just Preach Preventive Maintenance, Practice It. *Water/Engineering and Management*, January : 32-35.
- Zimmerman, R. A. et D. Martin (1993). From Prevention to Prediction. *Water Environment and Technology*, 5(8) : 63-65.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif du présent rapport était d'estimer l'évolution de l'état structural des infrastructures urbaines souterraines (réseaux d'aqueduc et d'égout) sur des horizons de 5, 10 et 20 ans. Compte tenu de la nature très différente de ces deux types de réseau et du type d'indicateur de leur état structural, nous les avons considérés séparément. Les deux parties de ce rapport traitent respectivement des réseaux d'aqueduc et d'égout.

Pour chacun de ces types de réseau, nous avons été à même d'estimer comment évoluerait l'état structural sur un horizon de 20 ans pour l'ensemble du Québec. L'approche proposée est, à notre connaissance, novatrice puisqu'elle fait appel à des outils de modélisation originaux développés spécifiquement pour ce type d'application.

Les résultats pour le **réseau d'aqueduc** nous montrent que, pour maintenir le réseau dans son état structural actuel sur un horizon de 20 ans, il faudra investir des sommes de l'ordre de \$ 3.4 milliards pendant cette période. Par "maintenir l'état structural actuel", nous voulons dire maintenir à terme après 20 ans, un nombre de bris annuel moyen sur l'ensemble du territoire québécois comparable à ce qu'il est actuellement. Ce scénario ne considère aucune croissance, i.e. le linéaire total de réseau demeure inchangé sur la période de 20 ans. De plus, le coût utilisé par mètre de réseau (\$ 645) correspond au coût de remplacement des conduites d'aqueduc seules. Autrement dit, nous supposons que là où une conduite d'aqueduc est remplacée, aucun travail de remplacement du réseau d'égout ne se fait simultanément.

Concernant le **réseau d'égout**, les résultats nous montrent que, pour maintenir l'état structural du réseau dans 20 ans à son niveau actuel, il faudra injecter une somme totale de \$ 3.5 milliards. L'état structural est défini en fonction d'une classification des tronçons selon qu'ils soient en "bon état" ou en "mauvais état", i.e. dans ce dernier cas que l'on estime nécessaire un remplacement du tronçon. Ce scénario suppose une croissance nulle du linéaire de réseau d'égout sur la période de 20 ans et fait l'hypothèse que les travaux de remplacement des conduites d'égout se font sans

remplacement des tronçons d'aqueduc adjacents. Le coût par mètre de réseau d'égout utilisé est de \$ 800.

Un autre scénario possible d'estimation des coûts consiste à supposer que les tronçons de réseaux d'aqueduc et d'égout sont remplacés simultanément. On sait que, dans ce cas, le coût de remplacement des deux réseaux par mètre est plus petit que la somme des coûts de remplacement de l'aqueduc et de l'égout pris isolément. Le tableau 8.3 de la partie 1 nous indique que le coût par mètre de réseau lorsqu'une seule tranchée est creusée pour remplacer à la fois les tronçons d'aqueduc et d'égout est de l'ordre de \$ 645. Si les réseaux d'aqueduc et d'égout sont remplacés simultanément, alors le coût est de \$ 1 065 par mètre de linéaire aqueduc-égout remplacé. Le tableau suivant montre comment nous avons estimé le coût total de ce scénario sur la base de ces montants.

	Linéaire à remplacer sur 20 ans	Coût unitaire	Coût de remplacement (en milliards \$)
Combiné égout- aqueduc	4 400 km (linéaire d'égout à remplacer)	\$ 1 065	4.7
Surplus - aqueduc	922 km	\$ 645	0.6
		TOTAL	5.3

Le coût total ainsi estimé est de \$ 5.3 milliards. D'abord, le linéaire commun aux deux réseaux, soit 4 400 km, est remplacé à un coût total de \$ 4.7 milliards. Ensuite, puisque le linéaire d'aqueduc à remplacer est plus long, ce surplus de linéaire d'aqueduc est remplacé à un coût de \$ 0.6 milliards. On obtient donc un coût total de \$ 5.3 milliards.

Par ailleurs, si l'on considère l'autre scénario où le remplacement des réseaux d'aqueduc et d'égout ne se fait pas simultanément, on arrive alors à un coût d'environ \$ 6.9 milliards. Nous rappelons que ces coûts sont ceux qui sur 20 ans pourront assurer, à terme, un maintien au niveau actuel de l'état structural des réseaux d'aqueduc et d'égout.

Les coûts présentés plus haut ne sont pas les seuls que cette étude puisse estimer. Si les gestionnaires de réseaux jugent que l'état actuel est inacceptable, les coûts estimés se transforment en coûts planchers. Puisque ces coûts permettent de maintenir l'état structural au niveau actuel, des sommes plus importantes devront être investies pour améliorer l'état. Les scénarios présentés au Chapitre 8 de la partie 1, sur la base d'une définition quantitative en terme de nombre de bris par 100 km (par exemple, si l'on estime qu'un réseau ayant plus de 39 bris au 100 km est dans un état inacceptable), ont permis d'estimer les taux de remplacement des conduites d'aqueduc nécessaires pour atteindre le seuil d'acceptabilité dans 5, 10 ou encore 20 ans. Ce seuil fixé, la grille de coûts définie au Chapitre 8 de la partie 1 permet d'estimer les coûts nécessaires à l'atteinte de cet objectif. De la même façon, les scénarios présentés au Chapitre 8 de la partie 2, sur la base du pourcentage total de réseau d'égout en mauvais état, ont permis d'estimer les taux annuels de remplacement nécessaires au maintien ou à l'amélioration à plus ou moins long terme de l'état global actuel du réseau. La grille de coûts définie au Chapitre 9 de la partie 2 permet d'estimer les coûts nécessaires à l'atteinte de ces objectifs.

Cette étude a permis de faire le bilan de l'information disponible dans les municipalités québécoises et a mis en lumière la nécessité d'améliorer l'archivage des données sur les bris, les inspections et les remplacements de conduites. De plus, nos travaux ont permis de faire un premier défrichage de la littérature et d'identifier les types de modélisation, leurs avantages et leurs lacunes, pouvant répondre au problème d'estimation de l'état structural des réseaux d'aqueduc et d'égout. Nous sommes confiants que l'approche originale présentée dans ce rapport, tant au point de vue de la modélisation que de la transposition, servira de référence pour les études futures sur la détérioration des conduites en contexte québécois.

ANNEXES

ANNEXE A1 - ÉTUDES DE CAS

L'annexe 1 présente brièvement et de façon non-exhaustive quelques études de cas sur la réhabilitation des conduites d'aqueduc tant au niveau de la modélisation que de la gestion des interventions. L'emphase est mise sur les observations faites dans chaque ville au niveau des patrons de bris et des décisions prises pour les programmes de réhabilitation/renouvellement.

1.1 Ville de New York, N.Y.

O'Day *et al.* [1980] ont présenté les efforts de la ville de New York pour analyser les causes des bris de conduites. La ville de New York a plus de 6 000 miles de conduites et le nombre de bris annuel est passé de 250 dans les années 40 à environ 450 dans les années 70, tant à cause du plus grand linéaire que du plus grand taux de bris par mile. Plusieurs constatations ont été faites à partir des données sur les caractéristiques des conduites d'aqueduc et leur historique de bris :

- ⇒ La fréquence des bris de conduites augmente chaque année.
- ⇒ Le taux de bris sur l'île de Manhattan est de trois à cinq fois supérieur à celui des quartiers environnants (*e.g.* Queens, Bronx).
- ⇒ Les conduites de petits diamètres (6, 8 et 10 pouces) ont un taux de bris beaucoup plus élevé que celles de grands diamètres.
- ⇒ La plus grande partie du système de distribution de l'île de Manhattan a été construit à la fin du 19^{ième} siècle et au début du 20^{ième} selon les standards et avec les matériaux de l'époque.
- ⇒ Les conduites posées avant 1870 ont un haut taux de bris.
- ⇒ Environ 12% des conduites du réseau ont subi des bris.
- ⇒ Les taux de bris sont les plus élevés durant les mois de décembre, janvier et février.
- ⇒ Les conduites en contact avec d'autres structures brisent plus fréquemment.
- ⇒ Les taux de bris varient énormément entre les différents cadastres de la ville.

Les conclusions qui ont été tirées suite aux analyses sont :

- ⇒ L'âge n'est pas le seul facteur explicatif de l'état de détérioration d'une conduite.

- ⇒ Les conduites de petits diamètres (l'épaisseur des parois est petite) ont le taux de bris le plus élevé, principalement à cause des mauvaises conditions de pose qui induisent un effet de poutre.
- ⇒ Les conduites de 12 pouces brisent pour les mêmes raisons que les conduites de plus petits diamètres.
- ⇒ Les fuites sont soupçonnées d'avoir un effet important sur le taux de bris, principalement à cause de la perturbation du sol autour de la conduite (emporté par l'eau).
- ⇒ Le lieu d'occurrence du bris est le facteur le plus important pour prédire les bris futurs.
- ⇒ Il semble que le stress que subissent les conduites au 20^{ième} siècle est supérieur au stress qu'elles devaient subir au 19^{ième} siècle.

Male *et al.* [1988] ont analysé la politique de remplacement des conduites d'aqueduc de la ville de New York. Les gestionnaires du réseau de cette ville recommande le remplacement d'une conduite lorsque celle-ci a subi deux bris et plus depuis son installation. De plus, les gestionnaires ont décidé de remplacer graduellement les conduites de 6" de diamètre par de plus grands diamètres, ayant observé un plus grand taux de bris sur ces petits diamètres.

Ces chercheurs ont développé un modèle de simulation pour étudier différentes stratégies de remplacement des conduites, qui détermine le nombre de tronçons devant être remplacé chaque année sur une période de 50 ans dans cinq quartiers importants de la ville. La simulation comprend trois étapes: l'entrée des données (longueur des conduites et taux de bris observé); la manipulation des données (formatage des données pour utilisation par le programme); et l'utilisation d'une distribution de Poisson pour obtenir un taux moyen de bris pour différentes classes de conduites (classes divisées selon le nombre de bris antérieurs). Les résultats du modèle sont appliqués à différentes stratégies de remplacement afin de déterminer le nombre de tronçons à remplacer. Le modèle de simulation a été développé avec les données d'avant 1970 et validé pour la période 1970-1985.

Cinq stratégies de remplacement (remplacement des conduites n'ayant subi qu'un bris; ayant subi deux bris; trois bris; quatre bris; et "ne rien faire") sont évaluées en comparant la valeur présente

des coûts qu'elles engendrent. Le modèle économique utilisé pour l'évaluation des coûts est très sensible à deux des paramètres d'entrée du modèle, soit le taux d'escompte ajusté et le facteur de coûts indirects. La principale conclusion de cette étude est qu'une politique de remplacement aggressive (remplacement après deux ou trois bris) est économiquement justifiable lorsque le taux de bris est élevé alors que s'il est faible, la politique devrait être moins aggressive.

Dans des travaux subséquents [Male *et al.* 1990], le modèle de simulation et l'analyse de coût ont permis d'identifier une stratégie de remplacement optimale par classe de conduites (6", 8", 12", 16"-24"), puisque le comportement des conduites de différents diamètres varie énormément (les petits diamètres brisent plus souvent, les grands diamètres ont des coûts de remplacement beaucoup plus élevés, etc.). De plus, ces travaux ont confirmé que le point faible de la démarche consiste à estimer les taux d'intérêt et les coûts indirects associés à la réparation et au remplacement des conduites. Plusieurs généralisations peuvent être faites quant aux systèmes plus âgés avec des conduites de fonte et dont le taux de bris tend à augmenter (*i.e.* similaires à la ville de New York) :

- ⇒ Le remplacement des conduites de petits diamètres constitue une meilleure stratégie de gestion puisque le taux de bris est plus élevé pour les petits diamètres et le coût de remplacement est moins élevé que pour les grands diamètres.
- ⇒ Les conduites pour lesquelles un bris provoque d'importants dommages matériels (coûts indirects élevés) doivent être remplacées avant celles dans des zones de moins grande valeur.
- ⇒ Il est important de bien noter l'historique des bris et des coûts associés à leur réparation pour améliorer la performance du modèle économique (point faible de la démarche).
- ⇒ Les nomogrammes présentés dans cette étude peuvent être utilisés afin de déterminer grossièrement des stratégies de remplacement pour des municipalités similaires mais, idéalement, les municipalités devraient s'inspirer de la démarche présentée avec leurs propres données pour obtenir leurs propres stratégies de remplacement.
- ⇒ Dans la démarche présentée, la planification du remplacement se fait par catégorie de conduites de caractéristiques similaires mais les décisions doivent se prendre conduite par conduite en tenant

compte de leur localisation spatiale ou basées sur des facteurs indirects tels, la planification des travaux de voirie ou le besoin d'augmenter la capacité hydraulique.

⇒ Le graphique de la valeur présente des coûts par rapport aux stratégies de remplacement montre que le minimum n'est pas un point défini mais plutôt une zone, ce qui permet une certaine souplesse dans le choix d'une stratégie (*i.e.* certaines stratégies sont quasi-équivalentes au point de vue des coûts).

⇒ La stratégie "ne rien faire" est seulement choisie lorsque les taux d'intérêt sont très élevés et les conduites se trouvent dans des zones de moins grande valeur.

⇒ Deux stratégies ayant la même valeur présente des coûts peuvent engendrer des réseaux de distribution au comportement fort différent dans le futur. Une stratégie de remplacement plus agressive (remplacement après peu de bris) générera un réseau plus fiable quoiqu'à un coût initial plus élevé.

1.2 Cincinnati, Ohio/New Haven, Connecticut

Des analyses de régression pour la ville de Cincinnati ont permis d'identifier les facteurs de risque ayant une influence significative sur le taux de bris par mile. Ces facteurs sont les suivants: l'âge, l'installation post-1960, la corrosivité du sol et l'épaisseur de la paroi des conduites. L'installation post-1960 est un facteur indirect regroupant les changements de procédés manufacturiers, de techniques d'installation et de classes de conduites suite à l'apparition de la fonte ductile sur le marché [Clark *et al.* 1988]. Les analyses pour la ville de New Haven ont permis d'identifier les facteurs de risque suivants: l'âge, la stabilité du sol, la pression d'opération et l'installation post-1960. Les jeux de données de ces deux villes ont vraisemblablement servi à développer les modèles de régression et l'analyse de survie présentés dans Clark *et al.* [1982] et décrits précédemment.

Goodrich [1986] a étudié la possibilité de préparer et d'analyser les données d'une fraction représentative (10%; *i.e.* 397 miles de réseau) du réseau d'aqueduc de la ville de Cincinnati au lieu de consacrer les ressources pour la ville au complet. Le personnel de la ville a choisi 10% des cartes papier de la ville leur semblant un bon échantillon du réseau d'aqueduc en général et les

données ont été rassemblées pour toutes les conduites sur ces cartes. Cette fraction du réseau d'aqueduc a été découpée en noeuds et tronçons et chaque tronçon a été caractérisé selon: le type de matériau; le type de matériau de remblai; la pression; l'âge de la conduite; et le diamètre. Les informations disponibles sur les réparations effectuées sur ces conduites sont: le coût de la réparation; la profondeur de la conduite; l'état extérieur et intérieur de la conduite; et le type de matériau de remblai. Les informations sur les réparations sont disponibles depuis 1940. De la fraction du réseau étudiée, 14% des conduites ont déjà subies un bris (19% à Philadelphie; 21% à New Haven, Connecticut).

Les taux de réparation obtenus avec un échantillon de seulement 10% des conduites de la ville se comparent favorablement avec les études faites dans d'autres villes majeures des États-Unis. En comparant le nombre de bris de différents types (joint, circonférenciel, longitudinal, trou et autres) et les taux de bris pour le 10% du réseau de Cincinnati avec ceux obtenus d'autres réseaux, les mêmes tendances sont observées: les bris circonférenciels sont plus fréquents sur les petits diamètres tandis que les bris longitudinaux sont plus fréquents sur les grands; les trous sont plus fréquents sur les grands diamètres; et les taux de bris sont plus élevés pour les petits diamètres.

L'auteur fait remarquer que choisir de concentrer les ressources sur les conduites de grands diamètres (*i.e.* les conduites principales du réseau d'aqueduc), utiles à un modèle hydraulique, induit une erreur dans l'analyse des bris puisque les probabilités de bris sont plus élevées pour les petits diamètres. Il vaut mieux choisir une fraction représentative du réseau pour l'analyse des bris que d'utiliser les données recueillies pour un modèle hydraulique.

Andreou *et al.* [1987b] ont utilisé le modèle des risques proportionnels de Cox pour modéliser les probabilités d'occurrence de bris dans deux villes américaines non-identifiées dans cet article, simplement référées par villes A et B (mais identifiées ultérieurement comme Cincinnati et New Haven). Deux comportements ont été identifiés à partir des données : un représentant les bris peu fréquents et l'autre, les bris fréquents. Les bris non-fréquents, caractérisés par un taux de bris

augmentant dans le temps, ont été modélisés par le modèle des risques proportionnels de Cox alors que les bris fréquents, caractérisés par un taux de bris relativement constant, ont été modélisés par un modèle de type Poisson.

Le Tableau X1.1 présente les fonctions de base, $h_0(t)$, les coefficients b obtenus pour les différentes covariables z utilisées dans le modèle des risques proportionnels [$h(t) = h_0(t) e^{zb}$] pour les villes A et B. Pour la ville B, les covariables et les coefficients présentés sont pour le modèle de risque d'un deuxième bris, c'est pourquoi la fonction de base est exprimée par $h_0^{12}(t)$. Les descriptions des covariables présentées dans le Tableau sont les suivantes :

LNLENGTH	est le logarithme naturel de la longueur exprimée en pieds;
PRESBRK	est la pression interne (en psi/10) pour le premier bris, sinon 0;
LOW	est le pourcentage de conduites en zone peu développée (de 0 à 1);
C35 (variable factice)	est égal à 1 si la conduite a été installée entre 1930 et 1935, sinon 0;
C50 (variable factice)	est égal à 1 si la conduite a été installée après 1950, sinon 0;
AGEBRK	est égal à 2/(âge au second bris) si le nombre de bris antérieurs est 2, sinon 0;
P12 (variable factice)	est égal à 1 si le nombre de bris antérieurs est 1 ou 2, sinon 0;
LLENGTH	est le logarithme en base 10 de la longueur exprimée en pieds;
ABSPRES2	est la pression interne absolue (en psi) pour les conduites installées durant la période 2 (avant 1940), sinon 0;
PCTHIGH3	est le pourcentage de conduites en zone fortement développée pour les conduites installées durant la période 3 (après 1940), sinon 0;
PERIOD3	est égal à 1 pour les conduites installées durant la période 3 (après 1940), sinon 0; et
SIZEIN3	est le diamètre (en pouces) pour les conduites installées durant la période 3 (après 1940), sinon 0.

Tableau X1.1 Covariables z , coefficients b , écart-types et ratio coefficient/écart-type pour le modèle de Cox des villes A et B

Covariable z	Coefficient b	Écart-type	Coefficient/Écart-type
Ville A ; $h_0(t) = 10^{-4} (2 - 0.1 t + 0.002 t^2)$			
LNLENGTH	0.5299	0.0666	7.9504
PRESBRK	0.0931	0.0276	3.3777
LOW	-0.5404	0.1222	-4.4216
C35	-0.6459	0.1258	-5.1340
C50	0.2631	0.1365	1.9274
AGEBRK	1.7839	0.5831	3.3149
P12	1.5726	0.2626	5.9895
Ville B ; $h_0^{12}(t) = 0.1297 - 0.0086 t + 0.000213 t^2$			
LGLENGTH	0.261	0.111	2.35
ABSPRES2	0.0093	0.003	3.20
PCTHIGH3	0.0085	0.003	2.44
PERIOD3	0.607	0.206	2.94
SIZEIN3	0.024	0.014	1.71

Un coefficient b positif indique qu'une augmentation de la valeur de la covariable entraînera une plus forte probabilité de bris. Le coefficient négatif associé à la covariable LOW montre, au contraire, qu'une hausse de pourcentage de conduite en zone peu développée entraînera une baisse de probabilité de bris pour ces conduites. De même pour la variable C35, c'est-à-dire qu'une conduite installée entre 1930 et 1935 a moins de risque de briser. Parmi les facteurs significatifs (petit écart-type) pour la modélisation du premier stade de détérioration (bris non-fréquents), ceux ayant la plus forte influence sur l'augmentation du taux de bris dans le temps (en foncé dans le Tableau) sont : une grande pression interne, un fort pourcentage de conduite en zone très

développée et l'historique de bris d'une conduite (tel que défini par le nombre de bris précédents et le temps entre le premier et deuxième bris). À partir des résultats obtenus, les auteurs tentent d'expliquer la signification physique du rôle de chacune des covariables par rapport à la probabilité d'occurrence des bris. Pour le deuxième stade de détérioration (bris fréquents), les auteurs ont utilisé une distribution de Poisson, telle que présentée précédemment à l'Équation 3.8. Les résultats obtenus par ce type d'approche sont fortement influencés par le fait que seulement un faible échantillon des conduites entrent dans ce stade.

Karaa et Marks [1990] ont utilisé le modèle de Cox pour analyser le réseau de la ville de New Haven qui comprend 1 428 conduites de 6 à 48 pouces. Les données de la ville ont été divisées en six strates correspondant à six périodes d'installation. Les covariables choisies sont : le diamètre (6 à 48 pouces), la longueur (100 à 14 000 pieds), la corrosivité du sol (1 ou 0), la stabilité du sol (1 ou 0), la pression interne (en livres par pouce² divisé par 10) et le pourcentage de conduite en zone peu développée. Les résultats ont permis de faire plusieurs constatations :

- ⇒ Le modèle des risques proportionnels de Cox est adéquat pour représenter la première phase de détérioration des conduites avant que les bris ne deviennent plus fréquents.
- ⇒ La fonction de risque de base calculée avec les données a une forme en "U" pour le temps au premier et au deuxième bris.
- ⇒ À partir du troisième bris, les bris surviennent fréquemment et à un taux de bris relativement constant. Le modèle de Poisson est plus approprié pour modéliser ce comportement.
- ⇒ Les variables pression interne, corrosivité du sol et pourcentage en zone peu développée ont un impact sur la probabilité de bris et le taux de bris.
- ⇒ Tant pour la ville de Cincinnati que pour New Haven, les conduites installées pendant différentes périodes ont des comportements différents quant aux bris. Les conduites installées après 1940 ont le pire taux de bris.
- ⇒ La probabilité de bris n'augmente pas proportionnellement avec la longueur, ce qui indique une distribution non-uniforme des facteurs influençant l'occurrence de bris. Les bris ont plutôt tendance à apparaître à des endroits précis.

1.3 Boston, Massachusetts

Pour faire face au défi grandissant de la détérioration de son réseau d'aqueduc, la ville de Boston a mis en place un important programme d'entretien comportant trois volets majeurs: la pose de compteurs d'eau; la détection de fuites; et le recouvrement interne des conduites [Sullivan 1982]. La ville croit pouvoir atteindre son objectif de recouvrement interne, qui est de nettoyer et recouvrir ou remplacer toutes ses conduites de plus de 100 ans, avant l'an 2000.

Par comparaison avec 14 villes majeures des États-Unis, la ville de Boston a un faible taux de bris (en 1977, 36 bris par année par 1000 miles de conduites; à comparer à 75 pour New York, 156 pour Denver et 1290 pour Houston). La majorité des fuites (75%) a été localisée sur des entrées de service, 23% sur des bornes-fontaines et seulement 2% des fuites étaient sur des conduites. Par contre, le réseau d'aqueduc souffre de forte tuberculisation et ses conduites sont sous-dimensionnées pour l'usage présent et futur. Une étude portant sur le taux de bris des conduites a permis d'observer que 50% des bris a lieu sur les trois plus petits diamètres bien que ceux-ci ne représentent que 25% du réseau [Sullivan 1982].

Par contre, en comparaison avec 12 autres villes américaines, la ville a d'importantes fuites qui résultent en de grandes pertes d'eau (en 1978, 17% de l'eau produite est perdue par les fuites; à comparer à 12% pour Philadelphie et 8% pour Portland, Oregon). C'est pour cette raison que la ville a entrepris un programme de recherche de fuites. Une équipe établit des bilans de volume à partir de mesures prises sur le réseau pour localiser des zones à problèmes puis une autre équipe fait de l'écoute de bornes-fontaines pour trouver l'emplacement exact des fuites. Pour assurer une bonne qualité de service, la ville réhabilite ou remplace environ 18 km (1% du système) de conduites de plus de 100 ans annuellement. La priorisation des interventions dépend de l'information contenue dans les fiches d'entretien, de l'âge des conduites, des résultats des tests de perte de charge et des tests de bornes-fontaines et de la planification des travaux de voirie. Plusieurs facteurs sont examinés pour décider si une conduite sera réhabilitée ou remplacée, tels:

une capacité hydraulique adéquate tant pour la consommation que pour la lutte contre les incendies, l'historique d'entretien de la conduite, la corrosion probable due aux courants vagabonds provenant du système électrique du métro, les problèmes futurs d'accessibilité et/ou dus à un changement d'occupation du sol [Sullivan 1982].

Quatre études importantes ont été entrepris à la ville de Boston suite aux travaux présentés par Sullivan [1982]. La première étude portait sur le développement d'un modèle hydraulique prenant en compte les importants développements commerciaux et résidentiels qu'a connu la ville dans les années 80. La seconde étude portait sur les dommages causés par des courants vagabonds dans des zones près du métro mais aussi dans les zones préalablement servies par des tramways. Des résultats préliminaires de cette étude ont démontré qu'une majorité de bris avait lieu dans un rayon de 500 pieds d'une ligne de métro ou d'une ligne abandonnée de tramway. La troisième étude s'intéressait à l'analyse historique des bris dépendant de l'âge des conduites, du type de sol, de la profondeur de la nappe phréatique, de la proximité des lignes de métro et d'autres structures, etc.. L'objectif de l'étude était d'améliorer les critères de décision entre le recouvrement interne et le remplacement des conduites. De plus, dans le cadre de la même étude, plus de 40 échantillons de conduites ont été prélevés afin de déterminer l'étendue de la corrosion interne, ce qui permettra d'établir plus précisément la durée de vie des conduites. La dernière étude s'intéressait à l'analyse des patrons de consommation et de l'UAF afin de déterminer précisément les écarts entre l'eau produite et l'eau facturée. Il a été décidé de faire les bilans de volume par zone géographique pour produire des bilans plus justes et identifier les sites de pertes d'eau importantes [Sullivan 1986]. Ces études permettront d'évaluer plus justement les besoins en financement pour la réhabilitation et le remplacement des conduites du réseau d'aqueduc de la ville de Boston, puisque les critères de décision seront construits à partir de données recueillies sur le terrain.

1.4 Winnipeg, Manitoba

Au Canada, la ville de Winnipeg est pionnière dans l'utilisation des modèles pour prédire le nombre de bris des conduites d'aqueduc grâce aux travaux de l'équipe d'I.C. Goulter. Kettler et Goulter [1985] ont analysé les données sur l'historique des bris de conduites en fonte et en asbestos-ciment par rapport au diamètre et à l'âge des conduites. Les résultats obtenus ont démontré que, pour les conduites en fonte, le taux de bris diminue avec l'accroissement du diamètre des conduites. Ceci n'a pas été observé pour les conduites en amiante-ciment. Les auteurs croient que l'épaisseur des parois plus grande pour les diamètres plus grands serait responsable de la meilleure intégrité structurale et de la meilleure résistance de la fonte à la corrosion. Les conduites en fonte subissent plus de bris sur leurs joints tandis que celles en amiante-ciment en subissent plus de type fissure circulaire. Les taux de bris des conduites en fonte et en amiante-ciment augmentent avec l'âge des conduites. Les bris sur les joints des conduites en fonte augmentent alors que les fissures circulaires diminuent avec l'âge des conduites.

Goulter et Kazemi [1988] ont observé que les bris sont fortement groupés, avec 22% de tous les bris qui ont lieu en deçà de 1 mètre d'un autre bris et 46%, en deçà de 20 mètres d'un autre bris. De plus, 42% des bris ayant eu lieu en deçà de 1 mètre d'un bris précédent auront lieu durant la même journée que le bris précédent. Leur étude montre que les relations entre le taux de bris et le temps et entre le taux de bris et la distance, par rapport à un premier bris peuvent être représentées par une exponentielle décroissante. C'est-à-dire qu'il est fort probable qu'une conduite subisse un deuxième bris dans une zone d'influence déterminée par des intervalles de distance et de temps assez restreints par rapport à un premier bris. Ils ont donc démontré que la localisation d'un bris est le meilleur indicateur d'un bris ultérieur dans la même zone d'influence. Les raisons présentées pour expliquer ce phénomène sont les suivantes: les fuites ont modifié les conditions de sol autour de la conduite, les réparations plus fréquentes durant les mois très froids de l'année ont modifié les conditions thermiques autour de la conduite et les réparations elles-mêmes ont modifié les conditions environnementales autour de la conduite. Les auteurs suggèrent

qu'il est important d'améliorer les techniques d'intervention (et surtout de remblayage) sur un réseau afin de minimiser l'impact des travaux sur les conditions environnantes de la conduite.

Suite à ces travaux, Goulter *et al.* [1993] ont développé une méthodologie pour quantifier les variations temporelle et spatiale du taux de bris des conduites d'aqueduc. La méthodologie consiste d'abord à compiler les données afin d'identifier les regroupements spatiaux et temporels puis à utiliser une régression non-linéaire pour déterminer les paramètres d'un modèle de Poisson non-homogène. En effet, ces chercheurs ont observé que la distribution des bris subséquents au premier bris peut être approximée par une distribution de Poisson non-homogène. Ils ont obtenu un bon accord entre les résultats de modélisation et les données observées lorsque que le nombre moyen de bris subséquents était inférieur à 0.05. Pour un nombre moyen de bris subséquents entre 0.05 et 0.14, l'accord était satisfaisant mais pour un nombre moyen supérieur à 0.14, le modèle de Poisson n'est plus approprié.

À l'aide des données de la ville de Winnipeg, Jacobs et Karney [1994] ont développé deux méthodes permettant d'évaluer la fiabilité d'un réseau d'aqueduc, soit la probabilité d'un jour sans bris et la probabilité d'occurrence d'un bris indépendant. La probabilité d'un jour sans bris sur tout le réseau a été estimée de deux façons utilisant en cela l'hypothèse que les bris sont uniformément distribués sur tout le réseau. D'abord, l'estimation a été faite par une régression polynomiale avec toutes les données disponibles. Puis, une régression linéaire sur les logarithmes naturels avec la longueur et l'âge des conduites comme variables indépendantes a été faite en regroupant les conduites par catégorie (matériau, diamètre et intervalle d'âge). Le regroupement des conduites en différentes catégories a été simplifié par l'utilisation des fonctionnalités d'un SIG.

Un bris est défini comme indépendant lorsqu'il a lieu plus de 90 jours et/ou plus de 20 m d'un bris précédent. Les bris indépendants sont un indicateur intéressant de l'état d'un réseau et de sa fiabilité, puisqu'ils forment le taux de base de bris d'une municipalité. Ils sont impossibles à prévenir à moins de changer de grandes longueurs de conduites, ce qui est financièrement difficile. La probabilité d'occurrence d'un bris indépendant a été obtenue par une régression linéaire avec

la longueur et l'âge des conduites comme variables indépendantes. Un coefficient de détermination d'environ 0.95 a été obtenue pour trois catégories de conduites (caractéristiques homogènes). En comparant le taux de bris annuel dans la municipalité avec le taux probable d'occurrence de bris indépendants et en analysant les tendances, il est possible de fixer des objectifs de performance et de fiabilité du réseau. De plus, les auteurs démontrent que l'utilisation d'un SIG facilite grandement la manipulation des données et permet d'intégrer la localisation spatiale des conduites dans l'analyse.

1.5 Banlieues de Paris et de Bordeaux et syndicats ruraux du Kronthal et du Kochersberg, France

Eisenbeis [1994] a présenté les résultats obtenus par l'analyse de survie pour quatre réseaux français : le réseau de la Lyonnaise des Eaux-Dumez à Bordeaux (LED-Bordeaux), le réseau de la Compagnie des Eaux de la Banlieue de Paris (CEB) et les deux syndicats d'eau du Kronthal et du Kochersberg (Bas-Rhin), pour un total de 700 km. L'analyse de survie a été faite à l'aide du modèle des risques proportionnels [$h(t) = h_0(t) e^{zb}$] avec des fonctions de risque de base estimées par le modèle de Cox et de Weibull. Le modèle de Cox permet de calculer la fonction de risque de base à chaque intervalle de temps à partir des données tandis que le modèle de Weibull est une fonction à deux paramètres nécessitant calage [$h_0(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1}$].

Pour ce dernier modèle, l'auteur a observé un comportement différent pour les occurrences des premier bris à comparer aux occurrences des bris subséquents. Il a donc divisé les données en trois strates ayant des comportements différents : le premier bris, du deuxième au quatrième, et le cinquième bris et plus. Cette dernière strate est modélisée par une exponentielle (cas particulier du modèle de Weibull lorsque $p=1$) plutôt que par Weibull puisqu'il est observé que le taux de bris semble plutôt constant à partir du cinquième bris. Il est à noter que les paramètres du modèle de Weibull varient selon la strate mais que les coefficients b du modèle des risques proportionnels sont les mêmes pour toutes les strates.

Le Tableau X1.2 présente les coefficients b obtenus pour les différentes covariables z utilisées dans le modèle des risques proportionnels pour les deux réseaux de banlieue (LED-Bordeaux et CEB) et dans les réseaux des syndicats ruraux (données regroupées) avec la fonction de base, $h_0(t)$, calculée par le modèle de Cox. Les descriptions des covariables présentées dans le Tableau sont les suivantes: la **longueur** est en mètres, le **diamètre** est en millimètres, le **sol** est une covariable factice égale à 1 pour un sol corrosif, autrement elle est fixée à 0, **trafic-chaussée** est une covariable factice égale à 1 pour une conduite se trouvant sous chaussée dans une rue à trafic élevé et 0 pour une conduite se trouvant, soit sous trottoir, soit dans une rue à trafic faible, **nature cana** est une covariable factice égale à 1 pour une conduite posée après 1966, sinon 0 (1966 représente l'année d'introduction de la fonte ductile et de nouveaux types de joints) et **Ap75** est une covariable factice égale à 1 pour une conduite posée après 1975, et à 0 pour une conduite installée avant 1975 (1975 représente l'année d'introduction des manchons en polyéthylène sur la CEB).

Tableau X1.2 Covariables z , coefficients b et écart-types pour le modèle des risques proportionnels; $h_0(t)$ estimée par le modèle de Cox

Covariable z	Coefficient b et écart-type entre parenthèses		
	LED-Bordeaux	CEB	Bas-Rhin
Longueur	0.52 (0.06)	0.37 (0.05)	0.48 (0.10)
Diamètre	-0.80 (0.14)	-0.34 (0.10)	-0.37 (0.30)
Sol	0.32 (0.09)	0.24 (0.10)	
Trafic-chaussée	0.23 (0.12)	0.58 (0.18)	-0.45 (0.22)*
Nature cana.	-0.31 (0.15)	-0.64 (0.15)	
Ap75	-0.36 (0.27)	-1.39 (0.52)	

* Trafic seulement

Tel que mentionné auparavant (Tableau X1.1), les coefficients b négatifs associés aux covariables **diamètre**, **nature cana** et **Ap75** indiquent qu'une diminution de ces covariables entraîne une

augmentation de la probabilité de bris. Ainsi, les petits diamètres, les conduites en fonte grise et les conduites n'ayant pas été réparées avec des manchons en polyéthylène ont une plus forte probabilité de bris.

Le Tableau X1.3 présente les coefficients b obtenus pour les différentes covariables z utilisées dans le modèle des risques proportionnels mais dont la fonction de base, $h_0(t)$, est calculé à partir du modèle de Weibull. L'élimination de la covariable **Ap75** était nécessaire car il n'était pas possible de mesurer son influence puisque toutes les conduites ayant subi 5 bris et plus ont été posées avant 1975.

Tableau X1.3 Covariables z , coefficients b et écart-types pour le modèle des risques proportionnels; $h_0(t)$ estimée par le modèle de Weibull

Covariable z	Coefficient b et écart-type entre parenthèses		
	LED-Bordeaux	CEB	Bas-Rhin
Longueur	0.57 (0.05)	0.37 (0.05)	0.49 (0.09)
Diamètre	-0.85 (0.11)	-0.34 (0.10)	-0.39 (0.26)
Sol	0.34 (0.07)	0.29 (0.09)	
Trafic-chaussée	0.47 (0.09)	0.57 (0.17)	-0.45 (0.20)*
Nature cana.	-0.13 (0.09)	-0.64 (0.14)	

* Trafic seulement

Les seuls coefficients b différents de ceux calculés avec la fonction de risque de base estimée par Cox sont associés aux covariables **trafic-chaussée** et **nature cana** pour le réseau de LED-Bordeaux, ces deux variables étant influencées par l'élimination de la covariable **Ap75**.

Le Tableau X1.4 présente les paramètres λ et p du modèle de Weibull. L'historique des bris sur les syndicats ruraux n'est pas assez long pour modéliser les cinquième bris et plus. Il est à noter

que les paramètres p pour la seconde strate sont proches de 1 et cela suggère que la deuxième strate pourrait être regroupée avec la troisième pour être modélisée par une exponentielle.

Tableau X1.4 Paramètres du modèle de Weibull pour modéliser $h_0(t)$

Strate	Paramètre	LED-Bordeaux	CEB	Bas-Rhin
Premier bris	λ	0.03	0.02	0.03
	p	1.67	1.21	1.27
2 ^{ème} au 4 ^{ème}	λ	0.15	0.10	0.07
	p	1.06	0.99	1.08
5 ^{ème} et plus (exponentielle)	λ	0.15	0.20	
	p	1	1	

L'auteur note que les covariables significatives sont les mêmes pour les trois séries de données étudiées (LED-Bordeaux, CEB, Bas-Rhin) et qu'après des analyses plus poussées, il est permis de conclure que les coefficients b sont similaires peu importe le réseau. Les spécificités locales associées au réseau se retrouvent plutôt dans l'estimation de la fonction de risque de base. De plus, l'auteur conclut que le modèle de Weibull, par sa forme analytique, convient mieux à la prédiction des probabilités de bris et devrait être utilisé pour calculer $h_0(t)$. Ainsi, les paramètres λ et p doivent être obtenus pour chacun des réseaux puis peuvent être utilisés dans le modèle des risques proportionnels avec les coefficients b obtenus précédemment. Bien sûr, cette approche doit d'abord être validée sur d'autres réseaux.

ANNEXE E1 - CARACTÉRISTIQUES DES 133 VILLES RETENUES

Nom de la ville	Linéaire de réseau (km)				Date d'installation des premiers tronçons
	Plus de 51 ans	Entre 50 et 36 ans	Entre 35 et 21 ans	Moins de 20 ans	
Albanel	2,07		4,58	3,85	1900
Amos	29	34	47	29	1900
Asbestos		24	54	40	1945
Ascot			38,5	12	1960
Aubert-Gallion				0,75	1985
Baie-d'Urfé	3	6	3,4		1910
Beauport	8	56	172	356	1900
Bécancour	10	10	80	20	1900
Blainville			63,9	92,4	1960
Buckingham	34	52	42	47	1900
Cap-Rouge		47	52	35	1945
Caplan			2,6	14,85	1960
Carignan				8	1985
Chambly	42	12,35	57,06	20,83	1900
Charlesbourg		375	120	85	1945
Charny	60	90	90	60	1905
Chatham				9	1985
Coaticook	12	29	14	25	1900
Cowansville	10	20	49	45	1900
Deauville				23,09	1985
Delson		14,1	25,5	38,2	1945
Deux-Montagnes			68	25	1960
Dolbeau	10	50	40	20	1930
Dollard-des-Ormeaux			140	141	1960
Donnacoona	60,5	31,9	25,9	12	1915
Dorval	5,38	84,19	55,04	65,68	1900
Drummondville	46	77,5	110	134	1900
Fasset		4		1,2	1945

Nom de la ville	Linéaire de réseau (km)				Date d'installation des premiers tronçons
	Plus de 51 ans	Entre 50 et 36 ans	Entre 35 et 21 ans	Moins de 20 ans	
Fleurimont			56,3	71,76	1960
Gatineau	10	56	270	315	1900
Granby	15	27,1	118	67,4	1900
Greenfield Park		34,03	47,07	17,84	1945
Henryville		7	3		1945
Hull	4,5	10,2	135,5	159,8	1900
Jonquière	165	71	47	27	1900
L'Ange-Gardien		0,5	10,5	3	1945
L'Ascension				1,6	1985
L'Assomption		13	38	20	1945
L'Île-Perrot			33,6	21,9	1960
La Prairie	5,78	14,92	36,3	76,22	1900
La Tuque	24	28	22	8	1900
Lac-Beauport				33	1985
Lac-Brome				28,67	1985
Lac-Saint-Charles			40,6	35,5	1960
LaSalle		160	160	70	1945
Le Gardeur	8,5	20,5	18	77	1900
Les Méchins		6		3	1945
Longueuil	40	240	60	80	1900
Maria				21	1985
Masson-Angers	6,7	4,7	8,91	43,64	1900
Mercier			39,3	12,9	1960
Métabetchouan	8		7	3	1900
Mistassini	4	11	13	14	1900
Mont-Laurier	5,3	26,5	20,4	16,8	1910
Montréal-Est		5	63	20	1945
Notre-Dame-de-Bon-Secours				3,4	1985
Notre-Dame-de-L'Île-Perrot			48	35	1960

Nom de la ville	Linéaire de réseau (km)				Date d'installation des premiers tronçons
	Plus de 51 ans	Entre 50 et 36 ans	Entre 35 et 21 ans	Moins de 20 ans	
Notre-Dame-des-Prairies			21	19,2	1960
Otterburn-Park		8,55	13,47	29,95	1945
Outremont	38,77	2,55	0,12	0,04	1900
Petit-Matane			5	1	1960
Pierrefonds		20	245	95	1945
Plessisville			3		1960
Pointe-au-Père			18,8	11,5	1960
Québec	280	115	95	60,88	1900
Repentigny		45	84	256	1945
Roberval	11	27	28	23	1900
Rock-Forest			30	120	1960
Rouyn-Noranda	19,9	22,39	19,3	70,5	1900
St-Adelme			1		1960
St-Adolphe-d'Howard				10	1985
St-Alexandre		5,44		13,89	1945
St-Amable				11,09	1985
St-André-d'Acton				3,24	1985
St-Antoine-de-Lavaltrie				14,11	1985
St-Antoine		8,13	32,2	78,58	1955
St-Augustin-De-Desmaures			56,1	92,2	1960
St-Boniface-de-Shawinigan				2,5	1985
Ste-Brigide-d'Iberville			7	1	1960
St-Charles-Borromée			31,2	16,24	1960
St-Charles-de-Drummond			19	10	1960
St-Damase		4		8,32	1945
St-Elie-d'Orford			15,8	37,52	1960
St-Félicien	30,5	31,9	16,03	7,94	1900
St-Georges		15	115	220	1945
St-Germain			0,26	0,23	1960
St-Honoré-de-Témiscouata	3			2,6	1900

Nom de la ville	Linéaire de réseau (km)				Date d'installation des premiers tronçons
	Plus de 51 ans	Entre 50 et 36 ans	Entre 35 et 21 ans	Moins de 20 ans	
Saint-Honoré		2	2		1955
Saint-Hyacinthe	108	56	91	66	1900
Saint-Isidore- d'Auckland		2,32	1,4	1,7	1945
Saint-Isidore				16,5	1985
Saint-Jacques-de-Leeds		3	0,5	0,5	1945
Saint-Jean-sur-Richelieu	47,44	10,65	75,51	63,75	1900
Saint-Justin			0,3	4,66	1960
Saint-Lazare				19	1985
Saint-Lin				2,7	1985
Saint-Mathias-sur- Richelieu			18,76	7,42	1960
St-Mathieu-de-Beloil				6,22	1985
St-Nicéphore				75	1985
St-Philippe	0,5	0,5	0,5	17,5	1900
St-Pierre		2	14,8		1945
St-Sauveur-des-Monts			37,5	2,5	1960
St-Sébastien		0,8		3,5	1945
St-Thomas			3,6	3,38	1960
St-Zéphirin-de-Courval			5		1960
Ste-Agathe-des-Monts	16,1	6	23,1	14,3	1900
Ste-Anne-de-Bellevue	6,4	0,3	14,34	16,9	1900
Ste-Françoise				3	1985
Ste-Geneviève		8,1	0,8	2,2	1945
Ste-Julie			60	140	1960
Sainte-Julienne		3			1945
Ste-Madeleine			14,14	10	1960
Ste-Marguerite		1,01	2,3	0,7	1945
Ste-Marthe-du-Cap		2	4,8	21,7	1945
Ste-Thècle			6,8	3	1960
Ste-Victoire-de-Sorel	2				1900

Nom de la ville	Linéaire de réseau (km)				Date d'installation des premiers tronçons
	Plus de 51 ans	Entre 50 et 36 ans	Entre 35 et 21 ans	Moins de 20 ans	
Senneville				18,4	1985
Sept-Îles		71	33	34	1950
Shawinigan-Sud	5	24	9	92	1900
Sherbrooke	56	115	155	118	1900
Sillery	20	20	20	29,5	1900
St-Hubert		85	195	248	1945
St-Léonard		0	330,5	20,4	1945
Sullivan				16,25	1985
Terrebonne		30	70	130	1945
Tracy		18	59	23	1945
Trois-Rivières-Ouest		18	71,7	126	1945
Trois-Rivières	40	45	85	50	1900
Val-Bélair			50,4	121	1960
Val-Morin				1,05	1985
Vaudreuil-Dorion		20,4	21,5	52,9	1945
Ville-Marie	0,2	1,6	16,1	18,6	1900
Westmount	53,5	0,51	3,6		1900

ANNEXE E2 - POURCENTAGE DE LINÉAIRE DE RÉSEAU EN MAUVAIS ÉTAT EN 1997 SIMULÉ POUR LES 133 VILLES RETENUES

Nom de la ville	Scénario "Borne inférieure"	Scénario moyen	Scénario "Borne supérieure"
Albanel	51 %	33 %	14 %
Amos	61 %	39 %	16 %
Asbestos	44 %	28 %	12 %
Ascot	42 %	27 %	11 %
Aubert-Gallion	14 %	9 %	4 %
Baie-d'Urfé	73 %	47 %	19 %
Beauport	35 %	22 %	9 %
Bécancour	51 %	33 %	14 %
Blainville	32 %	21 %	9 %
Buckingham	60 %	39 %	16 %
Caplan	25 %	16 %	7 %
Cap-Rouge	49 %	32 %	13 %
Carignan	14 %	9 %	4 %
Chambly	67 %	43 %	18 %
Charlesbourg	58 %	38 %	15 %
Charny	62 %	40 %	16 %
Chatham	14 %	9 %	4 %
Coaticook	57 %	37 %	15 %
Cowansville	47 %	30 %	13 %
Deauville	14 %	9 %	4 %
Delson	39 %	25 %	10 %
Deux-Montagnes	41 %	27 %	11 %
Dolbeau	57 %	36 %	15 %
Dollard-des-Ormeaux	35 %	22 %	9 %
Donncona	76 %	49 %	20 %
Dorval	50 %	32 %	13 %
Drummondville	51 %	33 %	14 %
Fasset	59 %	38 %	16 %
Fleurimont	33 %	21 %	9 %
Gatineau	38 %	25 %	10 %

Nom de la ville	Scénario "Borne inférieure"	Scénario moyen	Scénario "Borne supérieure"
Granby	47 %	30 %	13 %
Greenfield Park	51 %	33 %	14 %
Henryville	64 %	41 %	17 %
Hull	36 %	23 %	10 %
Jonquière	85 %	55 %	22 %
L'Ange-Gardien	44 %	28 %	12 %
L'Ascension	14 %	9 %	4 %
L'Assomption	45 %	29 %	12 %
L'Île-Perrot	38 %	24 %	10 %
La Prairie	38 %	24 %	10 %
La Tuque	72 %	46 %	19 %
Lac-Beauport	14 %	9 %	4 %
Lac-Brome	14 %	9 %	4 %
Lac-Saint-Charles	36 %	23 %	9 %
LaSalle	53 %	34 %	14 %
Le Gardeur	39 %	25 %	10 %
Les Méchins	54 %	35 %	14 %
Longueuil	62 %	40 %	16 %
Maria	14 %	9 %	4 %
Masson-Angers	38 %	24 %	10 %
Mercier	42 %	27 %	11 %
Métabetchouan	72 %	46 %	19 %
Mistassini	51 %	33 %	14 %
Mont-Laurier	55 %	35 %	14 %
Montréal-Est	44 %	28 %	12 %
Notre-Dame-de-Bon-Secours	14 %	9 %	4 %
Notre-Dame-de-L'Île-Perrot	37 %	24 %	10 %
Notre-Dame-des-Prairies	36 %	23 %	9 %
Otterburn-Park	36 %	23 %	10 %
Outremont	100 %	70 %	29 %
Petit-Matane	44 %	28 %	12 %
Pierrefonds	43 %	28 %	11 %
Plessisville	49 %	32 %	13 %
Pointe-au-Père	38 %	25 %	10 %
Québec	82 %	53 %	22 %
Repentigny	33 %	21 %	9 %

Nom de la ville	Scénario "Borne inférieure"	Scénario moyen	Scénario "Borne supérieure"
Roberval	56 %	36 %	15 %
Rock-Forest	27 %	17 %	7 %
Rouyn-Noranda	47 %	30 %	12 %
Saint-Adelme	49 %	32 %	13 %
Saint-Adolphe-d'Howard	14 %	9 %	4 %
Saint-Alexandre	35 %	22 %	9 %
Saint-Amable	14 %	9 %	4 %
Saint-André-d'Acton	14 %	9 %	4 %
Saint-Antoine	30 %	19 %	8 %
Saint-Antoine-de-Lavaltrie	14 %	9 %	4 %
Saint-Augustin-De-Desmaures	32 %	20 %	8 %
Saint-Boniface-de-Shawinigan	14 %	9 %	4 %
Sainte-Brigide-d'Iberville	46 %	29 %	12 %
Saint-Charles-Borromée	39 %	25 %	10 %
Saint-Charles-de-Drummond	39 %	25 %	10 %
Saint-Damase	37 %	24 %	10 %
Sainte-Agathe-des-Monts	61 %	39 %	16 %
Sainte-Anne-de-Bellevue	47 %	30 %	13 %
Sainte-Françoise	14 %	9 %	4 %
Sainte-Geneviève	59 %	38 %	16 %
Sainte-Julie	29 %	19 %	8 %
Sainte-Julienne	70 %	45 %	19 %
Saint-Elie-d'Orford	29 %	19 %	8 %
Sainte-Madeleine	37 %	24 %	10 %
Sainte-Marguerite	49 %	32 %	13 %
Sainte-Marthe-du-Cap	29 %	19 %	8 %
Sainte-Thècle	40 %	26 %	11 %
Sainte-Victoire-de-Sorel	100 %	72 %	30 %
Saint-Félicien	76 %	49 %	20 %
Saint-Georges	32 %	21 %	9 %
Saint-Germain	36 %	23 %	9 %
Saint-Honoré	53 %	34 %	14 %
Saint-Honoré-de-Témiscouata	70 %	45 %	18 %
Saint-Hyacinthe	68 %	44 %	18 %
Saint-Isidore	14 %	9 %	4 %
Saint-Isidore-d'Auckland	49 %	32 %	13 %

Nom de la ville	Scénario "Borne inférieure"	Scénario moyen	Scénario "Borne supérieure"
Saint-Jacques-de-Leeds	61 %	39 %	16 %
Saint-Jean-sur-Richelieu	56 %	36 %	15 %
Saint-Justin	23 %	15 %	6 %
Saint-Lazare	14 %	9 %	4 %
Saint-Lin	14 %	9 %	4 %
Saint-Mathias-sur-Richelieu	41 %	26 %	11 %
Saint-Mathieu-de-Beloeil	14 %	9 %	4 %
Saint-Nicéphore	14 %	9 %	4 %
Saint-Philippe	25 %	16 %	7 %
Saint-Pierre	52 %	33 %	14 %
Saint-Sauveur-des-Monts	47 %	30 %	12 %
Saint-Sébastien	30 %	19 %	8 %
Saint-Thomas	35 %	23 %	9 %
Saint-Zéphirin-de-Courval	49 %	32 %	13 %
Senneville	14 %	9 %	4 %
Sept-Îles	48 %	31 %	13 %
Shawinigan-Sud	35 %	23 %	9 %
Sherbrooke	55 %	35 %	15 %
Sillery	59 %	38 %	15 %
St-Hubert	39 %	25 %	10 %
St-Léonard	47 %	30 %	13 %
Sullivan	14 %	9 %	4 %
Terrebonne	36 %	23 %	9 %
Tracy	46 %	30 %	12 %
Trois-Rivières	58 %	38 %	15 %
Trois-Rivières-Ouest	34 %	22 %	9 %
Val-Bélair	29 %	19 %	8 %
Val-Morin	14 %	9 %	4 %
Vaudreuil-Dorion	38 %	24 %	10 %
Ville-Marie	36 %	23 %	10 %
Westmount	100 %	69 %	28 %

ANNEXE E3 - NOTE D'INFILTRATION DONNÉE AUX 133 VILLES RETENUES

Nom de la ville	Note globale d'infiltration	Nom de la ville	Note globale d'infiltration
Albanel	4	Henryville	2
Amos	2	Hull	3
Asbestos	4	Jonquière	2
Ascot	3	L'Ange-Gardien	3
Aubert-Gallion	4	L'Ascension	1
Baie-d'Urfé	3	L'Assomption	4
Beauport	3	L'Île-Perrot	2
Bécancour	3	La Prairie	3
Blainville	4	La Tuque	3
Buckingham	3	Lac-Beauport	3
Caplan	2	Lac-Brome	2
Cap-Rouge	2	Lac-Saint-Charles	2
Carignan	3	LaSalle	2
Chambly	3	Le Gardeur	3
Charlesbourg	2	Les Méchins	3
Charny	2	Longueuil	2
Chatham	2	Maria	3
Coaticook	2	Masson-Angers	3
Cowansville	2	Mercier	2
Deauville	2	Métabetchouan	4
Delson	3	Mistassini	4
Deux-Montagnes	2	Mont-Laurier	3
Dolbeau	2	Montréal-Est	2
Dollard-des-Ormeaux	2	Notre-Dame-de-Bon-Secours	3
Donnacoona	2	Notre-Dame-de-L'Île-Perrot	3
Dorval	4	Notre-Dame-des-Prairies	2
Drummondville	3	Otterburn-Park	3
Fasset	4	Outremont	2
Fleurimont	2	Petit-Matane	3
Gatineau	3	Pierrefonds	1
Granby	3	Plessisville	3

Nom de la ville	Note globale d'infiltration	Nom de la ville	Note globale d'infiltration
Greenfield Park	3	Pointe-au-Père	2
Québec	2	Saint-Germain	2
Repentigny	3	Saint-Honoré	4
Roberval	2	St-Honoré-de-Témiscouata	3
Rock-Forest	2	Saint-Hyacinthe	2
Rouyn-Noranda	4	Saint-Isidore	2
Saint-Adelme	2	Saint-Isidore-d'Auckland	3
Saint-Adolphe-d'Howard	4	Saint-Jacques-de-Leeds	2
Saint-Alexandre	2	Saint-Jean-sur-Richelieu	2
Saint-Amable	3	Saint-Justin	2
Saint-André-d'Acton	3	Saint-Lazare	3
Saint-Antoine	3	Saint-Lin	4
Saint-Antoine-de-Lavaltrie	4	Saint-Mathias-sur-Richelieu	2
Saint-Augustin-De-Desmaures	3	Saint-Mathieu-de-Beloil	3
Saint-Boniface-de-Shawinigan	3	Saint-Nicéphore	3
Saint-Brigide-d'Iberville	1	Saint-Philippe	3
Saint-Charles-Borromée	4	Saint-Pierre	4
Saint-Charles-de-Drummond	2	Saint-Sauveur-des-Monts	3
Saint-Damase	3	Saint-Sébastien	2
Sainte-Agathe-des-Monts	3	Saint-Thomas	2
Sainte-Anne-de-Bellevue	2	Saint-Zéphirin-de-Courval	4
Sainte-Françoise	3	Senneville	3
Sainte-Geneviève	3	Sept-Îles	3
Sainte-Julie	3	Shawinigan-Sud	2
Sainte-Julienne	2	Sherbrooke	2
Saint-Elie-d'Orford	3	Sillery	4
Sainte-Madeleine	2	St-Hubert	2
Sainte-Marguerite	1	St-Léonard	2
Sainte-Marthe-du-Cap	3	Sullivan	3
Sainte-Thècle	2	Terrebonne	3
Sainte-Victoire-de-Sorel	2	Tracy	3
Saint-Félicien	2	Trois-Rivières	3

Nom de la ville	Note globale d'infiltration	Nom de la ville	Note globale d'infiltration
Saint-Georges	2	Trois-Rivières-Ouest	3
Val-Bélair	3	Ville-Marie	3
Val-Morin	3	Westmount	2
Vaudreuil-Dorion	3		

ANNEXE E4 - ÉVOLUTION DU POURCENTAGE DU LINÉAIRE DE RÉSEAU EN MAUVAIS ÉTAT DANS LES 20 ANS À VENIR SELON LE SCÉNARIO MOYEN

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 0 %				Renouvellement = 0,6 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Albanel	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Amos	39 %	43 %	50 %	57 %	39 %	39 %	38 %	38 %
Asbestos	28 %	32 %	40 %	47 %	28 %	28 %	28 %	28 %
Ascot	27 %	31 %	39 %	46 %	27 %	27 %	27 %	27 %
Aubert-Gallion	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Baie-d'Urfé	47 %	50 %	57 %	63 %	47 %	46 %	45 %	44 %
Beauport	22 %	27 %	34 %	42 %	22 %	23 %	23 %	23 %
Bécancour	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Blainville	21 %	25 %	33 %	40 %	21 %	21 %	21 %	21 %
Buckingham	39 %	42 %	49 %	56 %	39 %	38 %	38 %	37 %
Caplan	16 %	20 %	28 %	36 %	16 %	16 %	17 %	17 %
Cap-Rouge	32 %	35 %	43 %	50 %	32 %	31 %	31 %	31 %
Carignan	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Chambly	43 %	46 %	53 %	60 %	43 %	42 %	41 %	41 %
Charlesbourg	38 %	41 %	48 %	55 %	38 %	37 %	37 %	36 %
Charny	40 %	43 %	50 %	57 %	40 %	39 %	39 %	38 %
Chatham	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Coaticook	37 %	41 %	48 %	54 %	37 %	37 %	36 %	35 %
Cowansville	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Deauville	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Delson	25 %	29 %	37 %	44 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Deux-Montagnes	27 %	31 %	38 %	45 %	27 %	27 %	26 %	26 %
Dolbeau	36 %	40 %	47 %	54 %	36 %	36 %	35 %	35 %
Dollard-des-Ormeaux	22 %	26 %	34 %	42 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Donncona	49 %	52 %	59 %	65 %	49 %	48 %	47 %	46 %
Dorval	32 %	36 %	43 %	50 %	32 %	32 %	32 %	31 %
Drummondville	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Fasset	38 %	41 %	49 %	55 %	38 %	37 %	37 %	36 %
Fleurimont	21 %	25 %	33 %	41 %	21 %	21 %	21 %	22 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 0 %				Renouvellement = 0,6 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Gatineau	25 %	29 %	36 %	44 %	25 %	25 %	24 %	24 %
Granby	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Greenfield Park	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Henryville	41 %	45 %	52 %	58 %	41 %	41 %	40 %	39 %
Hull	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Jonquière	55 %	58 %	64 %	70 %	55 %	54 %	53 %	51 %
L'Ange-Gardien	28 %	32 %	40 %	47 %	28 %	28 %	28 %	28 %
L'Ascension	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
L'Assomption	29 %	33 %	40 %	47 %	29 %	29 %	29 %	28 %
L'Île-Perrot	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
La Prairie	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
La Tuque	46 %	50 %	56 %	63 %	46 %	46 %	45 %	44 %
Lac-Beauport	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Lac-Brome	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Lac-Saint-Charles	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
LaSalle	34 %	38 %	45 %	52 %	34 %	34 %	33 %	33 %
Le Gardeur	25 %	29 %	37 %	44 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Les Méchins	35 %	38 %	45 %	52 %	35 %	34 %	34 %	33 %
Longueuil	40 %	43 %	50 %	57 %	40 %	39 %	39 %	38 %
Maria	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Masson-Angers	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
Mercier	27 %	31 %	39 %	46 %	27 %	27 %	27 %	27 %
Métabetchouan	46 %	50 %	57 %	63 %	46 %	46 %	45 %	44 %
Mistassini	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Mont-Laurier	35 %	39 %	46 %	53 %	35 %	35 %	34 %	34 %
Montréal-Est	28 %	32 %	40 %	47 %	28 %	28 %	28 %	28 %
Notre-Dame-de-Bon-Secours	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Notre-Dame-de-L'Île-Perrot	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
Notre-Dame-des-Prairies	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Otterburn-Park	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Outremont	70 %	73 %	79 %	84 %	70 %	69 %	67 %	65 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 0 %				Renouvellement = 0,6 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Petit-Matane	28 %	32 %	40 %	47 %	28 %	28 %	28 %	28 %
Pierrefonds	28 %	31 %	39 %	46 %	28 %	27 %	27 %	27 %
Plessisville	32 %	35 %	43 %	50 %	32 %	31 %	31 %	31 %
Pointe-au-Père	25 %	29 %	36 %	44 %	25 %	25 %	25 %	24 %
Québec	53 %	56 %	63 %	69 %	53 %	52 %	51 %	50 %
Repentigny	21 %	25 %	33 %	40 %	21 %	21 %	21 %	21 %
Roberval	36 %	40 %	47 %	54 %	36 %	36 %	35 %	35 %
Rock-Forest	17 %	21 %	29 %	37 %	17 %	17 %	17 %	18 %
Rouyn-Noranda	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	29 %
Saint-Adelme	32 %	35 %	43 %	50 %	32 %	31 %	31 %	31 %
Saint-Adolphe-d'Howard	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Alexandre	22 %	26 %	34 %	42 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Saint-Amable	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-André-d'Acton	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Antoine	19 %	23 %	31 %	39 %	19 %	19 %	19 %	20 %
Saint-Antoine-de-Lavaltrie	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Augustin-De-Desmaures	20 %	24 %	32 %	40 %	20 %	20 %	20 %	21 %
Saint-Boniface-de-Shawinigan	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Brigide-d'Iberville	29 %	33 %	41 %	48 %	29 %	29 %	29 %	29 %
Saint-Charles-Borromée	25 %	29 %	37 %	44 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Saint-Charles-de-Drummond	25 %	29 %	37 %	44 %	25 %	25 %	25 %	25 %
Saint-Damase	24 %	28 %	35 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
Sainte-Agathe-des-Monts	39 %	43 %	50 %	57 %	39 %	39 %	38 %	38 %
Sainte-Anne-de-Bellevue	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Sainte-Françoise	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Sainte-Geneviève	38 %	41 %	49 %	55 %	38 %	37 %	37 %	36 %
Sainte-Julie	19 %	23 %	31 %	38 %	19 %	19 %	19 %	19 %
Sainte-Julienne	45 %	49 %	55 %	62 %	45 %	45 %	44 %	43 %
Saint-Elie-d'Orford	19 %	23 %	31 %	38 %	19 %	19 %	19 %	19 %
Sainte-Madeleine	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 0 %				Renouvellement = 0,6 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Sainte-Marguerite	32 %	36 %	43 %	50 %	32 %	32 %	31 %	31 %
Sainte-Marthe-du-Cap	19 %	23 %	31 %	38 %	19 %	19 %	19 %	19 %
Sainte-Thècle	26 %	30 %	38 %	45 %	26 %	26 %	26 %	26 %
Sainte-Victoire-de-Sorel	72 %	75 %	81 %	86 %	72 %	71 %	69 %	67 %
Saint-Félicien	49 %	53 %	59 %	65 %	49 %	49 %	47 %	46 %
Saint-Georges	21 %	25 %	33 %	40 %	21 %	21 %	21 %	21 %
Saint-Germain	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Saint-Honoré	34 %	38 %	45 %	52 %	34 %	34 %	33 %	33 %
Saint-Honoré-de-Témiscouata	45 %	48 %	55 %	62 %	45 %	44 %	43 %	43 %
Saint-Hyacinthe	44 %	47 %	54 %	61 %	44 %	43 %	42 %	42 %
Saint-Isidore	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Isidore-d'Auckland	32 %	35 %	43 %	50 %	32 %	31 %	31 %	31 %
Saint-Jacques-de-Leeds	39 %	43 %	50 %	57 %	39 %	39 %	38 %	38 %
Saint-Jean-sur-Richelieu	36 %	40 %	47 %	54 %	36 %	36 %	35 %	35 %
Saint-Justin	15 %	19 %	27 %	35 %	15 %	15 %	15 %	15 %
Saint-Lazare	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Lin	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Mathias-sur-Richelieu	26 %	30 %	38 %	45 %	26 %	26 %	26 %	26 %
Saint-Mathieu-de-Beloeil	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Nicéphore	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Saint-Philippe	16 %	20 %	28 %	36 %	16 %	16 %	17 %	17 %
Saint-Pierre	33 %	37 %	44 %	51 %	33 %	33 %	32 %	32 %
Saint-Sauveur-des-Monts	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Saint-Sébastien	19 %	23 %	31 %	39 %	19 %	19 %	20 %	20 %
Saint-Thomas	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Saint-Zéphirin-de-Courval	32 %	35 %	43 %	50 %	32 %	31 %	31 %	31 %
Senneville	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Sept-Îles	31 %	35 %	42 %	49 %	31 %	31 %	30 %	30 %
Shawinigan-Sud	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Sherbrooke	35 %	39 %	46 %	53 %	35 %	35 %	35 %	34 %
Sillery	38 %	41 %	48 %	55 %	38 %	37 %	37 %	36 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 0 %				Renouvellement = 0,6 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
St-Hubert	25 %	29 %	37 %	44 %	25 %	25 %	25 %	25 %
St-Léonard	30 %	34 %	42 %	49 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Sullivan	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Terrebonne	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Tracy	30 %	34 %	41 %	48 %	30 %	30 %	29 %	29 %
Trois-Rivières	38 %	41 %	48 %	55 %	38 %	37 %	37 %	36 %
Trois-Rivières-Ouest	22 %	26 %	34 %	41 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Val-Bélair	19 %	23 %	31 %	38 %	19 %	19 %	19 %	19 %
Val-Morin	9 %	13 %	22 %	30 %	9 %	9 %	10 %	10 %
Vaudreuil-Dorion	24 %	28 %	36 %	43 %	24 %	24 %	24 %	24 %
Ville-Marie	23 %	27 %	35 %	42 %	23 %	23 %	23 %	23 %
Westmount	69 %	72 %	78 %	83 %	69 %	68 %	66 %	64 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 1 %				Renouvellement = 1,5 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Albanel	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Amos	39 %	33 %	21 %	9 %	39 %	28 %	6 %	5 %
Asbestos	28 %	22 %	10 %	5 %	28 %	17 %	5 %	5 %
Ascot	27 %	21 %	9 %	5 %	27 %	16 %	5 %	5 %
Aubert-Gallion	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Baie-d'Urfé	47 %	40 %	28 %	15 %	47 %	35 %	13 %	5 %
Beauport	22 %	17 %	5 %	5 %	22 %	12 %	5 %	5 %
Bécancour	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Blainville	21 %	15 %	5 %	5 %	21 %	10 %	5 %	5 %
Buckingham	39 %	32 %	20 %	8 %	39 %	27 %	5 %	5 %
Caplan	16 %	10 %	5 %	5 %	16 %	5 %	5 %	5 %
Cap-Rouge	32 %	25 %	13 %	5 %	32 %	20 %	5 %	5 %
Carignan	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Chambly	43 %	36 %	24 %	12 %	43 %	31 %	9 %	5 %
Charlesbourg	38 %	31 %	19 %	7 %	38 %	26 %	5 %	5 %
Charny	40 %	33 %	21 %	9 %	40 %	28 %	6 %	5 %
Chatham	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Coaticook	37 %	31 %	18 %	7 %	37 %	26 %	5 %	5 %
Cowansville	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Deauville	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Delson	25 %	19 %	7 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
Deux-Montagnes	27 %	21 %	9 %	5 %	27 %	16 %	5 %	5 %
Dolbeau	36 %	30 %	18 %	6 %	36 %	25 %	5 %	5 %
Dollard-des-Ormeaux	22 %	16 %	5 %	5 %	22 %	11 %	5 %	5 %
Donnacoona	49 %	42 %	30 %	17 %	49 %	37 %	15 %	5 %
Dorval	32 %	26 %	14 %	5 %	32 %	21 %	5 %	5 %
Drummondville	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Fasset	38 %	31 %	19 %	7 %	38 %	26 %	5 %	5 %
Fleurimont	21 %	15 %	5 %	5 %	21 %	10 %	5 %	5 %
Gatineau	25 %	19 %	7 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
Granby	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Greenfield Park	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Henryville	41 %	35 %	22 %	10 %	41 %	30 %	7 %	5 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 1 %				Renouvellement = 1,5 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Hull	23 %	17 %	6 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Jonquière	55 %	48 %	35 %	23 %	55 %	43 %	20 %	5 %
L'Ange-Gardien	28 %	22 %	10 %	5 %	28 %	17 %	5 %	5 %
L'Ascension	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
L'Assomption	29 %	23 %	11 %	5 %	29 %	18 %	5 %	5 %
L'Île-Perrot	24 %	18 %	7 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
La Prairie	24 %	18 %	7 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
La Tuque	46 %	40 %	27 %	15 %	46 %	35 %	12 %	5 %
Lac-Beauport	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Lac-Brome	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Lac-Saint-Charles	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
LaSalle	34 %	28 %	15 %	5 %	34 %	23 %	5 %	5 %
Le Gardeur	25 %	19 %	8 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
Les Méchins	35 %	28 %	16 %	5 %	35 %	23 %	5 %	5 %
Longueuil	40 %	33 %	21 %	9 %	40 %	28 %	6 %	5 %
Maria	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Masson-Angers	24 %	18 %	7 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
Mercier	27 %	21 %	9 %	5 %	27 %	16 %	5 %	5 %
Métabetchouan	46 %	40 %	27 %	15 %	46 %	35 %	13 %	5 %
Mistassini	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Mont-Laurier	35 %	29 %	17 %	5 %	35 %	24 %	5 %	5 %
Montréal-Est	28 %	22 %	10 %	5 %	28 %	17 %	5 %	5 %
Notre-Dame-de-Bon-Secours	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Notre-Dame-de-L'Île-Perrot	24 %	18 %	6 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
Notre-Dame-des-Prairies	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Otterburn-Park	23 %	17 %	6 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Outremont	70 %	63 %	49 %	36 %	70 %	58 %	35 %	13 %
Petit-Matane	28 %	22 %	11 %	5 %	28 %	17 %	5 %	5 %
Pierrefonds	28 %	21 %	10 %	5 %	28 %	16 %	5 %	5 %
Plessisville	32 %	25 %	13 %	5 %	32 %	20 %	5 %	5 %
Pointe-au-Père	25 %	19 %	7 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 1 %				Renouvellement = 1,5 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Québec	53 %	46 %	33 %	21 %	53 %	41 %	19 %	5 %
Repentigny	21 %	15 %	5 %	5 %	21 %	10 %	5 %	5 %
Roberval	36 %	30 %	17 %	6 %	36 %	25 %	5 %	5 %
Rock-Forest	17 %	11 %	5 %	5 %	17 %	6 %	5 %	5 %
Rouyn-Noranda	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Saint-Adelme	32 %	25 %	13 %	5 %	32 %	20 %	5 %	5 %
Saint-Adolphe-d'Howard	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Alexandre	22 %	16 %	5 %	5 %	22 %	11 %	5 %	5 %
Saint-Amable	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-André-d'Acton	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Antoine	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Saint-Antoine-de-Lavaltrie	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Augustin-De-Desmaures	20 %	14 %	5 %	5 %	20 %	9 %	5 %	5 %
Saint-Boniface-de-Shawinigan	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Brigide-d'Iberville	29 %	23 %	11 %	5 %	29 %	18 %	5 %	5 %
Saint-Charles-Borromée	25 %	19 %	8 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
Saint-Charles-de-Drummond	25 %	19 %	8 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
Saint-Damase	24 %	18 %	6 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
Sainte-Agathe-des-Monts	39 %	33 %	21 %	9 %	39 %	28 %	6 %	5 %
Sainte-Anne-de-Bellevue	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Sainte-Françoise	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Sainte-Geneviève	38 %	31 %	19 %	7 %	38 %	26 %	5 %	5 %
Sainte-Julie	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Sainte-Julienne	45 %	39 %	26 %	14 %	45 %	34 %	11 %	5 %
Saint-Elie-d'Orford	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Sainte-Madeleine	24 %	18 %	6 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
Sainte-Marguerite	32 %	26 %	14 %	5 %	32 %	21 %	5 %	5 %
Sainte-Marthe-du-Cap	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Sainte-Thècle	26 %	20 %	8 %	5 %	26 %	15 %	5 %	5 %
Sainte-Victoire-de-Sorel	72 %	65 %	51 %	38 %	72 %	60 %	37 %	14 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 1 %				Renouvellement = 1,5 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Saint-Félicien	49 %	43 %	30 %	18 %	49 %	38 %	15 %	5 %
Saint-Georges	21 %	15 %	5 %	5 %	21 %	10 %	5 %	5 %
Saint-Germain	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Saint-Honoré	34 %	28 %	15 %	5 %	34 %	23 %	5 %	5 %
Saint-Honoré-de-Témiscouata	45 %	38 %	26 %	14 %	45 %	33 %	11 %	5 %
Saint-Hyacinthe	44 %	37 %	25 %	13 %	44 %	32 %	10 %	5 %
Saint-Isidore	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Isidore-d'Auckland	32 %	25 %	13 %	5 %	32 %	20 %	5 %	5 %
Saint-Jacques-de-Leeds	39 %	33 %	21 %	9 %	39 %	28 %	6 %	5 %
Saint-Jean-sur-Richelieu	36 %	30 %	18 %	6 %	36 %	25 %	5 %	5 %
Saint-Justin	15 %	9 %	5 %	5 %	15 %	5 %	5 %	5 %
Saint-Lazare	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Lin	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Mathias-sur-Richelieu	26 %	20 %	9 %	5 %	26 %	15 %	5 %	5 %
Saint-Mathieu-de-Beloeil	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Nicéphore	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Saint-Philippe	16 %	10 %	5 %	5 %	16 %	5 %	5 %	5 %
Saint-Pierre	33 %	27 %	15 %	5 %	33 %	22 %	5 %	5 %
Saint-Sauveur-des-Monts	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Saint-Sébastien	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Saint-Thomas	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Saint-Zéphirin-de-Courval	32 %	25 %	13 %	5 %	32 %	20 %	5 %	5 %
Senneville	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Sept-Îles	31 %	25 %	13 %	5 %	31 %	20 %	5 %	5 %
Shawinigan-Sud	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Sherbrooke	35 %	29 %	17 %	5 %	35 %	24 %	5 %	5 %
Sillery	38 %	31 %	19 %	7 %	38 %	26 %	5 %	5 %
St-Hubert	25 %	19 %	7 %	5 %	25 %	14 %	5 %	5 %
St-Léonard	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Sullivan	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Terrebonne	23 %	17 %	5 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %

Scénario MOYEN								
Nom de la ville	Renouvellement = 1 %				Renouvellement = 1,5 %			
	1995	2000	2010	2020	1995	2000	2010	2020
Tracy	30 %	24 %	12 %	5 %	30 %	19 %	5 %	5 %
Trois-Rivières	38 %	31 %	19 %	7 %	38 %	26 %	5 %	5 %
Trois-Rivières-Ouest	22 %	16 %	5 %	5 %	22 %	11 %	5 %	5 %
Val-Bélair	19 %	13 %	5 %	5 %	19 %	8 %	5 %	5 %
Val-Morin	9 %	5 %	5 %	5 %	9 %	5 %	5 %	6 %
Vaudreuil-Dorion	24 %	18 %	7 %	5 %	24 %	13 %	5 %	5 %
Ville-Marie	23 %	17 %	6 %	5 %	23 %	12 %	5 %	5 %
Westmount	69 %	62 %	49 %	36 %	69 %	57 %	34 %	12 %

ANNEXE E5 - CALCUL DES COÛTS DE REMPLACEMENT DES CONDUITES D'ÉGOUT

5.1 Données de la ville A

Nous avons utilisé les coûts de remplacement donnés par la ville A pour des conduites d'égout enfouies à une profondeur moyenne de 4,2 mètres.

Tableau X5.1 : Calcul du coût moyen de remplacement pour la ville A

Diamètre (mm)	Coût (\$ / m)
155	685
205	690
255	715
305	730
355	740
380	760
405	785
455	810
535	845
610	905
685	965
760	1 035
915	1 130
1 065	1 275
1 220	1 400
1 370	1 525
1 525	1 670

Diamètre du réseau ausculté (mm)	Pourcentage du linéaire	Linéaire (km)	Coût de remplacement du linéaire (\$)
0 à 100	5 %	14,81	10 142
100 à 200	0 %	0,25	170
200 à 300	10 %	31,17	22 186
300 à 400	59 %	187,37	142 710
400 à 500	10 %	30,85	25 094
500 à 600	3 %	8,70	7 614
600 à 700	8 %	24,59	22 991
700 à 800	4 %	11,22	11 611
800 à 900	0 %	0,00	0
900 à 1000	3 %	11,04	13 281
Somme		320,00	255 798
Coût moyen du mètre linéaire pour la ville A			799 \$

5.2 Données de la ville C

Tableau X5.2 : Coût de remplacement de l'égout pour la ville C

Combiné		Sanitaire		Pluvial		Tout réseau	
Diamètre (mm)	Coût (\$ / m)	Diamètre (mm)	Coût (\$ / m)	Diamètre (mm)	Coût (\$ / m)	Diamètre (mm)	Coût moyen (\$ / m) ÉGOUT
300	750	300	700	300	550	300	667
375	900	375	750	375	600	375	750
450	1050	450	840	450	650	450	847
600	1260	600	900	600	700	600	953
760	1450	760	940	760	800	760	1063
910	1650			910	1000	910	1325
1050	1800			1050	1500	1050	1650
1200	2000			1350	2000	1350	2000

5.3 Données du questionnaire de l'INRS-Urbanisation

Nous avons estimé un coût moyen du mètre linéaire à partir de la répartition moyenne du réseau québécois par diamètre et des coûts par diamètre donnés par les A et C.

Tableau X5.3 : Calcul du coût moyen de remplacement à partir de la répartition moyenne du réseau québécois par diamètre

Répartition retenue des coûts par diamètre				Tableau des coûts Ville A	Tableau des coûts Ville C
Diamètre	Diamètre (mm)	Pourcentage de linéaire	Linéaire (km)	Coût de remplacement du linéaire ÉGOUT (\$)	Coût de remplacement du linéaire ÉGOUT (\$)
< 8"	< 200	49 %	8 305	5 688 925	5 536 667
8 à 14"	200 à 300	35 %	6 018	4 383 110	4 012 000
14" à 20"	300 à 450	11 %	1 899	1 514 453	1 607 820
> 20"	> 500	40 %	602	719 056	841 797
Inconnu		1 %	233		
Somme pour les diamètres connus			16 824	12 305 543	11 998 283
Coût moyen du mètre linéaire				731 \$	713 \$

